



UNIVERSIDAD
BICENTENARIA

REALIDAD INMERSIVA Y CONDUCCIÓN

DISEÑO E
INNOVACIÓN A
ESCALA

¡SUEÑA, HAZ QUE SUCEDA!

Autores:
Dayana Almeida
Bryan Vinueza

2025



AUTORIDADES

Dr. Basilio Sánchez
Presidente

Dr. Gustavo Sánchez
Rector

Dra. Edilia Papa
Secretaria General

Dra. Mirian Regalado
Vicerrectora Académica

Dra. Zeyda Padilla
Vicerrectora Administrativa



DECANATO DE INVESTIGACIÓN, EXTENSIÓN Y POSTGRADO

DIEP

Abog. Wilmer Galíndez MSc.
Decano

Abog. María T. Ramírez MSc.
Directora de Postgrado

Dra. Maite Marrero
Directora de Investigación

Dra. Yesenia Centeno
Coordinadora del Fondo Editorial

FACULTAD DE INGENIERÍA

Ing. Andrés Guzmán, MSc.
Decano de la Facultad de Ingeniería

Ing. Madglodi Flores
Directora de la Escuela de Ingeniería en Sistema

Ing. Belkys Ramírez, MSc.
Directora de la Escuela de Ingeniería Eléctrica



Obra: "Realidad Inmersiva y Conducción: Diseño e Innovación a Escala"

Autores:

Dayana Almeida

dayana_alm@hotmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-9178-1204>

Bryan Vinueza

brvinuezabu@uide.edu.ec <https://orcid.org/0009-0002-7871-0961>

Universidad Internacional del Ecuador (UIDE)

COMITÉ EDITORIAL

Ing. José Luis Ceballos (UBA, Venezuela)

Ing. Liliana Minsero, Esp. (UBA, Venezuela)

Ing. Deyanira Noguera, Esp. (UBA, Venezuela)

Ing. Alexis Rodríguez, MSc. (UBA, Venezuela)

Ing. Alexander Jiménez (UBA, Venezuela)

Dra. Maite Marrero (UBA-DIEP, Venezuela)

Dra. Yesenia Centeno (FEUBA, Venezuela)

EDITOR

Dra. Waleska Perdomo. Ingeniero en Sistemas
Universidad Tecnológica del Centro, Venezuela

DIAGRAMACIÓN Y REVISIÓN GENERAL

Dra. Yesenia Centeno

DISEÑO DE PORTADA

Arte del Vicerrectorado de Comunicación e Información
Ajustes TSU Missleidy Sánchez

ILUSTRACIONES

Imágenes generadas con IA www.canva.com
<https://www.proun.es/blog> <http://www.freepik.es/>

Serie de Ingeniería
Volumen 3 Número 2, 2025



Fecha de aceptación:
septiembre 2024

Fecha de publicación:
marzo 2025

Depósito Legal:
AR2025000050

ISBN:
978-980-6508-91-0

Reservados todos los derechos
conforme a la Ley

Se permite la reproducción total
o parcial del libro siempre que
se indique
expresamente la fuente.

La Serie Ingeniería corresponde al Fondo Editorial anclada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Bicentenario de Aragua (FEUBA), dirigida a la publicación de productos intelectuales resultantes de la Ingeniería, Inventiva, Innovación y Creatividad de estudiantes, docentes y público en general. Tiene como propósito divulgar las experiencias de interés para el desarrollo de la investigación, productividad y avances de la ciencia. Es una publicación arbitrada por el sistema doble ciego.

ISBN: 978-980-6508-91-0



9 789806 150891 0

INDICE DE CONTENIDOS

Contenido

CAPÍTULO I Relevancia de Hoy: Explorando Temas y Motivos que Transforman

Breve introducción a la lectura del libro	11
¿Por qué este tema es relevante hoy?	12
Trabajos relacionados y motivación del proyecto	13

CAPÍTULO II Fundamentos del Proyecto: Explorando la Telepresencia, Inmersión y la Tecnología Háptica

Fundamentos del Proyecto	18
¿Qué es la telepresencia?	18
¿Qué es la inmersión?	19
Tecnología háptica: sentir a través de la máquina	19
Antecedentes del uso de estas tecnologías	20
De la industria nuclear a la conducción remota	20
La visión, el control y la robótica: nuevas fronteras	21
Hacia la respuesta háptica y la inmersión multisensorial	21
La pandemia como catalizador tecnológico	22
Inspiración directa para este proyecto	22

CAPÍTULO III Del Concepto a la Realidad: Diseño y Componentes del Prototipo

Diseño del Prototipo	25
Descripción general del sistema	25
Componentes clave	25

Cómo se conectan y para qué sirve cada parte	28
CAPÍTULO IV Implementación Técnica: Donde el Código Encuentra al Prototipo	
Sistema Vehicular	35
Distribución Mecánica	35
Sistema Electrónico para el Control de Acciones	38
Sistema de Recolección de Datos	38
Implementación del Módulo Encoder en el Vehículo	39
Sistema de Comunicación	41
Configuración del Router	41
Direccionamiento IP	44
Configuración WiFi en ESP8266	44
Protocolo UDP	46
Configuración UDP en ESP8266	46
Protocolo MQTT (Message Queue Telemetry Transport)	47
Configuración MQTT en ESP8266	47
Node-RED	49
Dashboard	51
Nodos	51
Configuración de UDP	53
UDP In	53
Configuración de MQTT	56
MQTT In	57
MQTT Out	58
Comunicación Serial	59
Interfaz	59
Diseño de la interfaz en Node-RED	62
Visualización de Video.	68
Sistema de Control	69
Transmisor del Control Vehicular	69
Sistema Sensorial	76
Diseño del Dispositivo Háptico	76
Construcción del Dispositivo Háptico	78
Generación de Patrones de Vibración	82

Respuestas ante Variación de Maniobras.	89
Respuestas Topográficas.	97
Adelante	99
Respuestas ante Variación de Velocidad.	100
CAPÍTULO V Más Allá del Laboratorio: Resultados, Experiencias y Viabilidad del Prototipo	
Pruebas y Resultados	102
Pruebas en Ambiente Externo con Línea de Vista	102
Resultados por Estándar de Red	102
Pruebas en Ambiente Interno sin Línea de Vista	103
Resultados por Estándar de Red	103
Pruebas de Transmisión de Video en Banda de 5GHz	104
Análisis en Ambiente Externo con Línea de Vista	104
Análisis en Ambiente Interno sin Línea de Vista	106
Análisis de Transmisión de Video en Banda de 5 GHz	108
Evaluación de percepción del dispositivo háptico	108
Determinación del tamaño muestral	109
Resultados de la encuesta	109
Análisis de Costo	111
Costo del Dispositivo Háptico	112
Costo del Sistema Vehicular	113
Costo del Sistema de Comunicación	113
Costo de la Estación de Control	114
Costo Total del Prototipo	114
CAPÍTULO VI El Futuro Conectado: Lo que Aprendimos y lo que Viene	
Conclusiones y Futuro	117
¿Qué se logró?	117
¿Qué se podría mejorar?	118
Potenciales aplicaciones	118
Referencias	121
GLOSARIO DE TERMINOS	124

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el estudio de los videojuegos ha cobrado un notable protagonismo en el ámbito académico, con investigaciones centradas en su diseño, en la posición del jugador, y en los elementos que capturan su atención. No obstante, más allá de sus componentes estructurales o narrativos, la esencia de los videojuegos radica en su capacidad para generar experiencias inmersivas. Esta capacidad no solo estimula los sentidos del jugador, sino que modifica su percepción del entorno y del tiempo, hasta el punto de hacerlo sentir dentro del juego. A esta experiencia se la conoce como “inmersión”.

La inmersión no es una cualidad que dependa únicamente de los elementos visuales o sonoros de un juego; se trata más bien de un proceso dinámico de interacción entre el jugador y el entorno digital. En este sentido, conceptos como la “telepresencia” resultan complementarios. La telepresencia se refiere a la sensación de encontrarse físicamente en un lugar remoto, lo que en el contexto de la realidad virtual implica que el usuario se traslade perceptivamente a otro espacio. Así, tanto la inmersión como la telepresencia se convierten en pilares fundamentales para comprender cómo interactuamos con entornos digitales, no

solo en videojuegos, sino también en aplicaciones con fines profesionales, científicos y sociales.

Una de las tecnologías que ha fortalecido esta relación sensorial es la háptica, que posibilita la percepción táctil dentro de entornos artificiales. Aunque la complejidad de los estímulos que puede generar sigue siendo limitada, los dispositivos hápticos mejoran considerablemente la calidad de la experiencia inmersiva, ya que permiten recibir información táctil sin sobrecargar los otros sentidos. Estos dispositivos, muchas veces diseñados para las manos, también pueden aplicarse a otras partes del cuerpo, brindando una retroalimentación realista sobre el entorno digital.

La motivación principal que condujo al desarrollo del proyecto relatado en este libro parte de esta necesidad creciente de reducir la exposición humana en entornos peligrosos. La tecnología ha demostrado ser una aliada en la creación de soluciones que permitan realizar tareas a distancia con mayor precisión y seguridad, desde operaciones industriales hasta intervenciones quirúrgicas. En este contexto, tecnologías como la teleoperación —la operación remota de dispositivos por parte de una persona— y la inmersión han mostrado un enorme potencial. Cuando se combinan, permiten crear sistemas que no solo reproducen visual y auditivamente un entorno remoto, sino que también lo transmiten al cuerpo mediante estímulos táctiles.

Este libro surge de una experiencia concreta: el desarrollo de un prototipo de emulador de conducción vehicular terrestre a escala, orientado a generar una experiencia de conducción inmersiva mediante tecnologías de telepresencia y háptica. Este prototipo integró múltiples sistemas: un vehículo a escala controlado remotamente a través de tecnología WiFi, un sistema de comunicación que transmite en tiempo real video y datos sensoriales, un sistema de conducción compuesto por volante, pedales y palanca de cambio adaptados de consolas de videojuegos, y un chaleco háptico con actuadores vibro-táctiles que permitieron al usuario “sentir” el terreno y la interacción con el entorno.

La experiencia desarrollada permitió constatar que la sensación de presencia en un entorno remoto no solo depende de la calidad visual o auditiva del sistema, sino de la integración coherente de estímulos sensoriales. Así, se logró que el usuario experimentara una conducción más realista, percibiendo las irregularidades del terreno, respondiendo a cambios topográficos, y generando un mayor grado de compromiso con la tarea realizada.

A lo largo de las siguientes páginas, se relatan las etapas clave de este proyecto, los desafíos tecnológicos y metodológicos que enfrentó el equipo desarrollador, y los aprendizajes que surgieron de la experiencia. Asimismo, se reflexiona sobre las potenciales aplicaciones de esta tecnología en contextos más amplios, como la medicina, la industria, la exploración espacial o la formación profesional.

Este libro no solo pretende documentar un desarrollo técnico, sino también abrir una conversación sobre las posibilidades transformadoras de la inmersión y la telepresencia. En un mundo donde las fronteras entre lo físico y lo virtual son cada vez más difusas, experiencias como la que aquí se presenta demuestran que la tecnología puede y debe ser utilizada para mejorar la relación entre el ser humano y su entorno, incluso cuando ese entorno esté a kilómetros de distancia.



CAPÍTULO I

**Relevancia de Hoy:
Explorando Temas y
Motivos que Transforma**

Breve introducción a la lectura del libro

El presente libro surge como un espacio de reflexión y divulgación sobre el desarrollo de un proyecto que, aunque originalmente formulado como una tesis de grado, trascendió ese formato académico para convertirse en una experiencia formativa y profundamente humana. A través de estas páginas, se busca compartir no solo los resultados obtenidos, sino también los desafíos, descubrimientos y aprendizajes que marcaron el camino hacia la creación de un emulador de conducción vehicular a escala, basado en tecnologías inmersivas y telepresencia.

Lejos de limitarse a la descripción técnica de un prototipo, este libro quiere dialogar con estudiantes, docentes, investigadores y cualquier lector interesado en la forma en que la tecnología puede modificar la percepción del entorno y extender los límites del cuerpo humano. El desarrollo de este sistema no fue una simple hazaña de ingeniería: fue una oportunidad para explorar cómo la sensación de “estar presente” en un entorno remoto puede cambiar la forma en que entendemos el espacio, el riesgo, la interacción y, sobre todo, la experiencia del usuario.



¿Por qué este tema es relevante hoy?

Vivimos en una época en la que la frontera entre lo real y lo virtual se vuelve cada vez más difusa. Tecnologías como la realidad virtual, la realidad aumentada, la inteligencia artificial y los dispositivos hápticos están transformando de manera acelerada la forma en que interactuamos con el mundo. La pandemia global de COVID-19 acentuó esta transición: el trabajo remoto, la educación en línea y la automatización de tareas críticas demostraron que la distancia física no siempre implica desconexión funcional.

En este contexto, la telepresencia y la inmersión no son simples tendencias tecnológicas, sino respuestas necesarias a problemáticas concretas. Desde operaciones quirúrgicas a distancia hasta rescates en entornos peligrosos, la capacidad de operar remotamente con un alto grado de realismo puede salvar vidas, optimizar recursos y ampliar las capacidades humanas.

Este libro se escribe desde esa urgencia contemporánea: explorar las posibilidades que ofrece la conjunción de la telepresencia y la inmersión mediante un enfoque práctico y experimental. El prototipo desarrollado se convierte así en un laboratorio viviente donde estas tecnologías dejan de ser conceptos abstractos para convertirse en una experiencia tangible y transferible.



Trabajos relacionados y motivación del proyecto

El diseño y ejecución de este proyecto se nutrió de una revisión profunda de trabajos previos que han abordado la relación entre los videojuegos, la inmersión, la telepresencia y el desarrollo de sistemas remotos. Entre los referentes más destacados se encuentra el trabajo de McMahan (2003), quien plantea criterios de diseño para evaluar el grado de inmersión y presencia en videojuegos a partir de la experiencia sensorial y la percepción del jugador. También fue fundamental el enfoque de Nuño Ortega & Basañez Villaluenga (2004), al definir la telepresencia como la sensación de estar físicamente presente en un entorno distante a través de la tecnología.

En el ámbito de la retroalimentación háptica y la percepción multisensorial, el aporte de Mihelj & Podobnik (2012) resultó clave para comprender cómo los dispositivos hápticos pueden enriquecer la interacción al reducir la dependencia de la visión y generar respuestas emocionales más intensas. Estos conceptos fueron esenciales para el diseño del chaleco vibro táctil del prototipo, uno de los elementos diferenciales del sistema.

Además, se revisaron trabajos que integran WiFi como medio de comunicación para el control de vehículos a escala, destacando las ventajas de esta tecnología frente a otras como Zigbee o Bluetooth. Se analizaron diversos prototipos previos enfocados en la conducción remota y la transmisión de datos en tiempo real, muchos de los cuales sentaron las bases para las decisiones técnicas adoptadas en el presente proyecto.

La motivación, sin embargo, no fue solamente técnica. El punto de partida fue una inquietud profundamente humana: ¿qué tan real puede sentirse algo que no está físicamente presente? ¿Podemos realmente "estar" en otro lugar sin movernos del sitio? Esta pregunta impulsó cada etapa del proceso y guió las decisiones hacia un objetivo claro: diseñar un sistema que no solo funcione, sino que se sienta.

Uno de los antecedentes directos fue el trabajo realizado por Aguirre (2018) en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, donde se desarrolló un sistema de conducción vehicular a escala



controlado por WiFi, centrado en la transferencia de dinámicas como velocidad, ángulo de inclinación, vibración y calidad de señal. Esta propuesta aportó un marco valioso para comprender cómo se puede traducir el comportamiento físico de un vehículo en datos comprensibles y accesibles para el usuario en tiempo real.

Sin embargo, uno de los desafíos más estimulantes del proyecto fue preguntarnos: ¿cómo lograr que el usuario no solo vea, sino que también sienta el entorno? Esta inquietud nos llevó a revisar experiencias con chalecos hápticos y tecnologías de estimulación vibrotáctil. Un referente interesante en este campo fue el trabajo de Bodenhamer (2012), quien, junto a un grupo de estudiantes, diseñó un

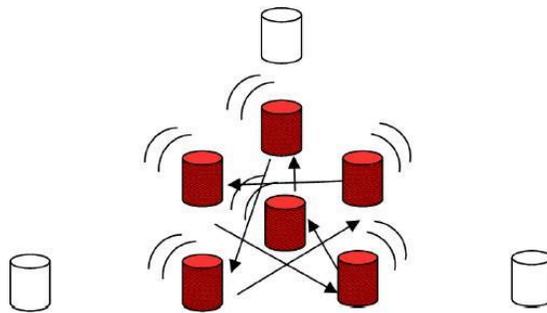
chaleco háptico con fines militares que simulaba condiciones de combate, permitiendo al usuario experimentar de forma sensorial situaciones como disparos o explosiones. Aunque el enfoque era otro, los principios de interacción sensorial eran altamente aplicables a nuestra propuesta.

Más alineado con nuestro objetivo estuvo el proyecto de Castromonte y Sánchez (2016), quienes desarrollaron un chaleco háptico que respondía a estímulos como velocidad, impacto y ambiente. Mediante motores colocados estratégicamente en el torso del usuario, lograron crear sensaciones realistas que simulaban desde el recorrido del viento hasta el golpeteo de la lluvia. Este enfoque no solo fue clave para el diseño del sistema sensorial de nuestro prototipo, sino que además brindó criterios técnicos precisos para construir una experiencia inmersiva coherente con las acciones del conductor.



Estos trabajos, junto con nuestra propia experimentación, nos llevaron a comprender que el verdadero valor de la tecnología inmersiva no reside solo en su capacidad de representar la realidad, sino en cómo esta representación es vivida por el cuerpo del usuario. Así, el proyecto que aquí se narra, además de integrar sistemas de comunicación, sensores, y gadgets propios del mundo del gaming y la simulación, propone una reflexión sobre los límites entre presencia física y presencia sentida. En ese cruce, la tecnología se convierte en puente, y la experiencia del usuario en el verdadero centro del diseño.

Ilustración 1 Motores activados para el patrón de lluvia.



Nota. Tomado de *Desarrollo de una interfaz háptica con patrones de estímulos vibrotáctiles*, Castromonte P. & Sanchez A., 2016, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.

CAPÍTULO II

**Fundamentos del
Proyecto: Explorando la
Telepresencia, Inmersión
y la Tecnología Háptica**

Fundamentos del Proyecto

El camino hacia la creación de un sistema de conducción vehicular a escala con componentes inmersivos y de telepresencia no comienza con la construcción de hardware o el diseño de una interfaz. Comienza con una comprensión profunda de los conceptos que lo sostienen. En esta sección se exponen de forma clara y accesible las ideas clave detrás de este tipo de tecnologías, su origen y su aplicación actual en diferentes contextos. Lejos de ser un glosario técnico, esta parte busca brindar al lector un marco conceptual para apreciar, con mayor profundidad, el sentido y la proyección de los resultados alcanzados en el proyecto.

¿Qué es la telepresencia?

La telepresencia es la capacidad tecnológica de una persona para experimentar, en tiempo real y a distancia, un entorno diferente al que habita físicamente. No se trata solo de ver o escuchar lo que ocurre en otro lugar, como lo permitiría una videollamada, sino de tener la sensación de *estar* realmente allí. Esta idea implica la integración de múltiples canales sensoriales —visión, audición, tacto e incluso movimiento— para reconstruir una experiencia espacial coherente en un entorno remoto.

En sectores como la medicina, la industria o la exploración espacial, la telepresencia ha permitido realizar intervenciones críticas sin exponer al operador al peligro directo. Pero también ha tenido un crecimiento significativo en el ámbito educativo y formativo, al permitir simular condiciones reales sin los riesgos ni costos que estas implicarían en entornos físicos.

En el proyecto desarrollado, la telepresencia es el eje que articula la relación entre el conductor y el vehículo a escala. A través de cámaras, sensores y dispositivos hápticos, se busca que el usuario no solo controle el vehículo remotamente, sino que *sienta* el entorno que recorre, como si estuviera físicamente dentro de él.

¿Qué es la inmersión?

La inmersión es el grado en el que una persona se involucra y se siente absorbida por una experiencia virtual o mediada tecnológicamente. En contextos de simulación o realidad virtual, la inmersión se traduce en la percepción de estar dentro de otro mundo, con reglas, estímulos y dinámicas propias. Cuanto más inmersiva es una experiencia, mayor es la sensación de presencia del usuario.

Esta sensación no es solo visual o auditiva. La inmersión también involucra lo corporal: cómo se siente el entorno, cómo responde a nuestras acciones, y cómo se sincroniza con nuestras expectativas sensoriales. En este sentido, la inmersión va de la mano de la tecnología háptica, que permite cerrar el ciclo entre lo que se ve, lo que se hace y lo que se siente.

En el proyecto, la inmersión fue pensada como una forma de ampliar la experiencia del usuario. El objetivo no era únicamente permitir el control de un vehículo, sino lograr que ese control esté acompañado de sensaciones físicas coherentes, como las vibraciones por velocidad o la percepción de impactos, tal como ocurriría en una conducción real.

Tecnología háptica: sentir a través de la máquina

La tecnología háptica hace posible que los usuarios experimenten sensaciones táctiles o de fuerza mediante dispositivos mecánicos o electrónicos. Desde los controles de videojuegos que vibran ante un golpe virtual, hasta guantes o chalecos capaces de simular presión, textura o temperatura, la tecnología háptica ha evolucionado rápidamente en las últimas décadas.

El valor de esta tecnología no solo reside en su capacidad para enriquecer la experiencia sensorial, sino en su potencial para mejorar el aprendizaje, aumentar la seguridad o facilitar tareas complejas en entornos remotos. En el contexto del presente proyecto, se incorporó un sistema háptico basado en vibraciones localizadas en el torso del usuario, inspirándose en trabajos previos como el de Castromonte y Sánchez (2016), quienes demostraron que es posible recrear

diferentes estímulos ambientales —velocidad, impactos o lluvia— mediante patrones de vibración cuidadosamente programados en un chaleco.

Esta incorporación permitió crear un vínculo más profundo entre el usuario y el entorno simulado, logrando una retroalimentación física que refuerza la experiencia de conducción remota.

Antecedentes del uso de estas tecnologías

El origen de las tecnologías que hoy consideramos innovadoras —como la telepresencia, la inmersión o la tecnología háptica— tiene raíces profundas que se remontan a mediados del siglo XX, cuando surgieron los primeros intentos de extender la acción humana más allá de su entorno inmediato.

De la industria nuclear a la conducción remota

La telemanipulación nació como una necesidad en la industria nuclear. En 1947, Raymond Goertz lideró investigaciones en el Argonne National Laboratory (EE.UU.) para crear un manipulador que permitiera a los operadores interactuar con elementos radioactivos sin riesgo directo. De estos trabajos surgió, en 1948, el M1: el primer manipulador teleoperado mecánico, antecesor de los actuales sistemas maestro-esclavo. Estos dispositivos permiten que el operador maneje un manipulador “esclavo” mediante los movimientos de un manipulador “maestro”, replicando sus acciones con precisión.

En 1954 se presentó el E1, el primer sistema maestro-esclavo con accionamiento eléctrico y servocontrol, capaz de reproducir movimientos de forma más fluida y precisa. Con el tiempo, estos desarrollos se diversificaron hacia nuevos campos como la exploración submarina y espacial. Durante las décadas de 1960 y 1970, se incorporaron cámaras y sensores para ampliar la percepción del operador, naciendo así las primeras formas de telepresencia, es decir, la sensación de estar presente en un entorno remoto gracias a la combinación de estímulos visuales y de control (Nuño Ortega & Basañez Villaluenga, 2004).

La visión, el control y la robótica: nuevas fronteras

El avance de la informática, la robótica y las técnicas de control potenció exponencialmente las posibilidades de la teleoperación. Así surgieron sistemas cada vez más autónomos e inteligentes, capaces de operar en entornos no estructurados, donde la presencia humana no era necesaria pero sí su supervisión remota.

Uno de los desarrollos más notables fue el de los sistemas de control compartido humano-robot. Por ejemplo, el trabajo de Kofman, Wu, Luu y Verma (2005) propuso un robot manipulado mediante visión artificial que permitía a un operador humano transmitir movimientos tridimensionales de la mano y el brazo a un robot con seis grados de libertad. Para lograr una comunicación efectiva entre el humano y la máquina se desarrollaron interfaces específicas, que también proporcionaban retroalimentación sobre el entorno y la posición del robot, mejorando así la precisión en tareas complejas como la manipulación de objetos.

Hacia la respuesta háptica y la inmersión multisensorial

A medida que la teleoperación se hacía más sofisticada, se integraron sistemas que permitían no solo ver o controlar a distancia, sino también *sentir*. Así nació la teleoperación bilateral, basada en la retroalimentación háptica: dispositivos que permiten que el operador sienta fuerzas y texturas provenientes del entorno remoto, lo que refuerza la experiencia sensorial.

Algunos desarrollos comerciales como el chaleco **KOR-FX** demostraron que era posible convertir señales de sonido en vibraciones sobre el cuerpo del usuario, simulando sensaciones como explosiones o impactos. Otras innovaciones como la **TactaVest** incluyeron múltiples actuadores para generar sensaciones de deslizamiento e impacto, aumentando la inmersión en videojuegos o simulaciones. En el mismo camino, los guantes **Gloveone** permitieron identificar forma y peso de objetos virtuales mediante sensaciones táctiles (Carrión, 2017).

Estos antecedentes muestran que la tecnología háptica no solo se limita al entretenimiento: tiene el potencial de mejorar los procesos de aprendizaje, entrenamiento y toma de decisiones en contextos remotos o simulados.

La pandemia como catalizador tecnológico

La pandemia de COVID-19 representó un punto de inflexión. La necesidad de reducir el contacto físico convirtió a los robots teleoperados en aliados indispensables. En hospitales de Asia y Europa, se utilizaron robots para interactuar con pacientes, desinfectar habitaciones, entregar medicamentos o recolectar muestras sin que el personal médico se expusiera a riesgos.

En espacios públicos, robots móviles desinfectaron aceras y transmitieron mensajes preventivos sobre el virus. Empresas como **Phantom Auto** desarrollaron plataformas para la teleoperación de vehículos autónomos que, controlados por humanos desde centros remotos, entregaban paquetes puerta a puerta, minimizando la exposición al virus (Velázquez, 2020; Cornejo, Vargas & Cornejo Aguilar, 2020).

Estas experiencias evidencian el valor estratégico de la telepresencia y la teleoperación no solo en sectores especializados, sino en la vida cotidiana de las personas.

Inspiración directa para este proyecto

Finalmente, los trabajos de Aguirre (2018), Bodenhamer (2012) y Castromonte & Sánchez (2016) proporcionaron bases técnicas y conceptuales directas para este proyecto. Aguirre demostró que es posible construir vehículos a escala con conexión WiFi y monitoreo en tiempo real. Bodenhamer aportó ideas sobre retroalimentación táctil en contextos de simulación militar, y Castromonte & Sánchez propusieron un chaleco inmersivo con actuadores hápticos que simulan estímulos ambientales como velocidad o lluvia, elementos adaptados en nuestro sistema de conducción remota.

Así, este proyecto se nutre de décadas de avances en ingeniería, ciencia y creatividad humana, al tiempo que propone una aplicación didáctica, segura y reflexiva para estas tecnologías.



CAPÍTULO III

**Del Concepto a la
Realidad: Diseño y
Componentes del
Prototipo**

Diseño del Prototipo

El prototipo de emulación vehicular desarrollado en este proyecto busca ofrecer una experiencia inmersiva de conducción a escala mediante la integración de múltiples tecnologías de control, comunicación y sonorización. Este sistema ha sido pensado para simular el entorno real de un vehículo, permitiendo el manejo a distancia mediante una estación de control que comunica en tiempo real los movimientos y señales del automóvil. A continuación, se describe de manera sencilla el funcionamiento del sistema, así como los componentes clave que lo conforman.

Descripción general del sistema

El sistema funciona de la siguiente manera: un vehículo a escala se controla remotamente desde una estación de conducción gracias a una conexión inalámbrica. Esta conexión permite enviar órdenes (como girar, avanzar o frenar) y también recibir información visual y sensorial en tiempo real. El conductor interactúa con una interfaz física y visual (por ejemplo, una pantalla conectada a una cámara en el vehículo), mientras que el vehículo responde a los movimientos ejecutados desde la estación gracias a sus componentes electrónicos.

En otras palabras, el usuario tiene la sensación de estar conduciendo un vehículo real, pero en miniatura, a través de una tecnología que mezcla robótica, redes inalámbricas, sensores y retroalimentación táctil. Este tipo de experiencias se encamina a nuevos enfoques de aprendizaje, simulación y control vehicular sin necesidad de exponer a los estudiantes o usuarios a riesgos reales.

Componentes clave

Para construir este prototipo se utilizaron diversos componentes electrónicos, cada uno con una función específica dentro del sistema:

- **Microcontrolador ESP8266:** es el cerebro del vehículo. Se encarga de recibir las órdenes desde el punto de control y traducirlas en acciones como moverse o girar. También facilita la comunicación WiFi.

Ilustración 2 Modulo ESP8266.



Nota. Tomado de *Encendido y apagado de un Foco con atenuación desde cayenne y un módulo ESP 8266*, por Játiva J. & Morales J., 2018, Universidad Politécnica Salesiana.

- **Router inalámbrico TP-LINK:** permite que el microcontrolador del vehículo se conecte a internet o a una red local, lo que posibilita el control remoto. Gracias a su doble banda, se asegura una transmisión de datos rápida y estable.

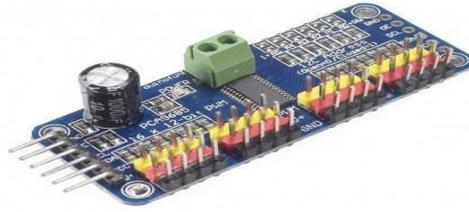
Ilustración 3 Router TP-LINK Arche C60 AC1350.



Nota. Tomado de *Archer C60, User Guide*, TP-LINK, 2016, TP-LINK, ([https://static.tp-link.com/res/down/doc/Archer_C60\(EU\)_V1_UG.pdf](https://static.tp-link.com/res/down/doc/Archer_C60(EU)_V1_UG.pdf)).

- **Controlador PWM PCA9685:** permite controlar varios motores o servos a la vez, regulando la intensidad de las señales eléctricas para definir movimientos suaves y precisos en el vehículo.

Ilustración 4 Controlador PWM PCA9685.

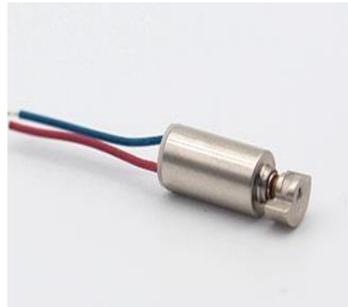


Nota. Tomado de *Diseño y simulación de técnicas de modulación PWM natural para el control de motores trifásicos*, Rojas C., 2006, Universidad de Pamplona.

- **Módulo Puente H L298N:** controla los motores del vehículo, permitiendo tanto el cambio de dirección como el ajuste de velocidad a través de señales PWM.
- **Módulo Servo de Dirección:** actúa sobre el eje delantero del vehículo, girando las ruedas a la izquierda o derecha según las órdenes enviadas desde el sistema de control.
- **Sensor Giroscópico MPU-6050:** mide la inclinación y movimientos del vehículo. Es útil para detectar cambios de dirección o velocidad angular, aportando realismo y precisión a la conducción.
- **Encoder Infrarrojo FC-03:** detecta el desplazamiento del vehículo y genera señales digitales que indican la distancia recorrida, útil para simular el kilometraje o analizar la trayectoria.
- **Teléfono móvil Huawei Honor 8:** se utiliza como cámara y transmisor de video en tiempo real. Va instalado en el vehículo, permitiendo al usuario ver desde la perspectiva del conductor, como si estuviera dentro del auto.
- **Actuadores vibrotáctiles:** se colocan en la estación de control para que el conductor sienta vibraciones que simulan texturas, baches u otras condiciones del camino, mejorando la inmersión.

- **Motores de Vibración Excéntrica:** también conocidos como *Eccentric Rotating Mass* (ERM), constituyen uno de los tipos de actuadores hápticos más utilizados actualmente. Estos dispositivos contienen una masa descentrada que, al girar, genera una fuerza centrípeta. Esta variación de presión se traduce en una vibración lateral que puede ser percibida con facilidad. Su funcionamiento se encuentra sustentado en la conversión de la corriente eléctrica en presión mecánica, operando como motores eléctricos de corriente continua (California, Estados Unidos Patente nº 8.791.799 B2, 2014).
- El voltaje nominal de estos motores es de 3V y su velocidad puede superar las 12.000 revoluciones por minuto (rpm). Esta eficiencia y simplicidad estructural los convierte en una opción rentable frente a otros actuadores de resonancia lineal. De hecho, alrededor del 95% de los teléfonos móviles disponibles en el mercado integran motores ERM para proporcionar retroalimentación háptica.

Ilustración 5 Motor de Vibración Excéntrica



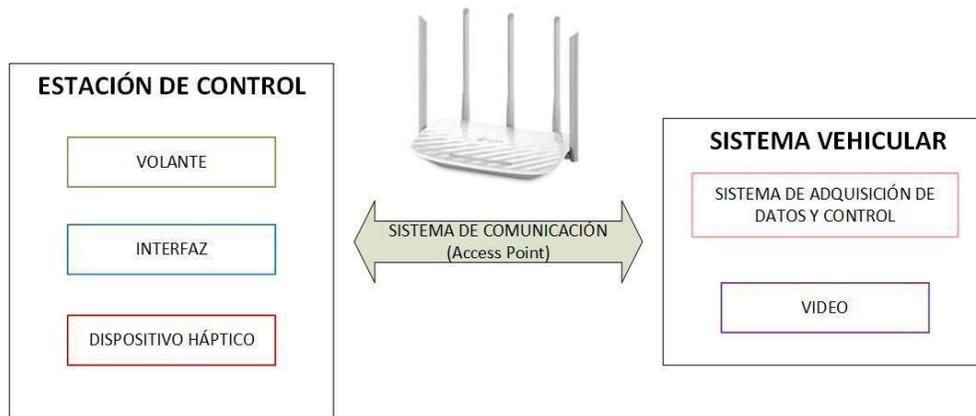
Nota. Tomado de *Eccentric rotating mass actuator optimization for haptic effects*, por Lacroix R., Greenish M. & Ramsay B., 2014, California, Estados Unidos.

Cómo se conectan y para qué sirve cada parte

El diseño del sistema se basa en una arquitectura modular donde cada componente cumple un rol específico, pero se interconecta armónicamente para

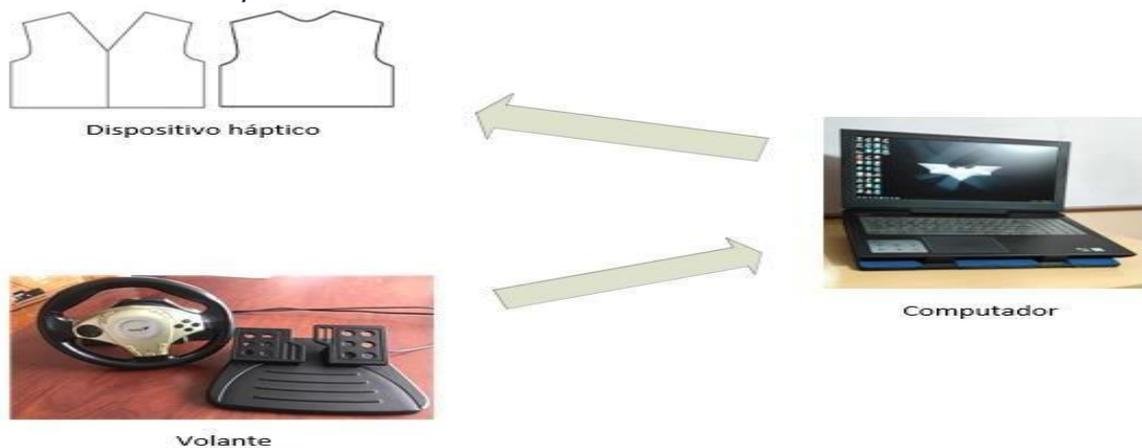
ofrecer una experiencia integrada. A continuación, se resume cómo se conectan entre sí:

Ilustración 6 Diagrama de bloques general



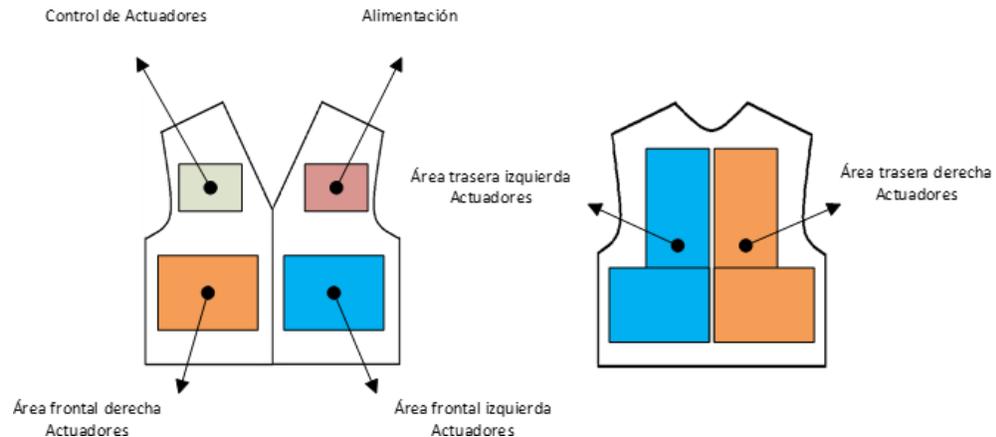
- El **microcontrolador ESP8266** se conecta al **router WiFi**, estableciendo un puente entre el vehículo y la estación de conducción.
- Desde la estación, el usuario envía comandos que llegan al ESP8266, el cual activa el **controlador PWM** para ajustar el movimiento de los **servos** y **motores** controlados por el **puente H L298N**.
- El **módulo servo** se encarga de la dirección, mientras que los **motores DC** gestionan el desplazamiento. Estos movimientos se registran con ayuda del **encoder infrarrojo**.

Ilustración 7 Esquema estación de control.



- El **giroscopio MPU-6050** proporciona datos sobre orientación e inclinación del vehículo. Esta información puede enviarse a la estación de control o usarse para ajustes automáticos.

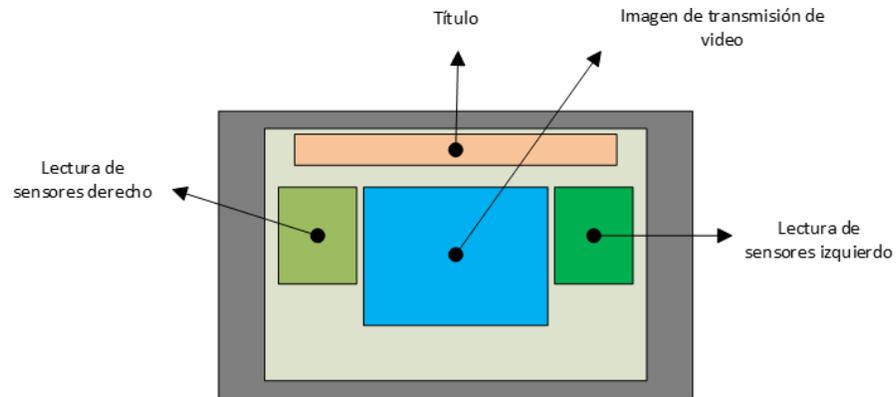
Ilustración 8 Esquema chaleco con sus componentes electrónicos.



- El **teléfono móvil** transmite el video en tiempo real al conductor, simulando la vista frontal desde el auto. Este elemento resulta clave para la experiencia de inmersión.
- Finalmente, los **actuadores vibrotáctiles**, integrados en la estación de control, responden a ciertos eventos captados por los sensores del vehículo, generando sensaciones físicas que complementan la conducción virtual.

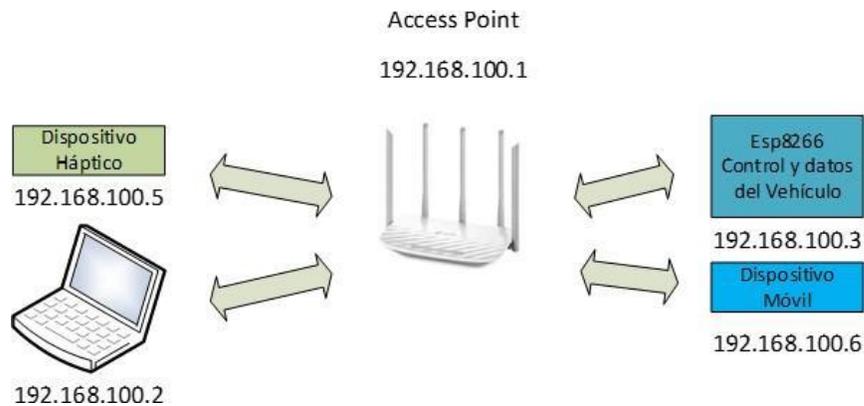
Esta integración permite emular condiciones de conducción reales, siendo una herramienta potente tanto para el aprendizaje técnico como para la exploración de tecnologías emergentes aplicadas a la educación, la ingeniería y la interacción humano-máquina.

Ilustración 9 Esquema interfaz.



El diseño del prototipo no solo representa un avance en el uso de tecnologías de bajo costo para simulación vehicular, sino que también constituye una herramienta educativa poderosa. Este sistema promueve el aprendizaje activo y experimental en áreas como robótica, electrónica, programación, control y telecomunicaciones.

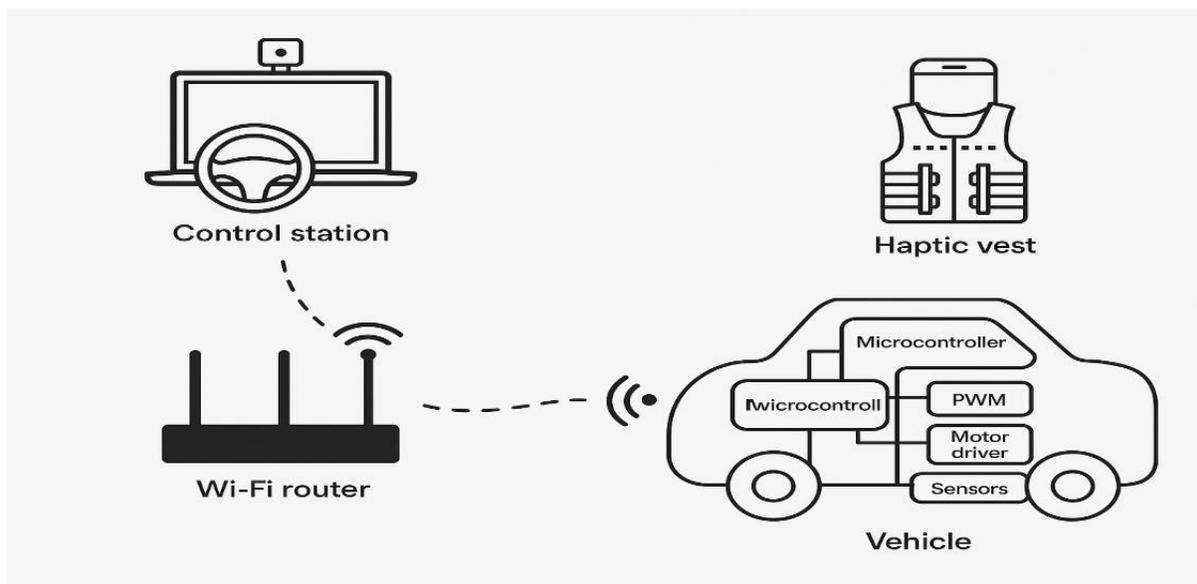
Ilustración 10 Esquema de red



Además, este tipo de soluciones puede ser adaptado para contextos pedagógicos en los que se busque enseñar conceptos complejos mediante experiencias interactivas y multisensoriales. La tecnología inmersiva aplicada a un

sistema tangible, como este vehículo a escala, facilita la apropiación de conocimientos abstractos al convertirlos en experiencias vividas.

Desde una mirada reflexiva, el prototipo articula teoría y práctica, ciencia y creatividad, abriendo nuevas posibilidades para la educación tecnológica en el siglo XXI. Más allá de su funcionalidad técnica, este vehículo es una invitación a repensar cómo enseñamos, cómo aprendemos y cómo interactuamos con el conocimiento.

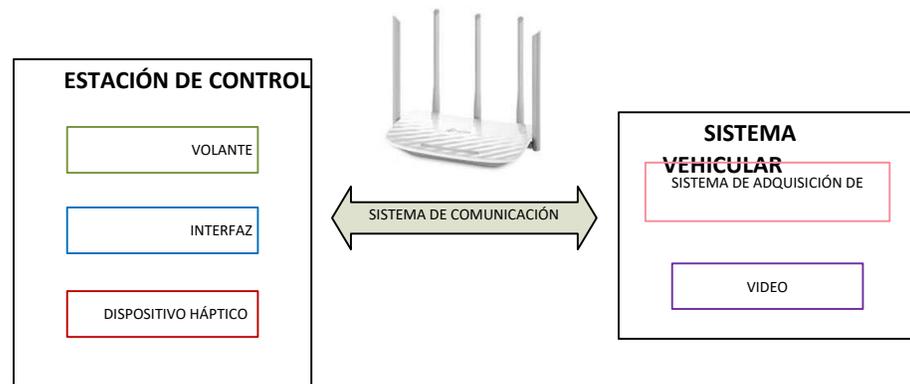


CAPÍTULO IV

**Implementación Técnica:
Donde el Código Encuentra
al Prototipo**

El prototipo de conducción se organiza en tres componentes fundamentales: la estación de control, el sistema de comunicación y el sistema vehicular. La estación de control integra el volante, la interfaz de usuario y el dispositivo háptico (chaleco). Por su parte, el sistema vehicular incorpora el subsistema de adquisición de datos y control, junto con el sistema de video. Finalmente, el sistema de comunicación actúa como nexo entre la estación de control y el sistema vehicular, permitiendo la interacción remota y sincronizada entre ambos elementos.

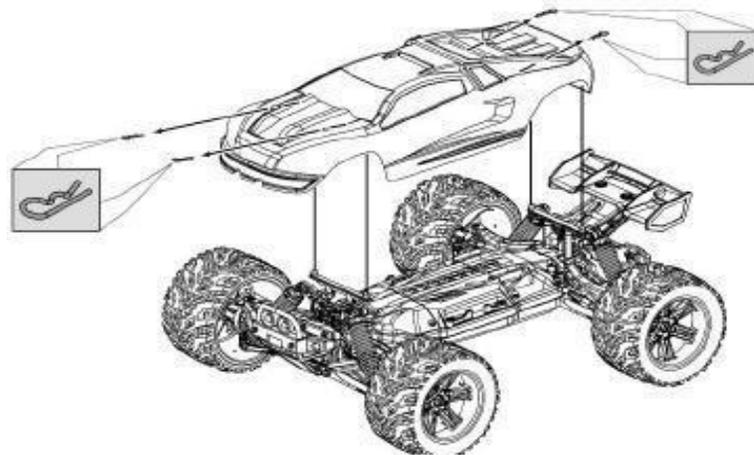
Ilustración 11 Esquema general.



Sistema Vehicular

El sistema vehicular está compuesto por un automóvil a escala 1:12, modelo Luctan S912, cuyas propiedades físicas simulan el desempeño de un vehículo real. Este modelo incorpora componentes que permiten su operación a distancia mediante control remoto, facilitando su conducción en distintos entornos y rangos de alcance (GPTOYS, 2015). La Figura 16 presenta una vista del vehículo a escala Luctan S912.

Ilustración 12 Vehículo a escala Luctan S912.



Nota. Tomado de *Luctan S912*, GPTOYS, 2015, GPTOYS, (https://g-p.hk/maual/912/s912Manual_new-connector.pdf).

Distribución Mecánica

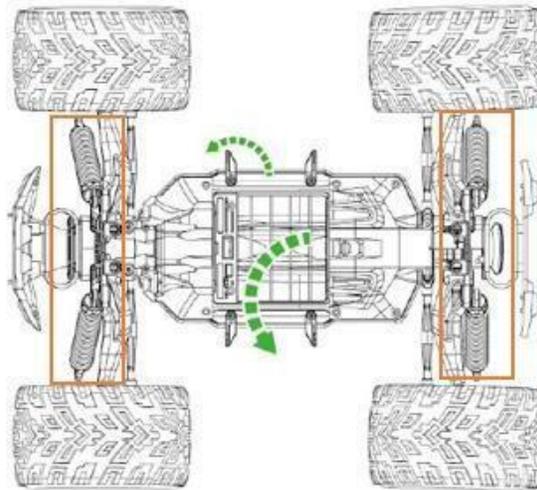
El vehículo está diseñado con un sistema de resortes independientes para cada neumático, lo que permite adaptarse a diferentes superficies y mejora la absorción de impactos. Estos resortes pueden colocarse de dos formas distintas, lo que permite ajustar el grado de elongación según las especificaciones del prototipo.

La ilustración 13 muestra el mecanismo de resortes conectado a cada neumático, además de las dos opciones disponibles para la colocación del resorte en el chasis.

Ilustración 13 Mecanismo de resortes del vehículo a escala.

En la ilustración 14 se presenta un esquema general que muestra la ubicación del sistema de resortes en cada neumático del vehículo a escala. Las partes correspondientes están destacadas y rodeadas en la parte inferior del esquema.

Ilustración 14 Ubicación de los resortes en el vehículo a escala



Nota. Tomado de *Luctan S912*, GPTOYS, 2015, GPTOYS, (https://g-p.hk/maual/912/s912Manual_new-connector.pdf).

Los neumáticos están fabricados en caucho, un material que favorece su adherencia a las superficies, evitando deslizamientos y proporcionando una gran resistencia a los impactos. Con un diámetro de 6.4 cm, permiten al vehículo alcanzar una elevación considerable respecto al suelo.

Cada neumático está fijado al chasis mediante un sistema compuesto por un perno y una tuerca, lo que facilita su extracción de manera sencilla. Las características mencionadas anteriormente contribuyen a un control estable del vehículo en distintos tipos de superficies.



En la ilustración 15 es posible visualizar el vehículo con los neumáticos instalados.

Ilustración 15 Vehículo a escala con neumáticos instalados.



Distribución Electrónica

El sistema electrónico del vehículo se divide en dos partes: la primera se encarga de controlar las acciones del vehículo, mientras que la segunda se dedica a la recolección de datos de los diversos sensores, los cuales se describirán con más detalle más adelante.

Ilustración 16 Implementación de la distribución electrónica del vehículo.



En la ilustración 16, se presentan los componentes electrónicos utilizados en el desarrollo del prototipo.

Sistema Electrónico para el Control de Acciones

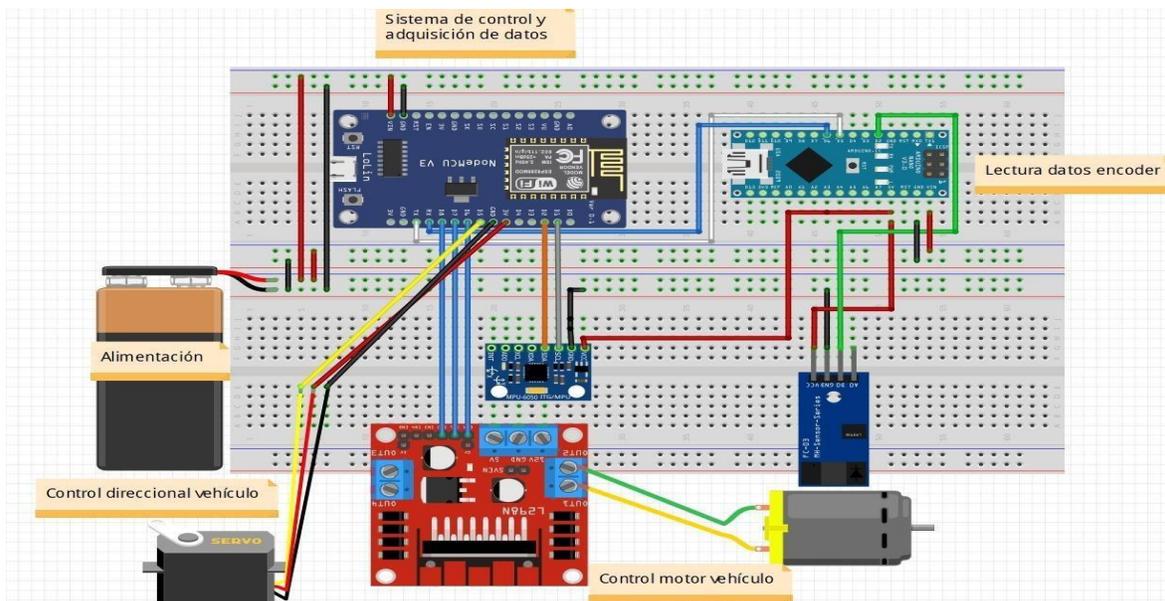
Este sistema tiene como objetivo gestionar los componentes mecánicos encargados del desplazamiento del vehículo, ejecutando funciones como el control de la dirección y la variación de velocidad.

Sistema de Recolección de Datos

Esta sección está compuesta por un conjunto de sensores que facilitan la recopilación de datos necesarios para modelar las características físicas del vehículo. Estas características abarcan desde la detección de irregularidades en la superficie hasta la evaluación de la respuesta del vehículo frente a diferentes factores.

En la ilustración 17, se presenta el esquema de la distribución total del sistema electrónico del vehículo.

Ilustración 17 Esquema distribución electrónica



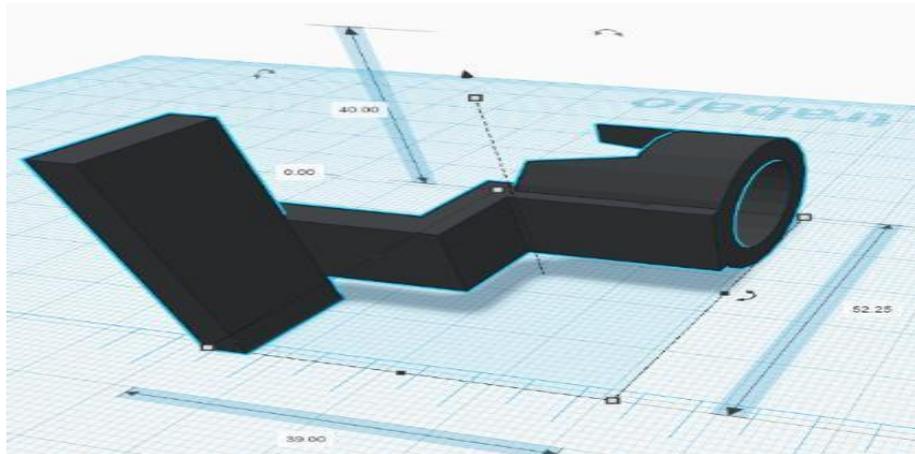
Implementación del Módulo Encoder en el Vehículo

Para integrar el módulo sin afectar la estructura ni la funcionalidad del vehículo, se diseñaron y renderizaron dos piezas mecánicas, las cuales están orientadas a realizar la lectura de la llanta trasera derecha.

Una de estas piezas fue adaptada al chasis del vehículo para servir como soporte del lector del módulo encoder. El diseño de esta pieza se realizó con el objetivo de evitar interferencias con el sistema de amortiguamiento y desplazamiento del vehículo.

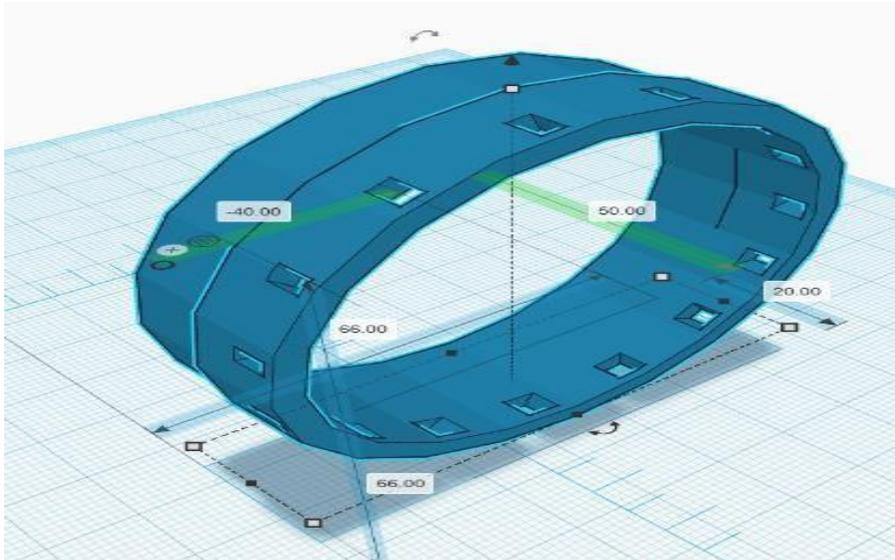
A continuación, en la ilustración 18, se presenta el diseño en 3D de la pieza mecánica del lector del encoder adaptado al módulo, con la renderización de la pieza lista para ser impresa.

Ilustración 18 Diseño en 3D del soporte del lector de encoder.



La segunda pieza fue diseñada con el objetivo de sustituir el disco convencional utilizado en la lectura de este tipo de sensores, permitiendo su acoplamiento sin alterar la estructura del neumático. Esta pieza cuenta con 16 ranuras dispuestas de manera simétrica para facilitar el paso del haz de luz. En la ilustración 19, se presenta el diseño en 3D de dicha pieza.

Ilustración 19 Diseño en 3D del disco lector.



El volante utilizado en este prototipo, originalmente diseñado para consolas de videojuegos, proporciona un nivel elevado de realismo en juegos de simulación de carreras y conducción vehicular. Sus características específicas han sido adaptadas para ser utilizadas en el control del prototipo en tareas de teleoperación, mejorando la experiencia de conducción remota.

El sistema de control está compuesto por un volante, un par de pedales y dos palancas de cambios ubicadas en la parte posterior del volante. Este diseño se inspira en los mecanismos de conducción de vehículos automáticos, lo que facilita la interacción del usuario con el prototipo de manera intuitiva y precisa.

En la ilustración 20, se presenta de manera gráfica la disposición y constitución de este sistema de control, mostrando cómo se implementará en el vehículo.

Ilustración 20 Volante y pedales a implementar.



Sistema de Comunicación

Configuración del Router

La configuración y administración del router TP-LINK es un proceso sencillo, compatible con diversos sistemas operativos como Windows, macOS, Linux y Android. Para llevar a cabo la configuración, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Realizar un reinicio (reset) del router.
2. Conectar el router al ordenador mediante un cable Ethernet.
3. Acceder a la página de configuración a través de un navegador, utilizando la ruta "<http://tplinkwifi.net>". Alternativamente, se puede obtener la dirección IP de la puerta de enlace predeterminada y colocarla directamente en el navegador, de la misma manera que con la ruta mencionada.
4. Establecer una contraseña para la administración, la cual será guardada de forma permanente para futuras sesiones.

5. En la ilustración 21, se muestra cómo configurar el nombre de la red (SSID) y la contraseña, tanto para la banda de 2.4 GHz como para la de 5 GHz. Además, se activa la opción “ocultar SSID” para evitar conexiones no deseadas.

Ilustración 21 Panel de configuración de datos de red.

Configuraciones Inalámbricas

Inalámbrico de 2.4GHz: **Habilitar la Radio Inalámbrica**

Nombre de la Red (SSID): **Ocultar SSID**

Contraseña:

Inalámbrico de 5GHz : **Habilitar la Radio Inalámbrica**

Nombre de la Red (SSID): **Ocultar SSID**

Contraseña:

TxBF,MU-MIMO: **Habilitar TxBF,MU-MIMO**

6. Para el enrutamiento de la red, en la opción **RED** se configura la dirección IP 192.168.100.1 y la máscara /29, ya que esta configuración es adecuada para soportar los 6 dispositivos que se conectarán. A continuación, la ilustración 22 muestra estos parámetros de configuración.

Ilustración 22 Panel de enrutamiento de red.



Configuración Rápida
Básico
Avanzado

Español(México) ▾
Finalizar la sesión
Reiniciar

Estado

Red

- Internet
- LAN
- IPTV

LAN ?

Dirección MAC: 0C-80-63-91-64-5E

Dirección IP:

Máscara de Subred: Personalizado ▾

Guardar

7. El siguiente paso consiste en definir el rango de direcciones IP que se asignarán a los dispositivos, en este caso, desde 192.168.100.2 hasta 192.168.100.6. Además, se debe deshabilitar el servidor DHCP para permitir la asignación manual de una IP específica a cada dispositivo.

Ilustración 23 Establecimiento de rango de direcciones IP.



8. Se guardan los cambios realizados en cada uno de los pasos anteriores y, finalmente, se verifica si la conexión se estableció correctamente. La ilustración 24 muestra la información actualizada en el panel CMD de la PC.

Ilustración 24 Panel de información del adaptador Ethernet.

```
Adaptador de Ethernet Ethernet:

Sufijo DNS específico para la conexión. . . :
Vínculo: dirección IPv6 local. . . . . : fe80::bc6b:cf95:c19a:7fd7%12
Dirección IPv4. . . . . : 192.168.100.2
Máscara de subred . . . . . : 255.255.255.248
Puerta de enlace predeterminada . . . . . : 192.168.100.1
```

Direccionamiento IP

Una vez determinado el rango de direcciones a utilizar, se asigna una dirección específica a cada uno de los elementos del prototipo. A continuación, en la tabla 1, se presenta la asignación de direcciones IP para cada uno de los dispositivos conectados a la red.

Tabla 1 Asignación de direcciones IP.

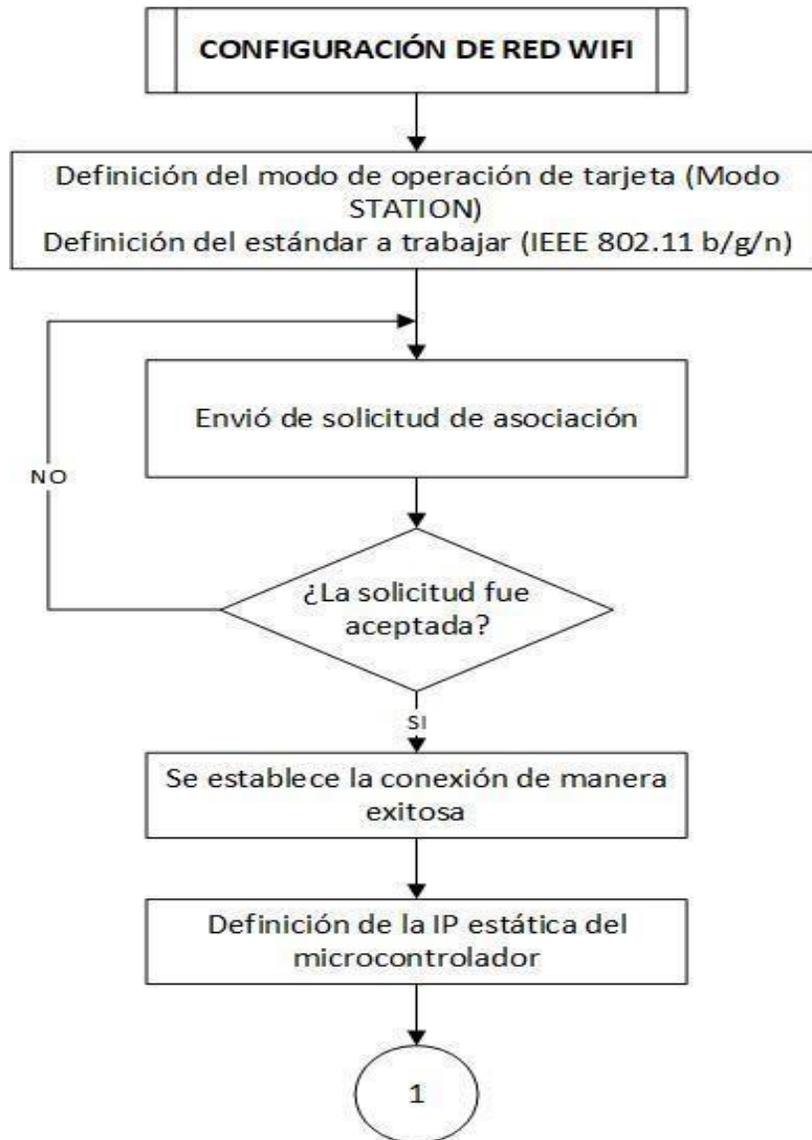
Dispositivo	Dirección IP	Banda de frecuencia	Máscara	Gateway
Computador	192.168.100.2	2.4 GHz		
ESP8266 vehículo	192.168.100.3	2.4 GHz		
ESP8266 chaleco	192.168.100.5	2.4 GHz	255.255.255.248	192.168.100.1
Dispositivo móvil	192.168.100.6	5 GHz		

Configuración WiFi en ESP8266

El microcontrolador ESP8266 utiliza la librería ESP8266Wifi.h, que, mediante su conjunto de instrucciones, permite la conexión a una red inalámbrica WiFi. El proceso de comunicación del microcontrolador se detalla en un diagrama de flujo.

A continuación, la ilustración 29 presenta el diagrama de flujo que ilustra el proceso de configuración de la red WiFi utilizada.

Ilustración 25 Diagrama de flujo para la comunicación del microcontrolador.



El primer paso consiste en establecer el modo de operación que el dispositivo llevará a cabo, el cual puede ser uno de tres modos. Para esta aplicación específica, se seleccionó el modo **STATION**, ya que solo se requiere que el microcontrolador se vincule al router.

A continuación, se define el estándar de conexión a utilizar, lo cual es un aspecto crucial para el análisis del desempeño del prototipo. El siguiente paso es

realizar el proceso de asociación y autenticación con la red a la que se desea conectar, proporcionando el nombre de la red y la contraseña. Una vez que la conexión se haya establecido exitosamente, se asigna una IP estática al dispositivo.

Protocolo UDP

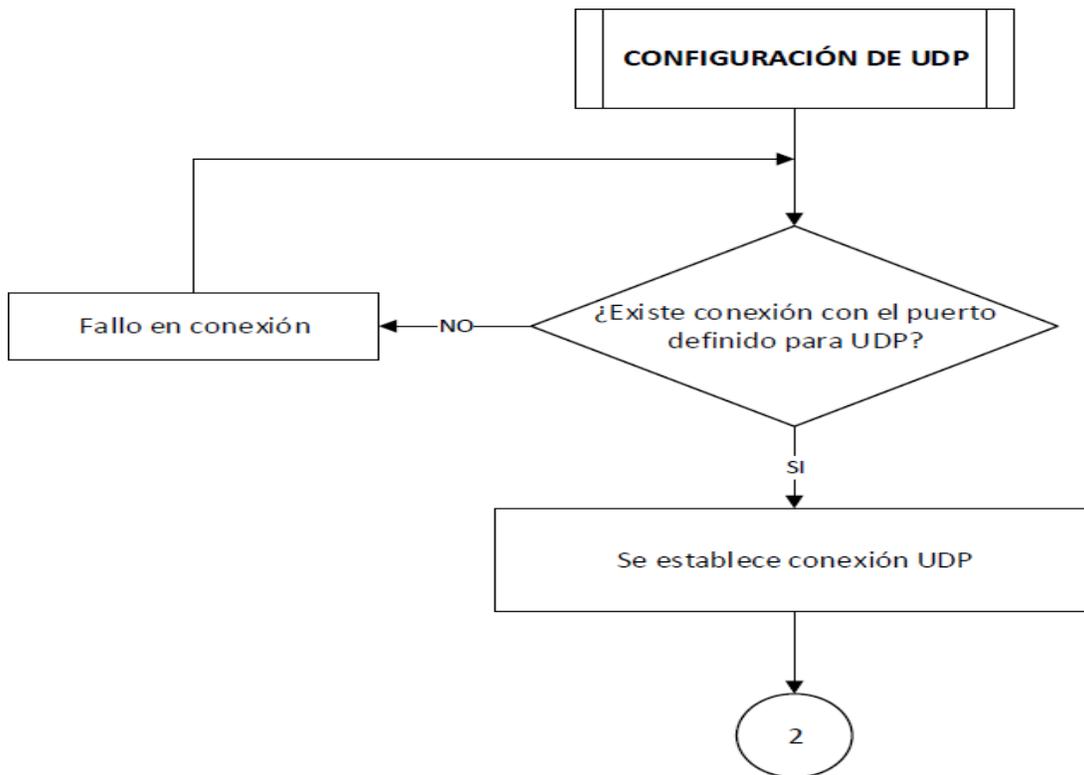
El **User Datagram Protocol (UDP)** es uno de los protocolos de la capa de transporte que ofrece un servicio no orientado a conexión, ideal para procedimientos en los cuales la monitorización en tiempo real y la pérdida de una unidad de datos no afecten negativamente la transmisión. Dado que UDP opera sin establecer conexiones previas, las sesiones no se inician antes de la transmisión de datos; cuando una aplicación tiene datos para enviar, los envía inmediatamente. Por esta razón, UDP es adecuado para aplicaciones en tiempo real, como voz y video, donde es más importante la velocidad de transmisión que garantizar la entrega completa de los datos (Stallings, 2008).

Configuración UDP en ESP8266

Para configurar el protocolo UDP en el microcontrolador ESP8266, se utiliza la librería **WiFiUDP.h**. Además, es necesario declarar un puerto local y un puerto remoto. El puerto local se emplea durante la configuración inicial del protocolo, estableciendo la conexión mediante UDP siempre que el puerto esté disponible. Si el puerto no está disponible, se producirá un fallo de conexión, y el proceso se repetirá.

El flujo de este proceso se muestra en la ilustración, que presenta el diagrama de flujo de la configuración del protocolo UDP en el microcontrolador.

Ilustración 26 Diagrama de flujo de la configuración de UDP.



Protocolo MQTT (Message Queue Telemetry Transport)

MQTT es un protocolo de tipo publicación/suscripción de nivel aplicación, diseñado para redes que no están basadas en TCP/IP. Su principal objetivo es el envío de datos en aplicaciones o dispositivos que requieren un ancho de banda mínimo. Gracias a sus características, se ha convertido en un protocolo ampliamente utilizado para la comunicación de sensores y, por lo tanto, para el Internet de las Cosas (Atmoko, Riantini, & Hasin, 2017). Para utilizar este protocolo, es necesario contar con el programa **Mosquitto Broker**.

Configuración MQTT en ESP8266

Para configurar el protocolo MQTT en el módulo ESP8266, es necesario incluir la librería **PubSubClient.h**, que proporciona un conjunto de funciones para establecer la conexión con el protocolo. Antes de realizar la conexión, se deben

llevar a cabo algunos pasos previos, como inicializar el cliente y definir la dirección IP y el puerto del servidor.

Finalmente, para completar la configuración y establecer la comunicación, se debe definir una función de retorno que se activará cuando llegue un mensaje entrante desde el servidor.

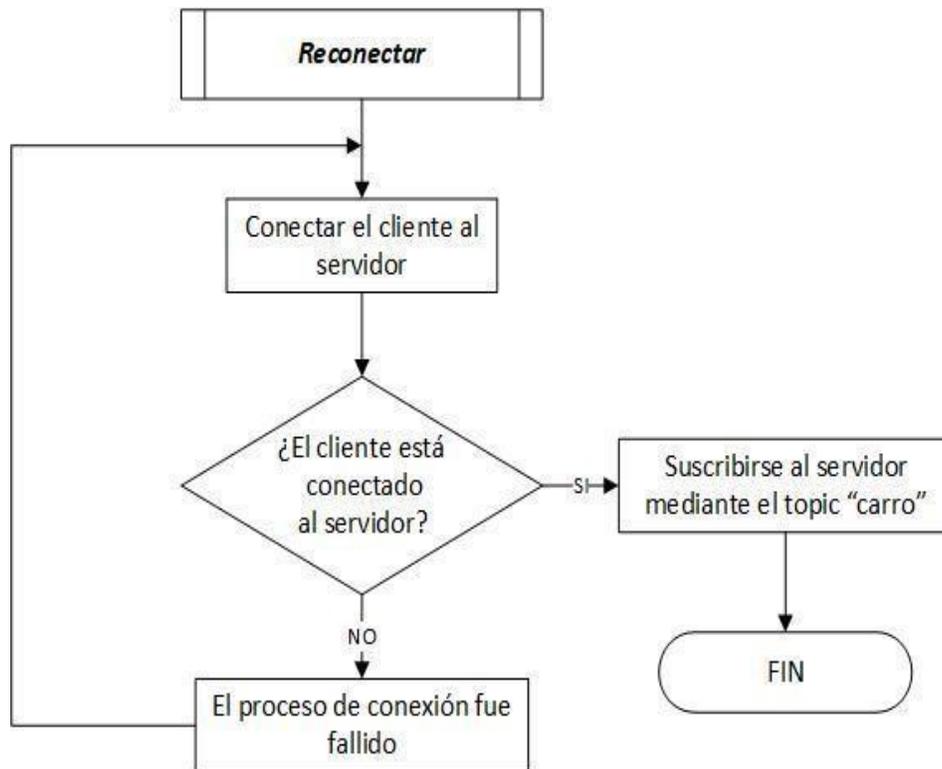
El diagrama de flujo que se presenta en la ilustración 27 ilustra de manera secuencial el proceso de configuración necesario en el microcontrolador ESP8266 para emplear el protocolo MQTT.

Ilustración 27 Diagrama de flujo de la configuración de MQTT.



Una vez que la configuración de MQTT ha sido inicializada, es necesario verificar que exista una conexión exitosa entre el cliente y el servidor. La ilustración 28 muestra de manera detallada este proceso de comprobación a través del subproceso denominado Reconectar.

Ilustración 28 Diagrama de flujo del subproceso Reconectar.



Cuando se requiere comunicación con el servidor, es importante entender que el proceso de envío de datos bajo el protocolo MQTT se denomina **publicación**, mientras que el proceso de recepción se conoce como **suscripción**. Ambos procesos están asociados a una etiqueta llamada **topic**, que permite clasificar los datos que se van a utilizar. Este proceso se detalla más a fondo en la configuración de MQTT para **Node-RED**.

Node-RED

Node-RED es una herramienta de programación visual cuyo principal objetivo es conectar dispositivos de hardware, API y servicios en línea de maneras alternativas. Una de las ventajas clave de Node-RED es que, al ser un editor de flujo, permite añadir o eliminar nodos y conectarlos entre sí para facilitar la comunicación entre ellos (Sancho, 2020).

Debido a sus características, se ha optado por utilizar Node-RED en el desarrollo de este proyecto, ya que permite la interacción entre los dispositivos que serán empleados y facilita el control y la monitorización del flujo de datos que circulan por la red. Además, hace posible la representación de esos datos a través de una interfaz gráfica.

Para facilitar su uso, a continuación, se explica de manera resumida el proceso de instalación de Node-RED en el sistema operativo Windows, así como algunas de las herramientas que se utilizaron en este proyecto.

El área de trabajo de Node-RED, que se despliega después de la instalación del programa y sus complementos, así como su inicialización, se muestra en la ilustración 29 a continuación:

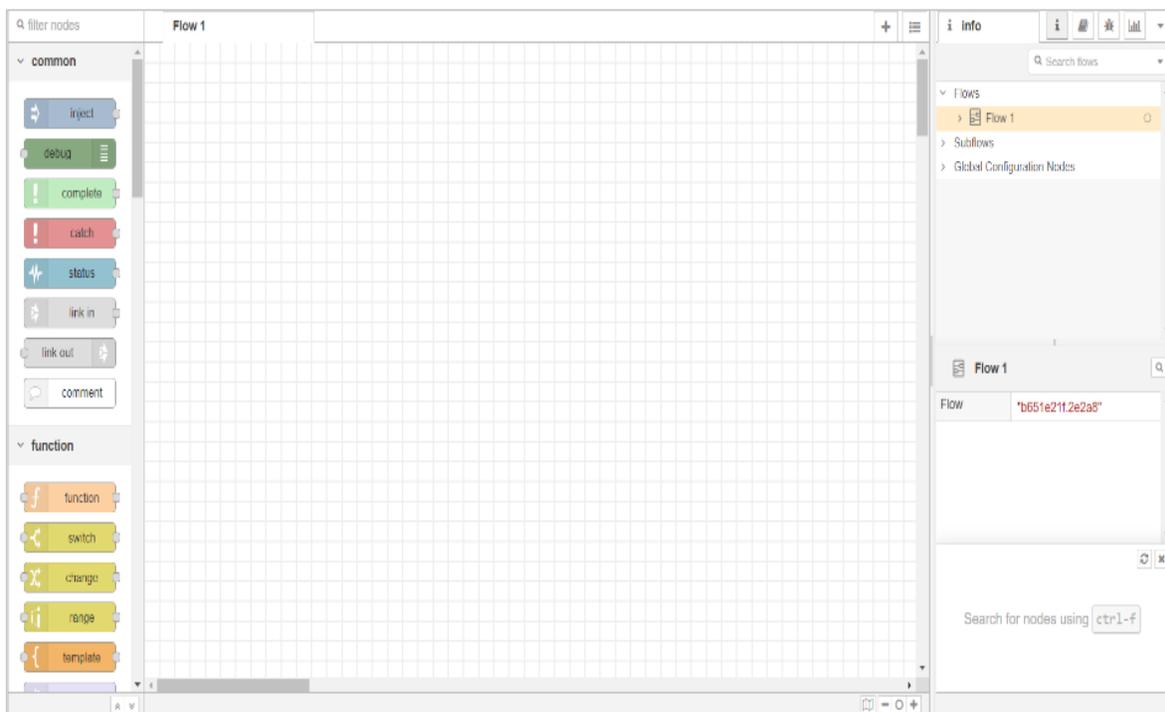


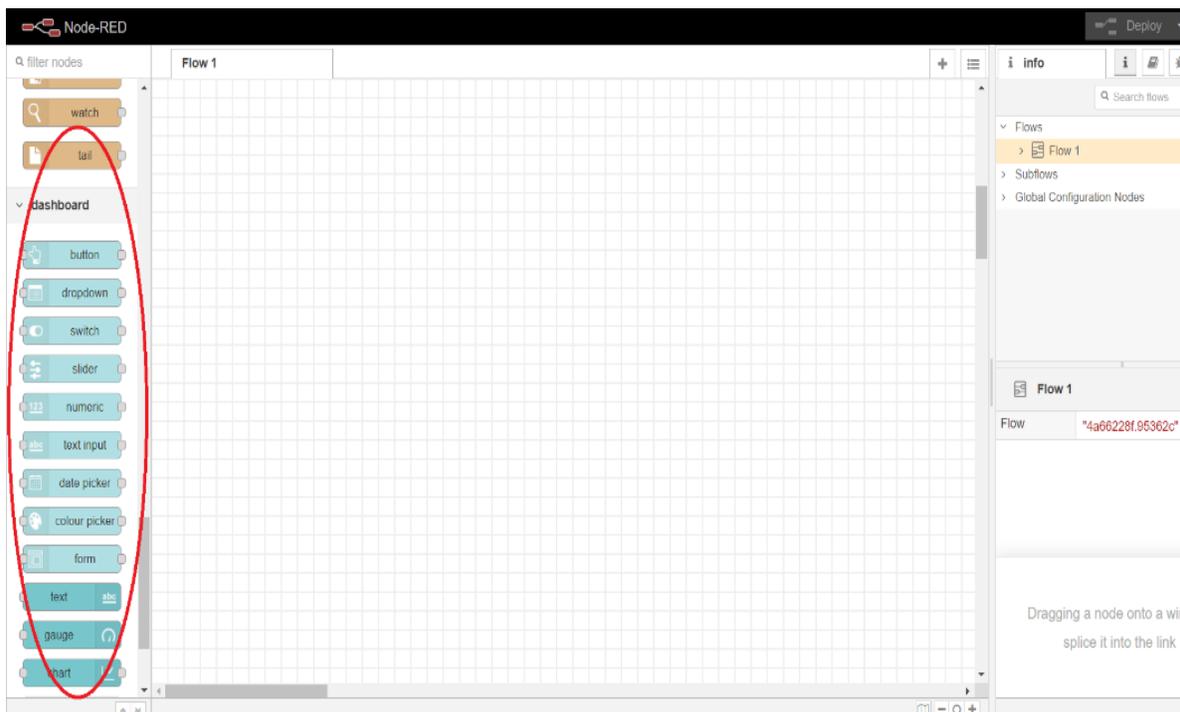
Ilustración 29 Área de trabajo de Node-RED.

Dashboard

El Dashboard es un módulo que ofrece un conjunto de nodos diseñados para crear de manera rápida un tablero de datos en vivo. Este módulo facilita la visualización y gestión de la información de forma interactiva en tiempo real.

Las herramientas adicionales que se instalan, ya sea a través del uso del Manage Palette o mediante el Command Prompt, se encuentran ubicadas en el menú derecho del área de trabajo. La Figura 34 muestra las herramientas que han sido añadidas a la instalación del módulo Dashboard.

Ilustración 30 Herramientas añadidas en la interfaz.



Nodos

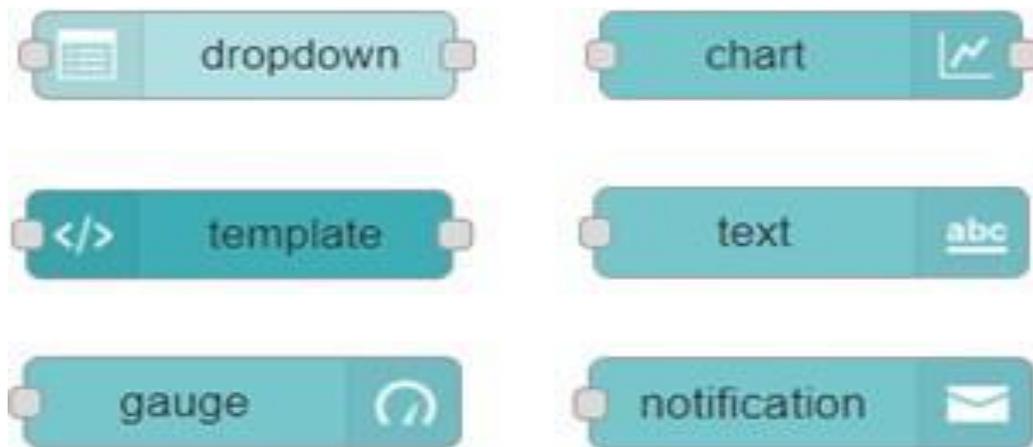
Para el diseño de la interfaz gráfica, se utilizaron diversos nodos necesarios para representar de manera visual los datos relevantes, especialmente aquellos

relacionados con la respuesta del vehículo a distintas acciones. A continuación, se presenta una breve descripción de algunos de los nodos empleados:

- **Dropdown:** Permite especificar varios pares de etiquetas y valores. Si solo se utiliza texto, el valor será el mismo que la etiqueta. En caso contrario, se puede definir un valor de salida diferente al texto.
- **Chart:** Ofrece modos de gráficos circulares, de barras y de líneas. Las etiquetas del eje X se pueden configurar utilizando una cadena de formato de fecha.
- **Template:** Facilita a los usuarios la creación de sus propios nodos personalizados mediante el uso de HTML y JavaScript.
- **Text:** Es un nodo de solo lectura, utilizado para mostrar información sin interacción directa.
- **Gauge:** Este nodo tiene cuatro modos de visualización: estándar (indicador libre), rosquilla (con un rango de 360°), brújula y onda. Además, permite definir la gama de colores tanto para los calibres estándar como para los de rosquilla.
- **Notification:** Crea alertas para el usuario, que pueden aparecer como una ventana emergente o como un cuadro de alerta descartable (Node-RED, 2020).

A continuación, la ilustración 31 muestra los nodos que fueron añadidos tras la instalación del complemento **Dashboard**.

Ilustración 31 Nodos añadidos a Node-RED.

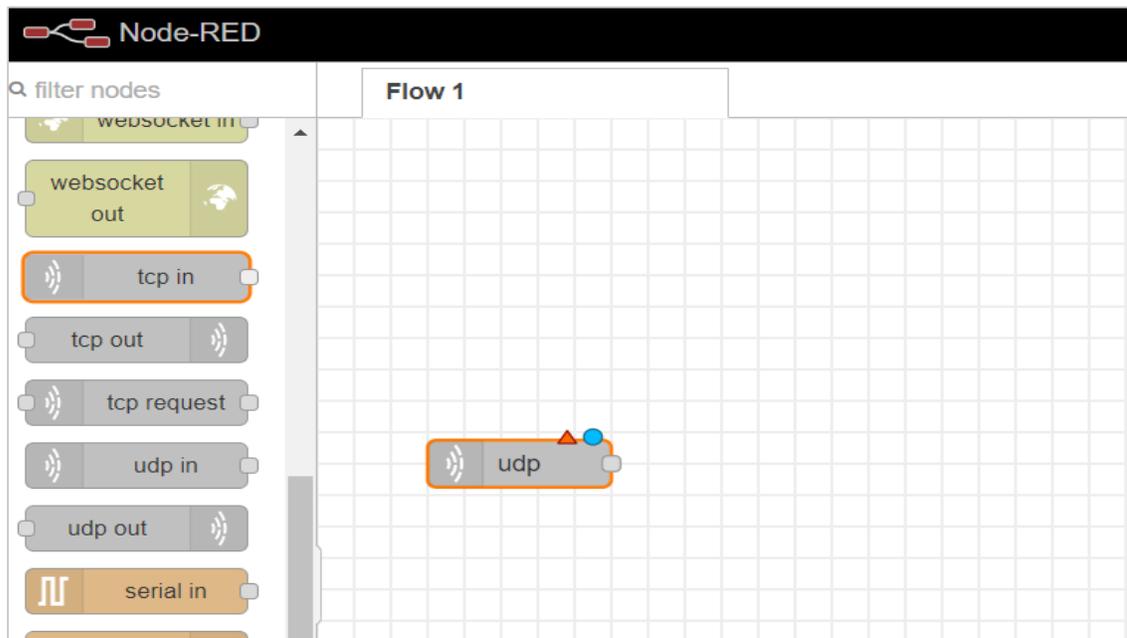


Configuración de UDP

En esta sección, se detalla el proceso de configuración del protocolo UDP dentro de la herramienta Node-RED. Node-RED utiliza los nodos UDP in y UDP out, que están dedicados a la transmisión y recepción de datos mediante este tipo de conexión.

UDP In

Para la recepción de datos, se selecciona el nodo UDP in en el menú ubicado en la parte izquierda del área de trabajo. Este nodo es utilizado para recibir paquetes UDP que provienen de otros dispositivos o sistemas. A continuación, la ilustración 32 muestra la ubicación y configuración de este nodo en el entorno de trabajo de Node-RED.

Ilustración 32 Inserción del nodo UDP in.

Una vez seleccionado y ubicado el nodo en el área de trabajo, se hace clic en el nodo para desplegar un conjunto de opciones configurables. A continuación, la Figura 37 muestra el panel de configuración correspondiente, donde se pueden ajustar los parámetros necesarios para el correcto funcionamiento del nodo UDP.

Ilustración 33 Panel de configuración.

Para el funcionamiento de la recepción, es necesario configurar tres parámetros clave en el nodo UDP In:

1. **Listen for:** Este parámetro permite definir el tipo de difusión del protocolo. Se ofrecen dos opciones: *udp messages* y *multicast messages*. En este proyecto se selecciona la opción *udp messages*, ya que facilita una conexión punto a punto entre el ordenador y el microcontrolador.
2. **On Port:** Este parámetro se encarga de establecer el puerto local que se ha configurado previamente en el microcontrolador. Este puerto está asociado a una dirección IPv4 específica.
3. **Output:** En este parámetro se define el tipo de dato que será recibido. En este caso, se ha seleccionado el tipo de dato *String*. Sin embargo, también se puede utilizar el tipo *Buffer* o un *String* codificado en Base64, dependiendo de las necesidades de la aplicación.

UDP Out

La difusión de datos a través de este protocolo es gestionada por el nodo **UDP out**, el cual se selecciona de manera similar al nodo **UDP in**. Al desplegar su configuración, se deben ajustar los siguientes parámetros:

1. **Send a:** Este parámetro se define con la opción *udp message* y el puerto remoto que se configuró previamente en el microcontrolador.
2. **Address:** Este parámetro corresponde a la dirección IP a la cual se enviará la información. En este caso, es la dirección IP del microcontrolador encargado del manejo del vehículo, así como la dirección del dispositivo háptico o chaleco.

Finalmente, es necesario seleccionar la opción *bind to random local port* y desmarcar la opción *Decode Base64 encoded payload*, tal como se muestra en la ilustración.

Ilustración 34 Panel de parámetros UDP out.

Configuración de MQTT

En Node-RED, existen dos nodos para la configuración de MQTT: *suscripción* (entrada) y *publicación* (salida). La configuración de ambos nodos es casi idéntica, ya que ambos están orientados a establecer la conexión real del cliente.

Para establecer la comunicación a través de MQTT, es necesario conocer la dirección IP del servidor Mosquitto Broker y su puerto correspondiente. En este caso, la dirección IP es la asignada al ordenador, 192.168.100.2, y el puerto utilizado es el 1883, que es el puerto predeterminado de Node-RED. Para asegurar que la comunicación se realice correctamente, es necesario configurar varios parámetros importantes:

- **Bandera de sesión limpia:** Este parámetro establece si la sesión es "limpia", lo que significa que el servidor no recordará nada sobre el cliente cuando se desconecte. Esta opción suele ser la predeterminada para los clientes MQTT.
- **Time to live (TTL):** Este parámetro se utiliza para determinar si la conexión aún está activa. El valor predeterminado para este intervalo es de 60 segundos.

- **Calidad de servicio (QoS, por sus siglas en inglés, Quality of Service):** MQTT ofrece tres niveles de QoS para garantizar la entrega del mensaje:
 - **QoS 0:** El método más rápido, menos confiable, que requiere solo un mensaje. Una vez que el cliente envía el mensaje, se elimina automáticamente de la cola de mensajes salientes.
 - **QoS 1:** Garantiza que el mensaje será entregado al menos una vez.
 - **QoS 2:** El nivel más lento, ya que requiere cuatro mensajes. Sin embargo, garantiza que el mensaje se entregará solo una vez.

MQTT

In

Los parámetros de configuración para el nodo **MQTT In** son los siguientes:

- **Server:** Se define por la IP del servidor y el puerto 1883.
- **Topic:** Establece la comunicación entre los dispositivos que utilizan el mismo "topic" o etiqueta. En este caso, la etiqueta asignada es "event".
- **QoS:** Define el nivel de calidad de servicio para garantizar la entrega del mensaje, con un rango de 0 a 2. Un valor de 0 tiene menos garantías de entrega, mientras que el valor 2 asegura la entrega más confiable.
- **Output:** Especifica el tipo de dato que se enviará, el cual puede ser *String* o *Buffer*.

La configuración de estos parámetros se muestra en la ilustración35.

Ilustración 35 Configuración de parámetros MQTT in



The screenshot shows a configuration window titled "Properties" with a gear icon on the left and three icons (gear, document, camera) on the right. The configuration is as follows:

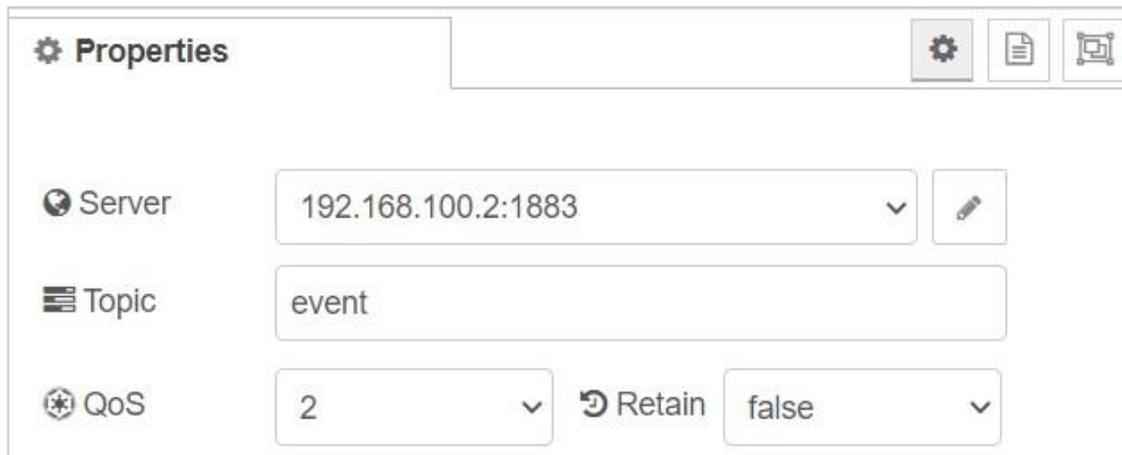
Property	Value
Server	192.168.100.2:1883
Topic	event
QoS	2
Output	auto-detect (string or buffer)

MQTT

Out

La configuración del nodo **MQTT Out** es similar a la de **MQTT In**, con la diferencia principal de que no es necesario especificar el tipo de dato que se va a transmitir. Además, se incluye la opción para determinar si el dato será conservado o no, lo cual se configura mediante las opciones *true* o *false*. Esta opción permite decidir si los mensajes deben persistir o ser descartados después de ser enviados. La configuración del nodo **MQTT Out** se ilustra en la ilustración 36.

Ilustración 36 Configuración MQTT out.



The screenshot shows a configuration window titled "Properties" with a gear icon on the left and three icons (gear, document, camera) on the right. The configuration is as follows:

Property	Value
Server	192.168.100.2:1883
Topic	event
QoS	2
Retain	false

La comunicación serial se basa en el envío de bits de información a través de una única línea de manera secuencial. Un transmisor/receptor asíncrono universal es un dispositivo de hardware capaz de transmitir bits de datos individuales de forma secuencial.

La transmisión de los datos se realiza mediante la librería **SoftwareSerial.h**, que permite la comunicación en serie con un pin digital a una velocidad de hasta 1152000 bps. Con un rango de 5 a 9 bits, la transmisión comienza con un bit **START** enviado con un nivel lógico bajo, seguido de un conjunto de bits que se transmiten uno por uno. Al finalizar la transmisión, se envía un bit **STOP** con un nivel lógico alto. Este cambio de nivel garantiza una comunicación correcta entre los dispositivos.

Una de las principales ventajas de la comunicación serial es que la transmisión de una sola línea es más económica en comparación con la transmisión paralela, que requiere múltiples líneas. Para la recepción de los datos, el receptor verifica el estado de la línea de entrada en cada pulso del reloj UART, cuya frecuencia es múltiplo de la velocidad de transmisión de los bits. Una vez que todos los bits han sido transmitidos, el contenido del registro UART queda disponible para el sistema hasta que el bit **STOP** llegue a su destino (Borja Díaz, 2015).

Interfaz

- **Visualización de Video en IP Webcam**

Para la visualización de video, se utilizó la aplicación **IP Webcam**, que convierte un dispositivo Android en una cámara IP remota, accesible desde un computador conectado a la misma red Wi-Fi. Entre las características que ofrece esta aplicación se incluyen renderizadores web como Flash, Javascript, y opciones

de grabación de video en formatos como WebM, MOV, MKV, o MPEG4, además de transmisión de audio en formatos Wav, Opus o AAC.

El proceso para convertir un dispositivo Android en una cámara IP es el siguiente:

1. Descargar la aplicación desde la tienda oficial de Android, **Play Store**, a través del siguiente enlace: "[IP Webcam en Play Store](#)".
2. Ejecutar la aplicación, la cual despliega un conjunto de opciones para modificar los parámetros de configuración de video, como se muestra en la ilustración 37.

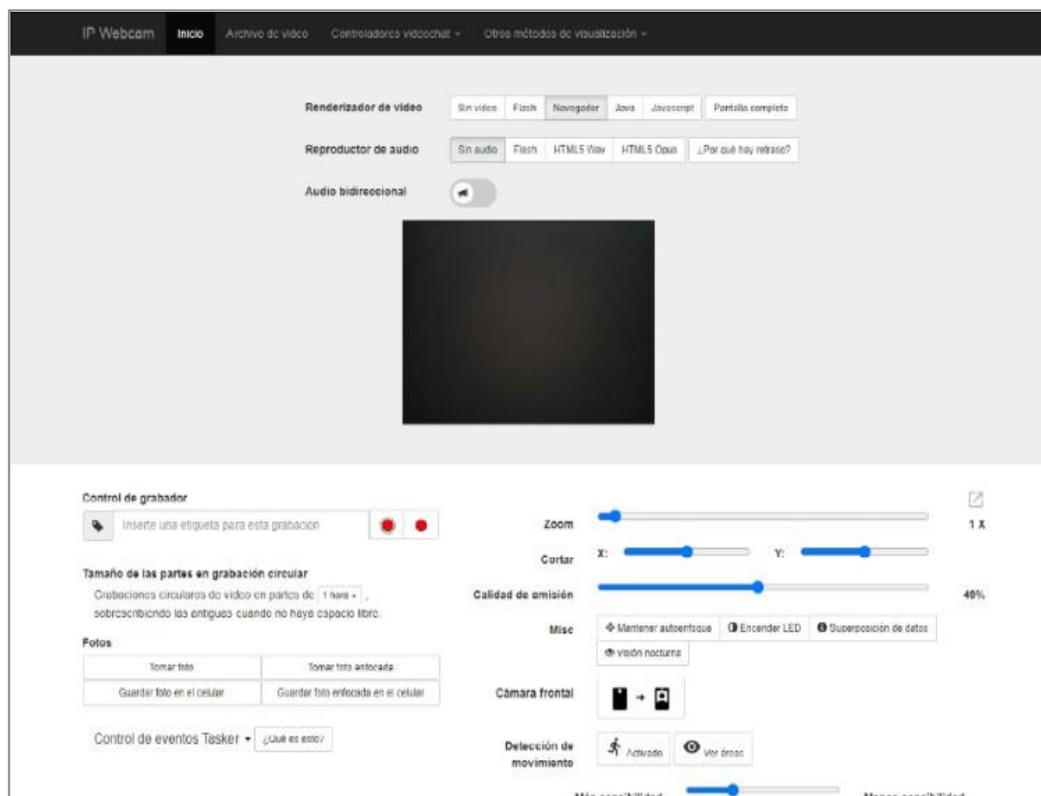
Ilustración 37 Configuración de parámetros de video.



3. Se selecciona la opción Preferencias de video, que permite configurar parámetros como la resolución de video, la tasa de cuadros por segundo (fps), entre otros.

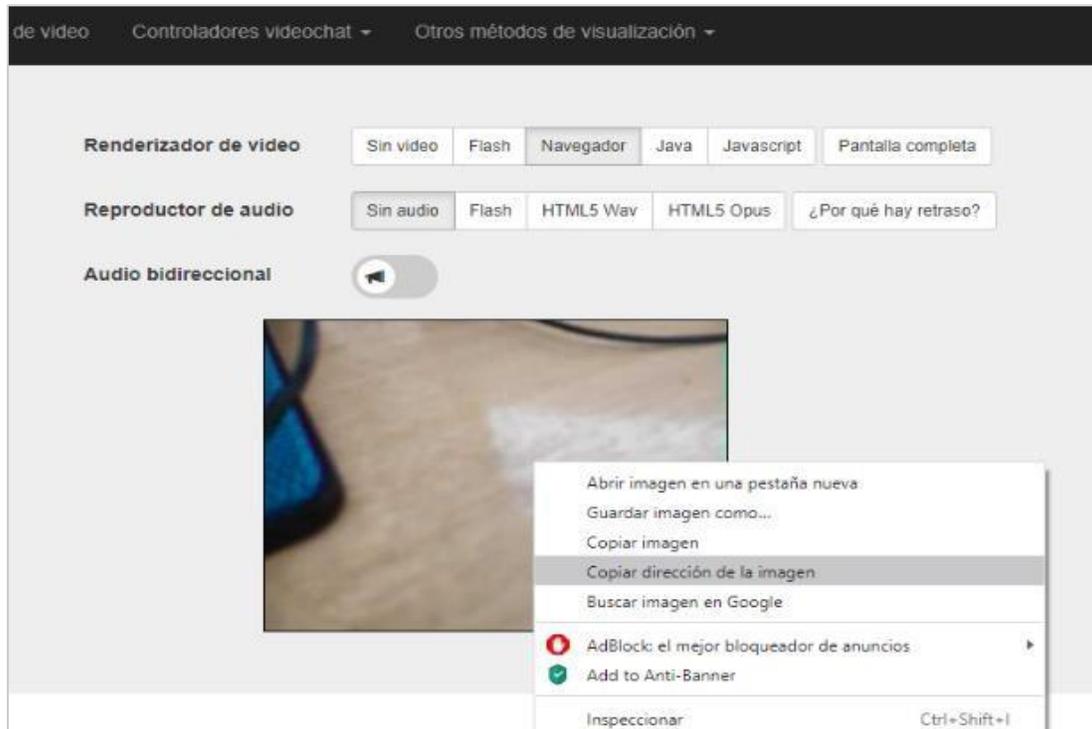
4. Después de ajustar las preferencias de video, se regresa a la pantalla principal e inicia el servidor para comenzar la transmisión de video.
5. Una vez iniciado el servidor, se muestra en pantalla una dirección compuesta por la IP del dispositivo móvil y un puerto por defecto, por ejemplo, <http://192.168.100.6:8080>. Esta dirección puede ser ingresada en cualquier ordenador conectado a la misma red, y de esta forma se despliega la interfaz web de la aplicación. A continuación, en la Figura 42 se muestra la interfaz en el navegador.

Ilustración 38 Interfaz web.



Al seleccionar la opción Navegador en el apartado de renderizado de video de la interfaz web, se obtiene la dirección de la imagen en el formato <http://192.168.100.6:8080/video>, como se muestra en la ilustración 39.

Ilustración 39 Copiado de la dirección de la imagen de video.



Diseño de la interfaz en Node-RED

La interfaz se organiza en tres grupos principales: **panel**, **visualización** y **datos**. El **grupo de panel** muestra información sobre la velocidad y las revoluciones por minuto (RPM) del vehículo. El **grupo de visualización** se encarga de mostrar la transmisión de video proveniente del teléfono móvil. Por último, el **grupo de datos** proporciona detalles sobre la inclinación del vehículo en los ejes X, Y y Z. La ilustración 40 ilustra la distribución de los grupos en la interfaz.

Ilustración 40 Distribución de la interfaz en Node-RED.



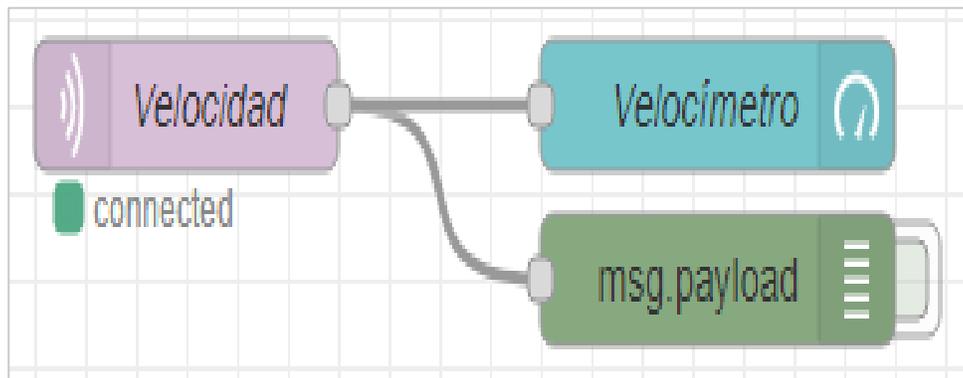
La información recibida de los sensores se conecta a diferentes nodos de **Dashboard**, los cuales permiten la interacción con el usuario, ya que su apariencia y valores varían según los datos numéricos recibidos. Un ejemplo de esto son el velocímetro y los ejes de inclinación, los cuales utilizan un nodo denominado **gauge**. En la **Figura 45** se muestra el esquema del velocímetro y las inclinaciones de los ejes X y Y, respectivamente.

Ilustración 41 Esquema velocímetro, inclinación en el eje X y en el eje Y.



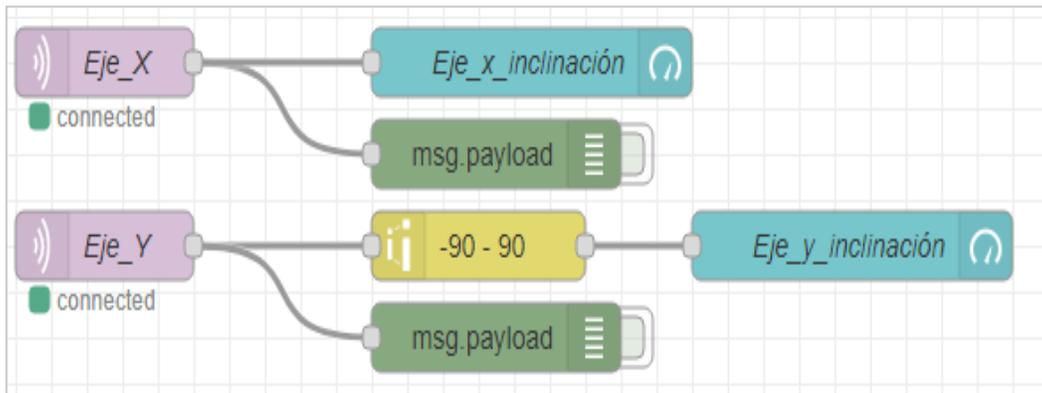
El velocímetro recibe los valores provenientes de la lectura del encoder, los cuales son transmitidos a través del protocolo MQTT bajo el topic **Velocidad**. En la ilustración 42, se muestra la conexión entre el valor recibido y el nodo **Dashboard** en la aplicación Node-RED

Ilustración 42 Conexión entre nodos para el topic Velocidad.



De manera similar, los ejes X y Y reciben los valores provenientes del giroscopio, los cuales son enviados a través del protocolo MQTT bajo los topics **eje_x** y **eje_y**, respectivamente. En la ilustración 43, se muestran las conexiones correspondientes.

Ilustración 43 Conexión del eje X y Y con su respectivo nodo.



El tacómetro utiliza un nodo Dashboard de tipo **level**, mientras que el eje Z emplea un nodo de tipo **compass**, ya que su visualización requiere un formato diferente.

En la ilustración 44 se presenta el esquema correspondiente al tacómetro y la inclinación del eje Z.

Ilustración 44 Esquema tacómetro e inclinación del eje Z.



El tacómetro recibe los valores que corresponden al grado de presión ejercido en los pedales, donde el valor mínimo es 0 cuando no hay presión, y el valor máximo es 8 cuando se alcanza la presión total. Este valor es recibido a través del puerto serial correspondiente que conecta el volante con el computador.

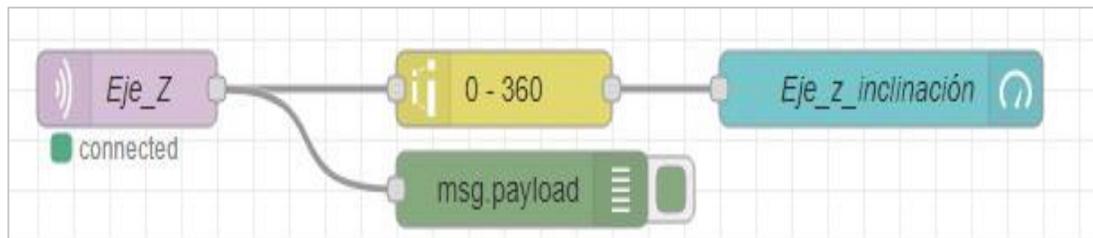
En la ilustración 45 se muestra la conexión entre los valores obtenidos del volante y los pedales, y su respectivo nodo en el Dashboard.

Ilustración 45 Conexión entre nodos para el tacómetro.



Los valores del eje Z, al igual que los de los ejes X y Y, son obtenidos del giroscopio y transmitidos a través del protocolo MQTT bajo el topic eje_z. En la ilustración 46 se muestra la conexión correspondiente.

Ilustración 46 Conexión inclinación del eje Z.



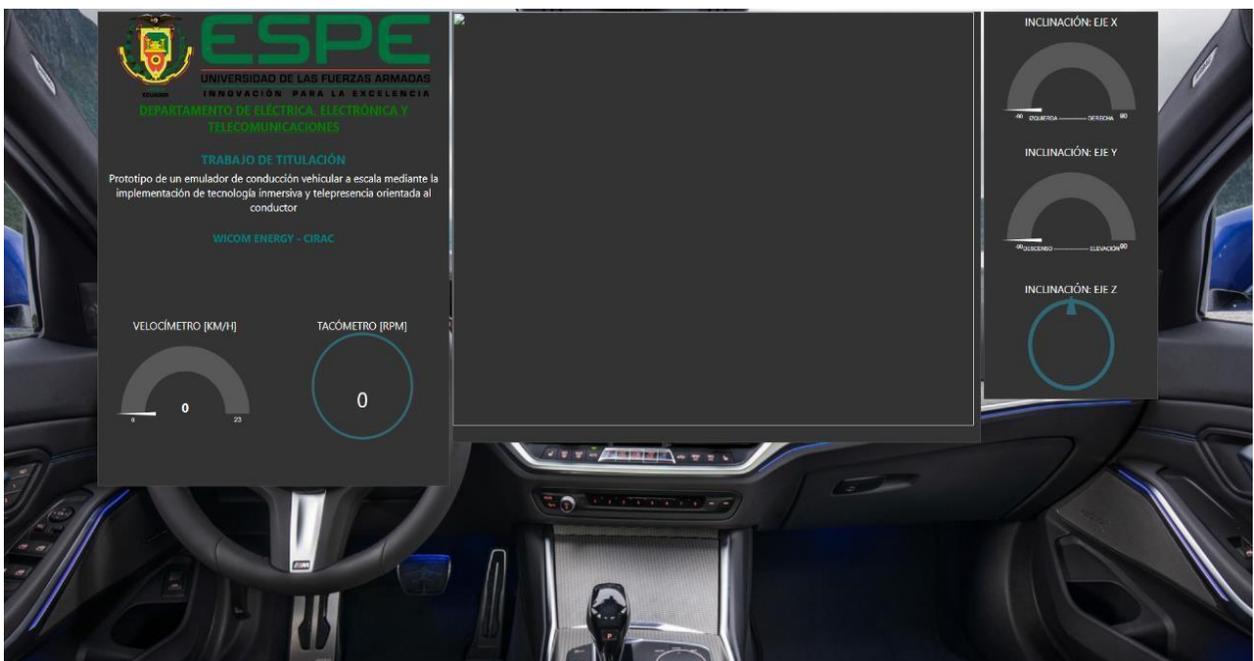
La integración del video transmitido a través de la aplicación IP Webcam, como se explica más adelante, fue realizada en la interfaz de Node-RED utilizando el nodo template, que permite introducir instrucciones en lenguaje HTML y facilitar la conexión entre las dos plataformas. En la ilustración 47 se muestra el nodo utilizado, denominado Pantalla.

Ilustración 47 Nodo utilizado para visualización de la interfaz.



Finalmente, en la ilustración 48, se presenta el diseño global de la interfaz.

Ilustración 48 Interfaz final realizada en Node-RED



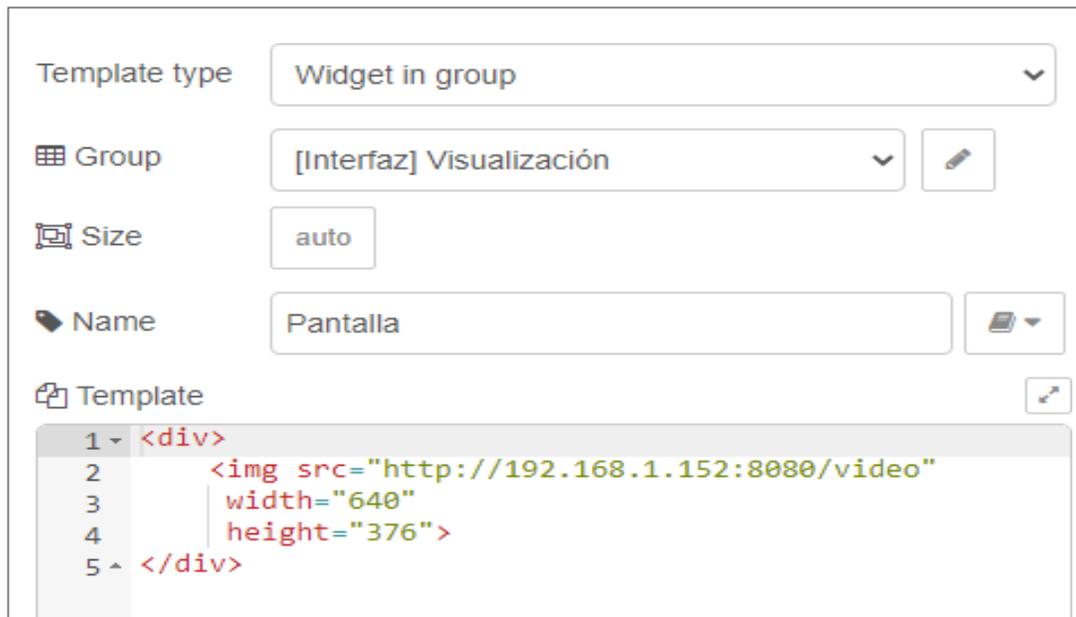
Visualización de Video.

Para integrar la imagen transmitida por IP Webcam en la plataforma de Node-RED, se utiliza el nodo Template de la categoría Dashboard, diseñado para procesar instrucciones en HTML. Al seleccionar el nodo, se pueden configurar los parámetros Template type, Group, Size, Name y Template.

El parámetro Template type, que por defecto está configurado como Widget in group, define el tipo de visualización. El parámetro Group, por su parte, asigna el nodo a un grupo específico dentro del Dashboard. El parámetro Size se ajusta automáticamente de forma predeterminada, mientras que el parámetro Name proporciona una etiqueta única para identificar el nodo entre otros.

Por último, el parámetro Template contiene las instrucciones HTML, que se utilizan para direccionar la imagen de IP Webcam y ajustar propiedades como el ancho y la altura. La Figura 53 muestra los parámetros y sus respectivas instrucciones en HTML.

Ilustración 49 Parámetros template type.



The image shows the configuration interface for the 'Template' node in Node-RED. It features several input fields and a code editor:

- Template type:** A dropdown menu set to 'Widget in group'.
- Group:** A dropdown menu set to '[Interfaz] Visualización' with an edit icon to its right.
- Size:** A text input field containing 'auto'.
- Name:** A text input field containing 'Pantalla' with a save icon to its right.
- Template:** A code editor area containing the following HTML code:

```
1 <div>
2   
5 </div>
```

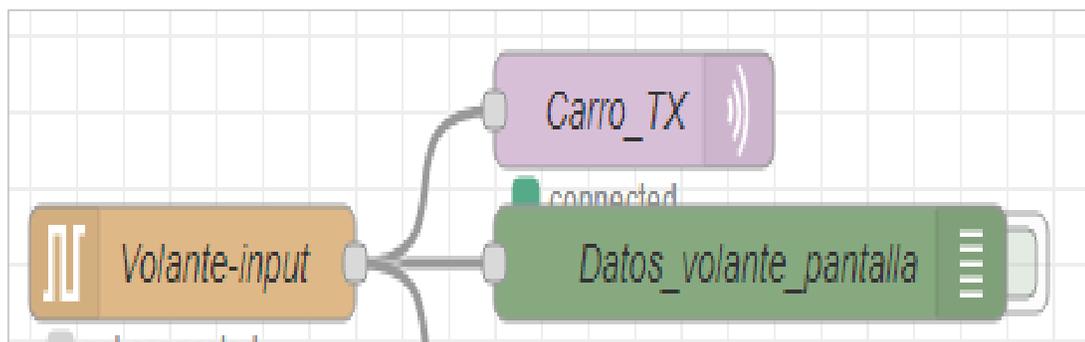
Sistema de Control

Transmisor del Control Vehicular

Las acciones realizadas en el volante son convertidas en datos y enviados al computador mediante comunicación serial. Estos datos luego son retransmitidos al microcontrolador del vehículo, utilizando un nodo MQTT out para difundir la información bajo el topic "carro" a través del servidor.

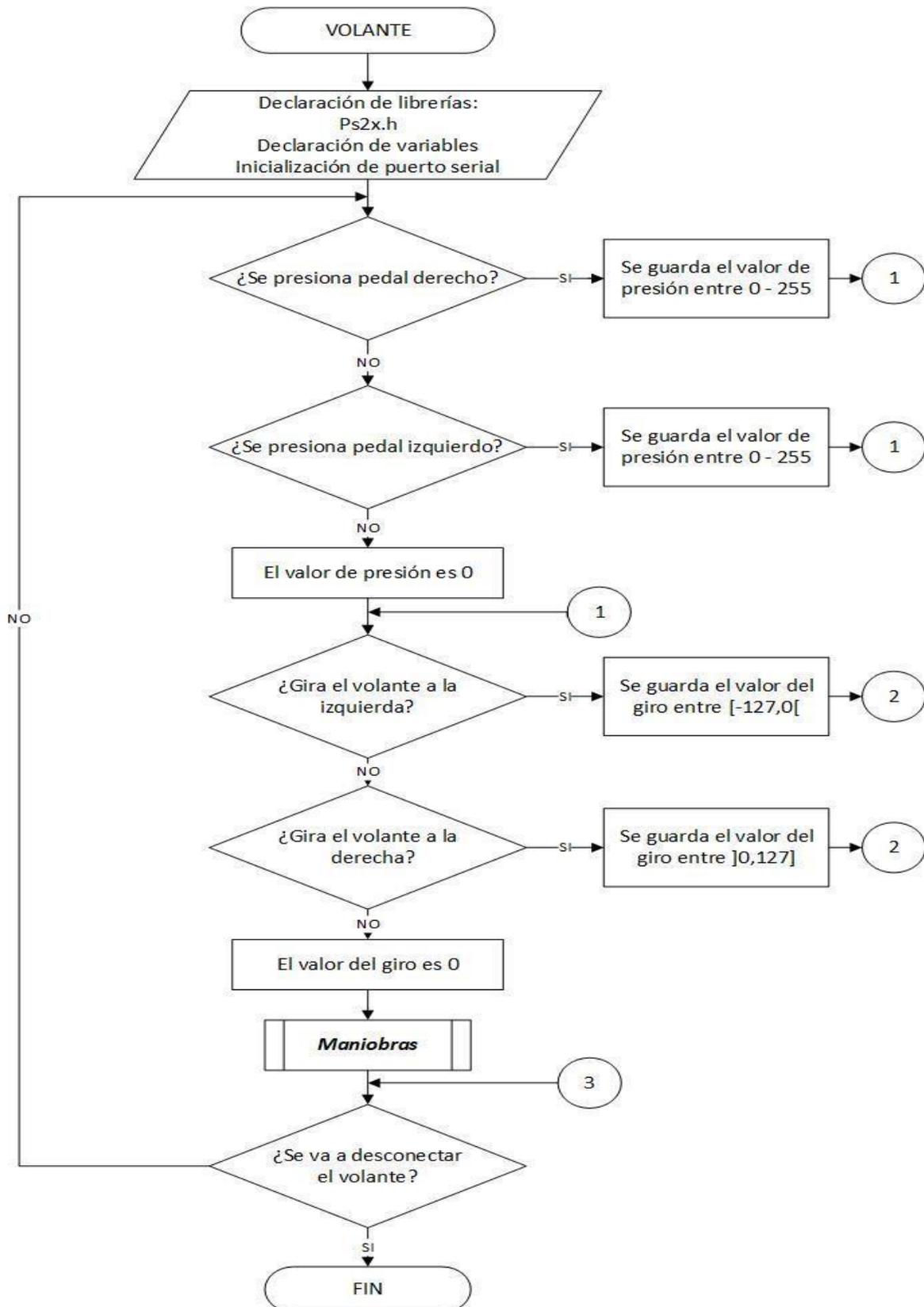
En la ilustración 50 se muestra la conexión utilizada en la transmisión de estos datos.

Ilustración 50 Conexión transmisión de datos.



El algoritmo creado para procesar las acciones realizadas en el volante está representado en el diagrama de flujo de la ilustración 51.

Ilustración 51 Diagrama de flujo de las acciones del volante.



La ilustración 52 describe de forma detallada el subproceso de Maniobras que se presenta en el diagrama anterior.

Ilustración 52 Diagrama de flujo del subproceso Maniobras.

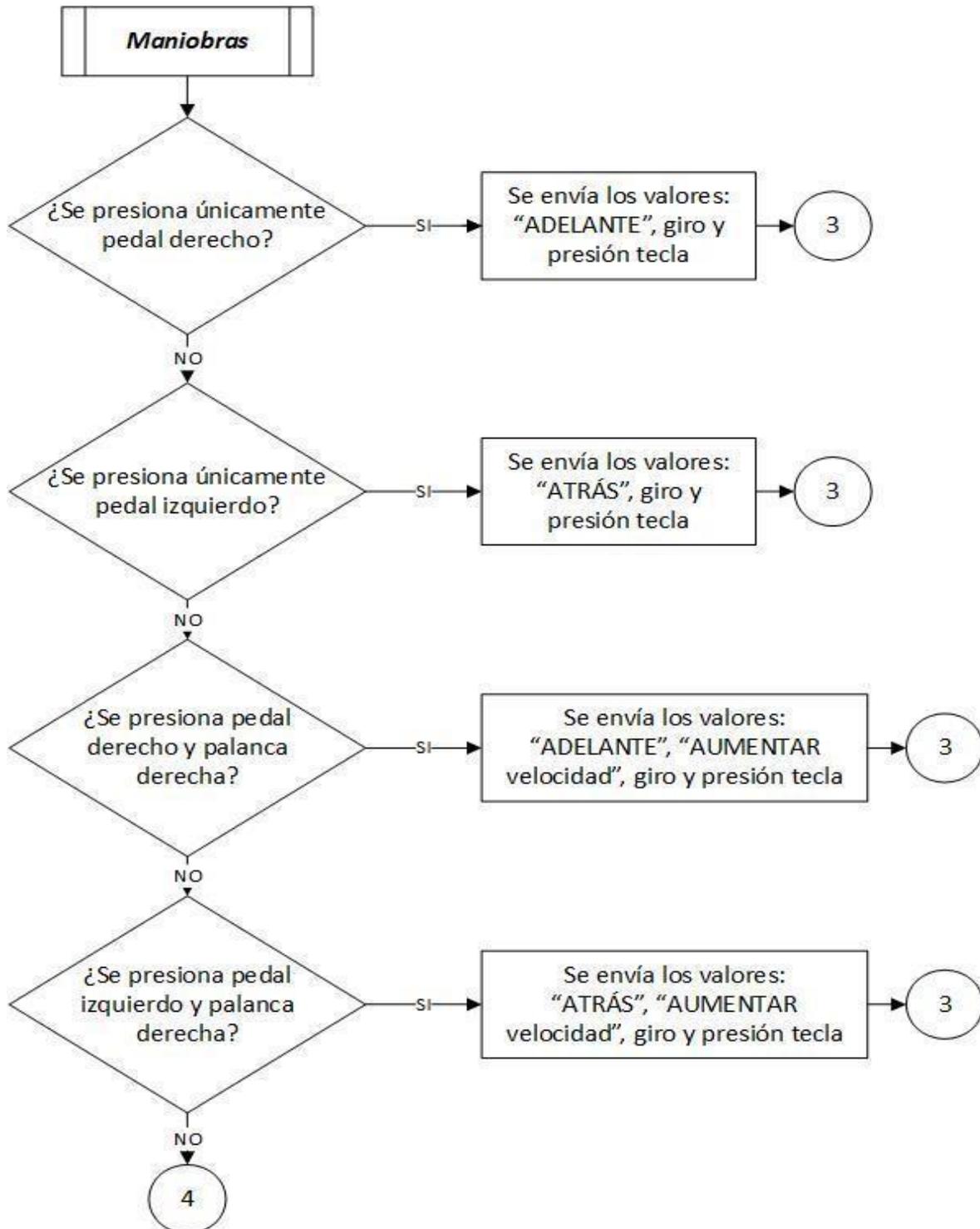
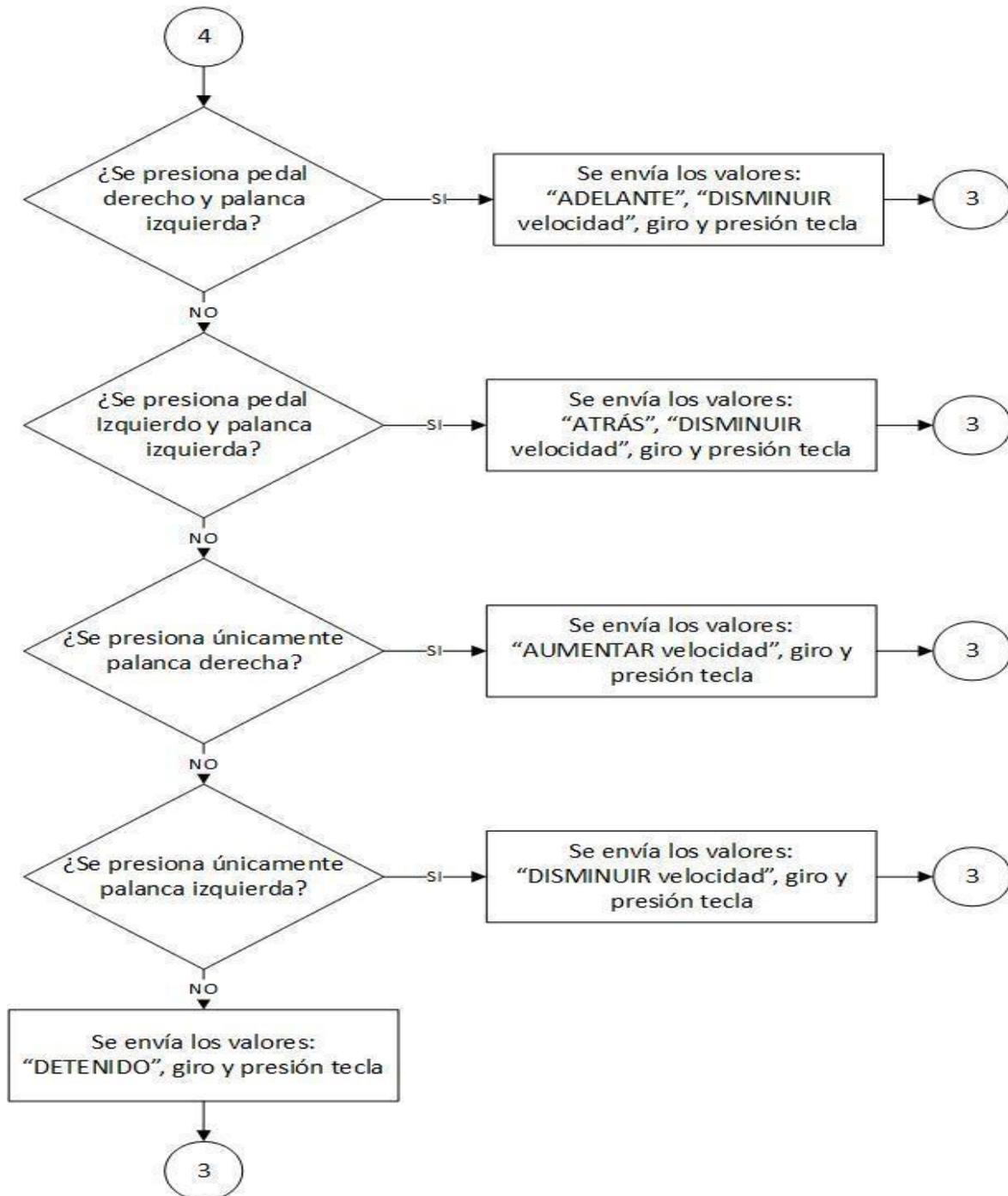


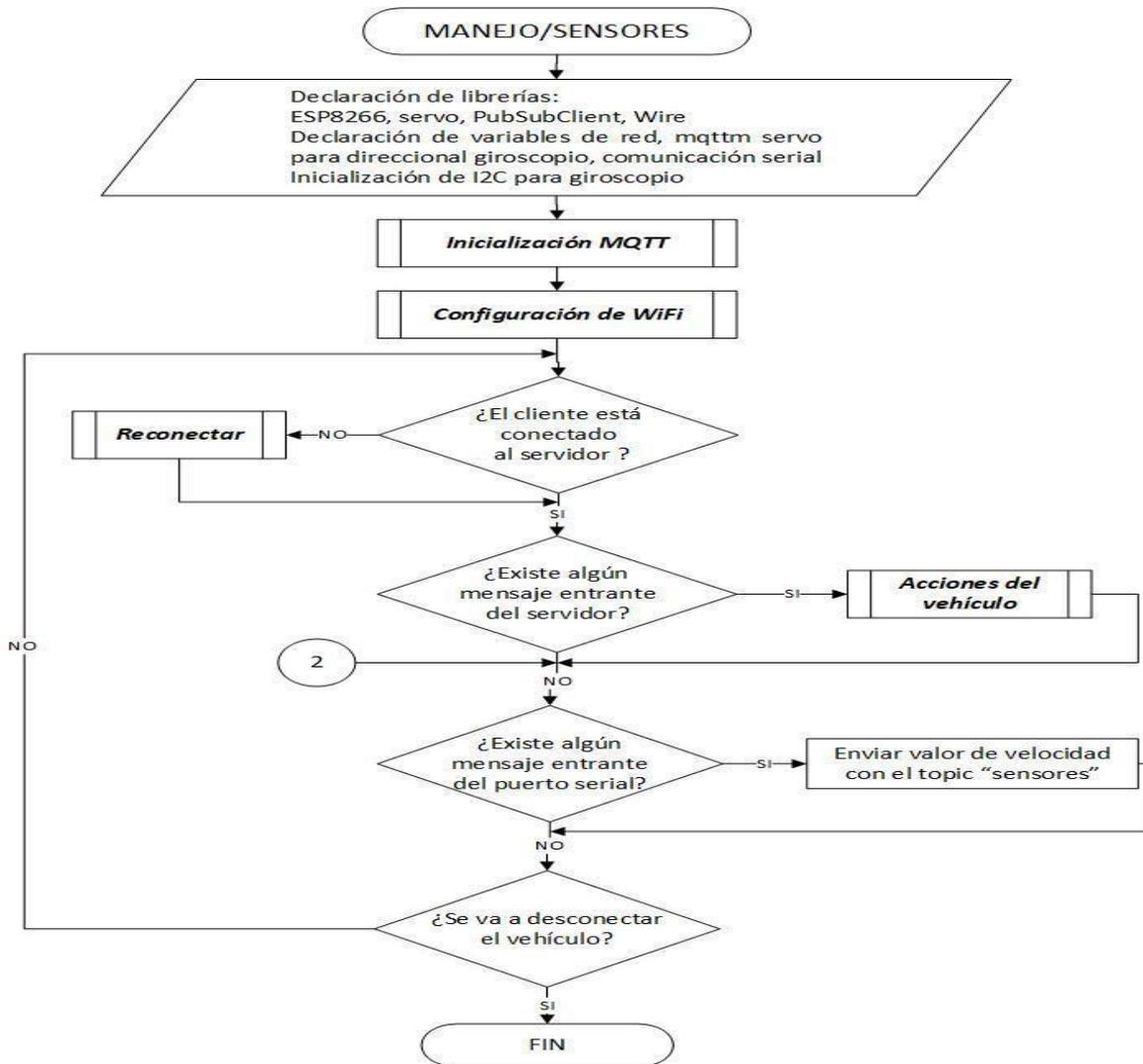
Ilustración 53 Continuación del diagrama de flujo del subproceso Maniobras.



El diagrama de flujo en la Figura 58 detalla el comportamiento general que sigue el microcontrolador para interpretar los datos recibidos del transmisor,

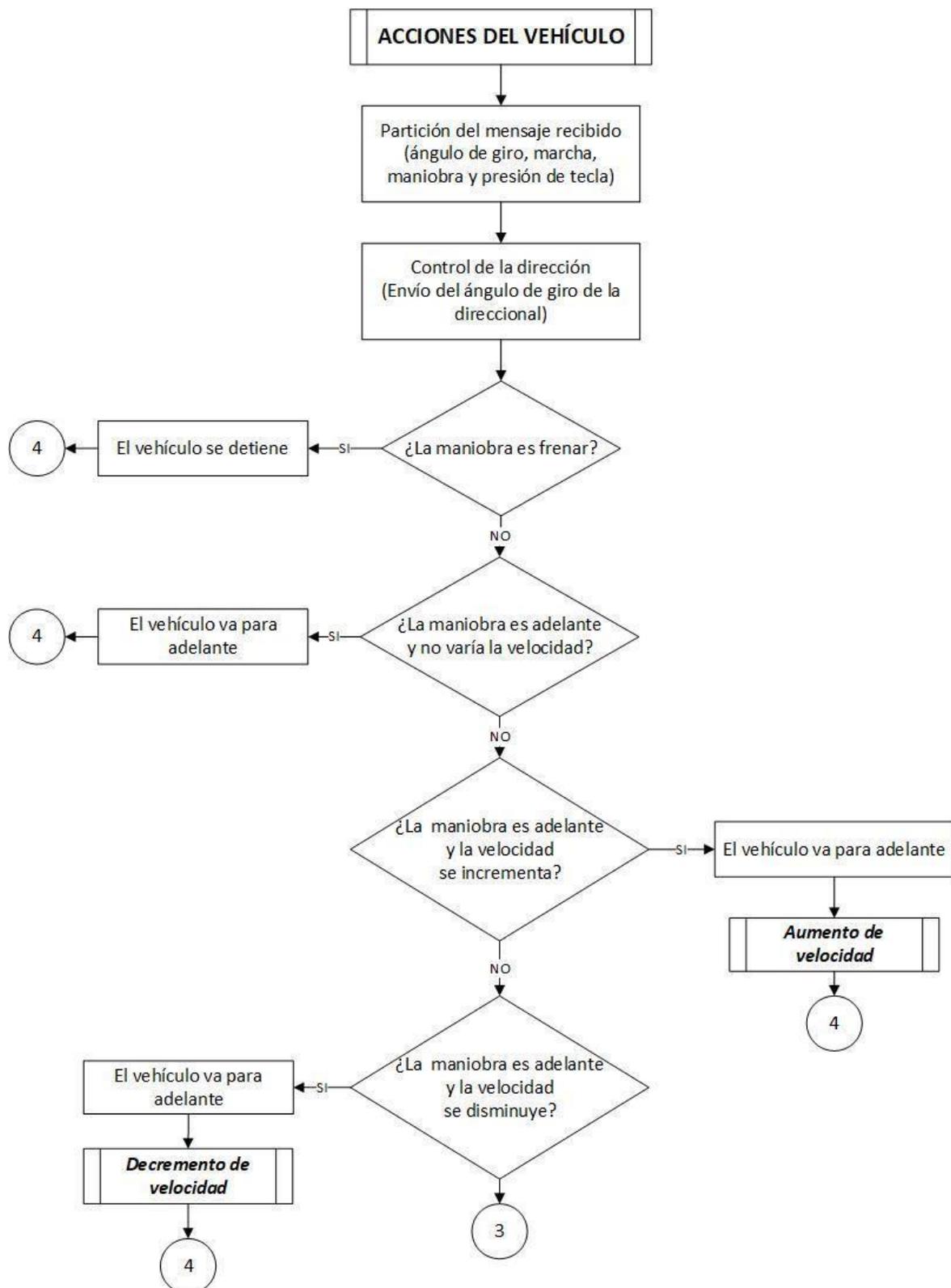
correspondientes a las maniobras realizadas por el conductor. Es importante señalar que los subprocesos relacionados con la configuración de la red WiFi y UDP ya han sido explicados previamente.

Ilustración 54 Diagrama de flujo del receptor de control de vehículo.



En los diagramas de flujo que se presentan a continuación, se explica el subproceso relacionado con las posibles acciones que el vehículo ejecuta en respuesta a las diferentes maniobras. Este proceso se detalla en la ilustración 55.

Ilustración 55 Diagrama de flujo de las Acciones del Vehículo.



La ilustración 56 presenta la continuación del diagrama de flujo de las acciones del vehículo que fue descrito previamente.

Ilustración 56 Continuación del diagrama de flujo de las Acciones del Vehículo.

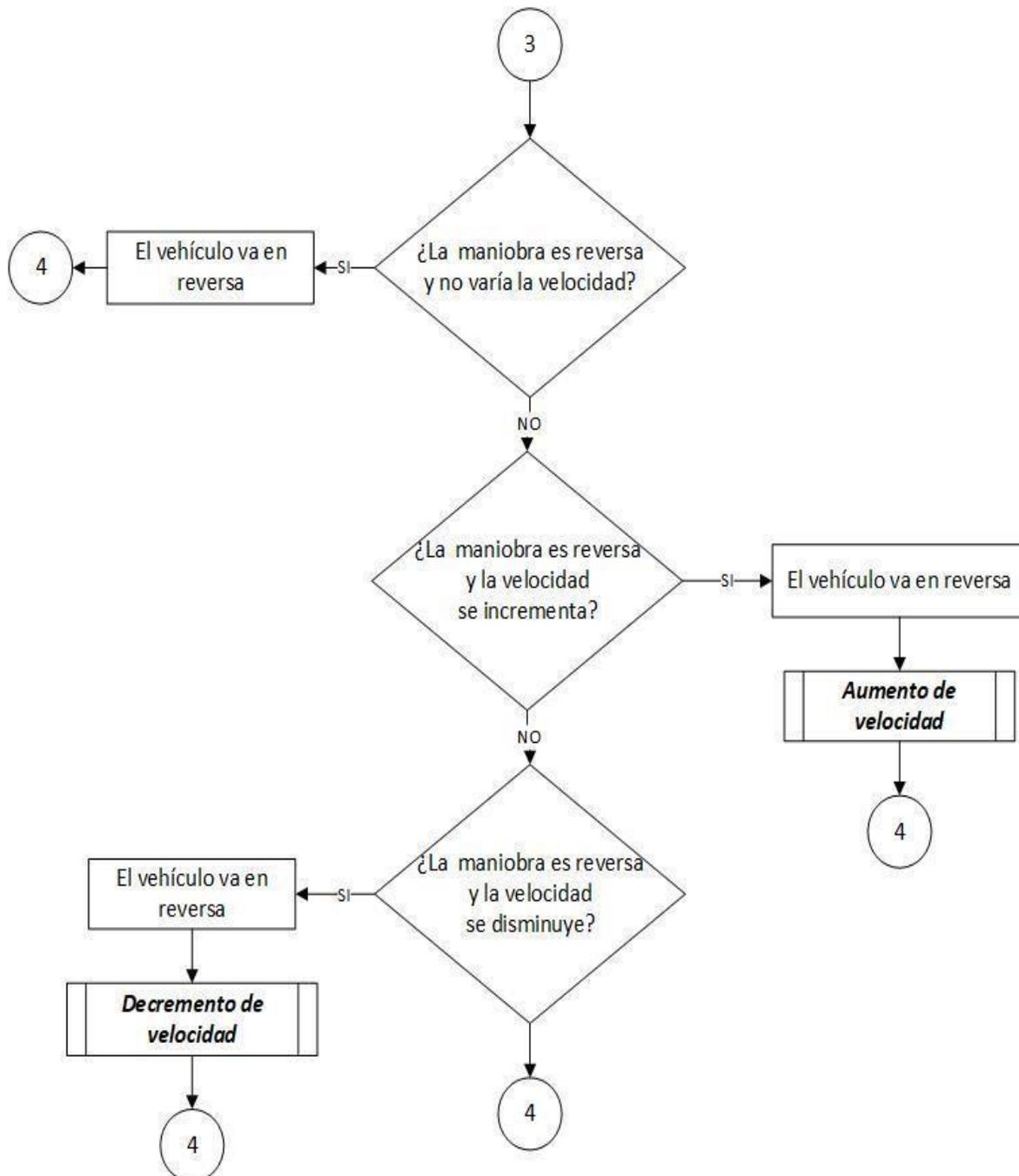
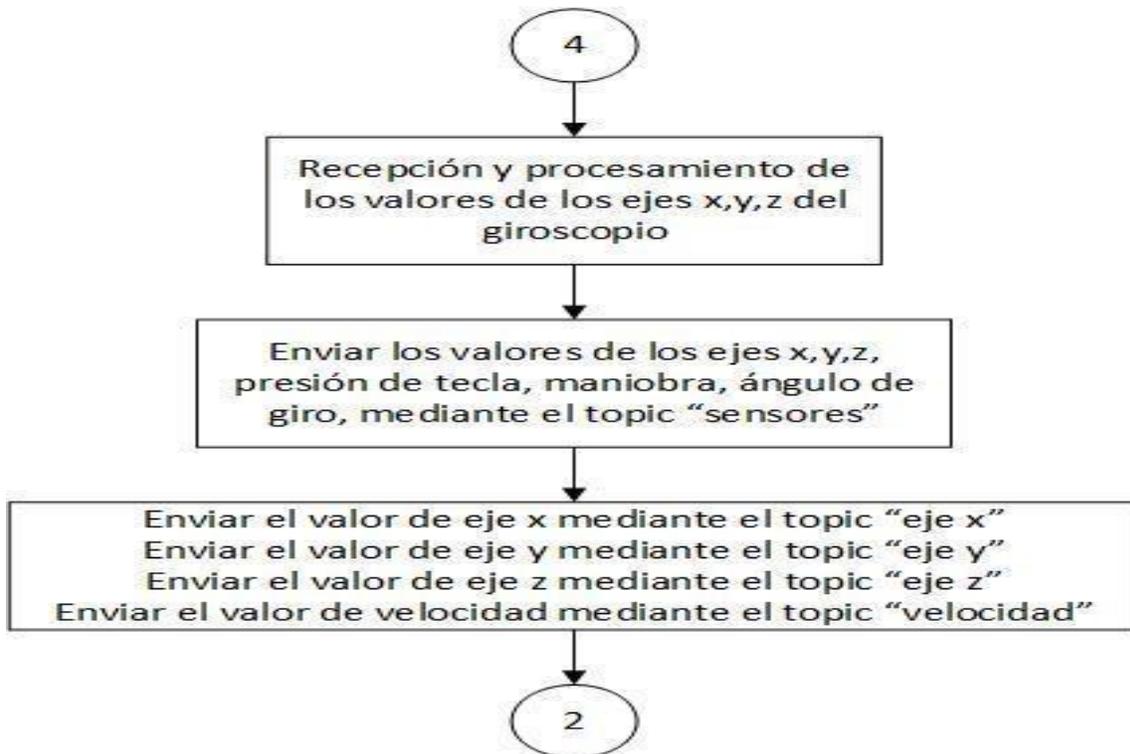


Ilustración 57 Continuación del diagrama de flujo de las Acciones del Vehículo.



Sistema Sensorial

Diseño del Dispositivo Háptico

El dispositivo háptico consiste en un chaleco fabricado con material Corosil, el cual permite al usuario experimentar diferentes patrones de vibración mientras maneja el vehículo. Este chaleco está equipado con 32 actuadores vibrotáctiles, distribuidos estratégicamente en la parte delantera y trasera del cuerpo.

De acuerdo con Castromonte y Sánchez (2016), la distancia mínima entre dos puntos de vibración que el usuario puede percibir es de 60 mm. Esto implica que los actuadores deben ser colocados con una separación de al menos 60 mm entre ellos, en todas las direcciones.

Con base a esta información, el chaleco ha sido diseñado con una disposición de actuadores separados por 100 mm, organizados en pequeñas mallas formadas

por triángulos equiláteros, lo que garantiza una distribución uniforme de las vibraciones.

La ilustración 58 ilustra cómo se disponen los actuadores vibrotáctiles en la parte delantera del chaleco. Es relevante señalar que los actuadores han sido ubicados de manera simétrica tanto en el lado izquierdo como en el derecho del chaleco.

Ilustración 58 Distribución de motores parte delantera del chaleco.

En la ilustración 59, se presenta la distribución de los actuadores vibrotáctiles en la parte posterior del chaleco.

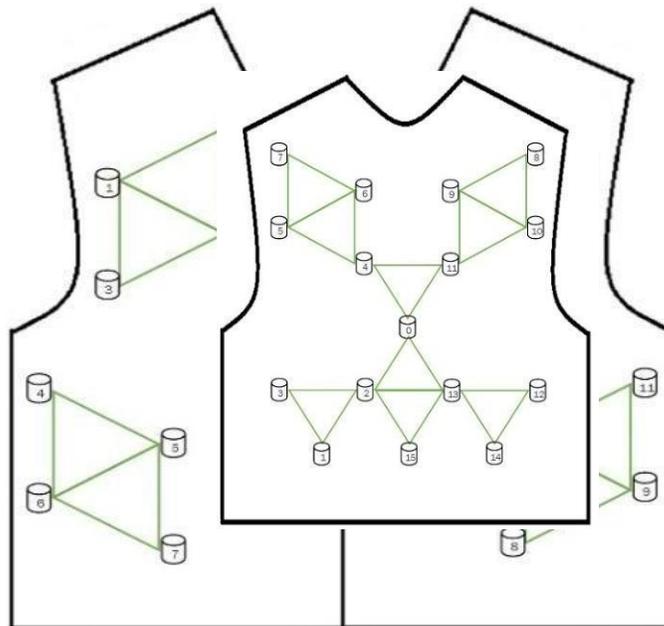


Ilustración 59 Distribución de motores parte trasera del chaleco.

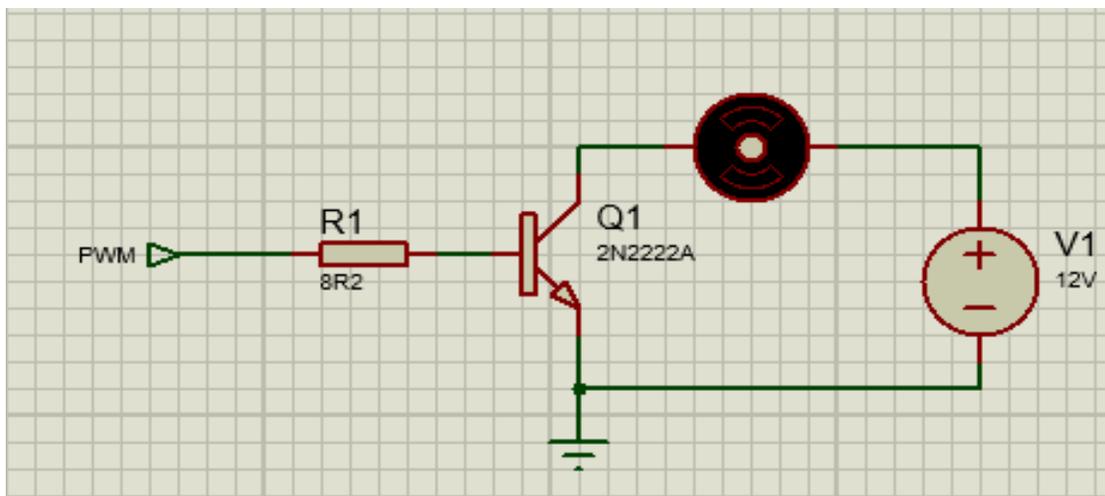
Construcción del Dispositivo Háptico

El dispositivo háptico está fabricado con corosil, un material de alta resistencia y 1mm de espesor, lo que asegura que la vibración generada por los actuadores no se vea interferida por la tela. Los actuadores están sujetos a esta estructura mediante elásticos, lo que les permite mantenerse firmemente en su lugar durante el uso.

Tal como se explicó previamente, el dispositivo háptico consta de 32 actuadores vibrotáctiles, distribuidos entre el lado izquierdo y derecho del chaleco, tal como se muestra en la ilustración 58 y 59. Cada lado cuenta con 16 actuadores que se conectan a una placa de control.

La placa de control utiliza el módulo PCA9685, que tiene la capacidad de generar 16 señales independientes de modulación por ancho de pulso (PWM). Cada señal se conecta a una etapa de potencia, la cual está conformada por un circuito emisor común, como se ilustra en la ilustración 60.

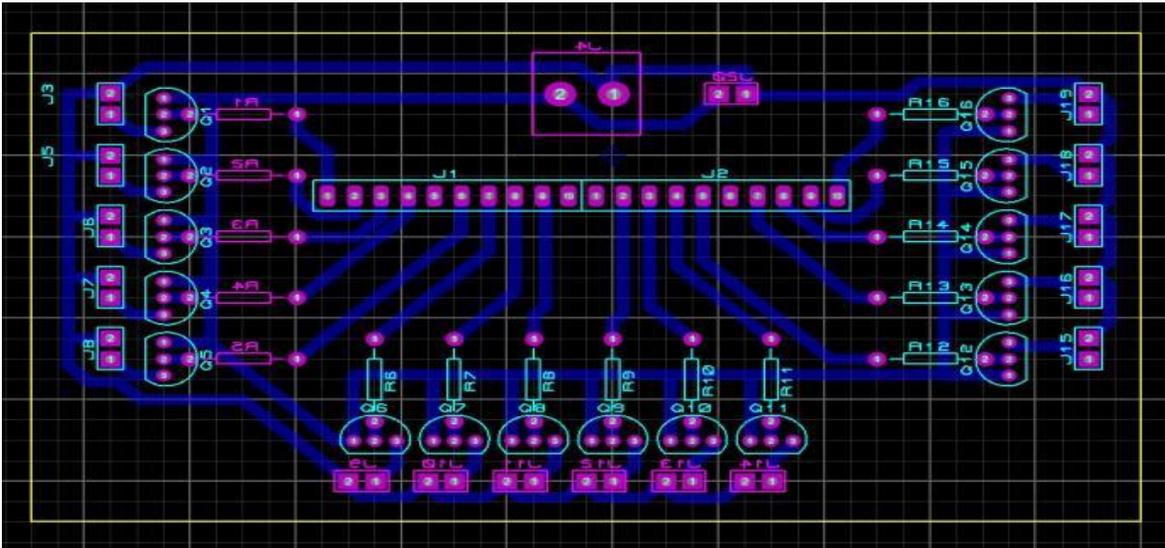
Ilustración 60 Circuito de control.



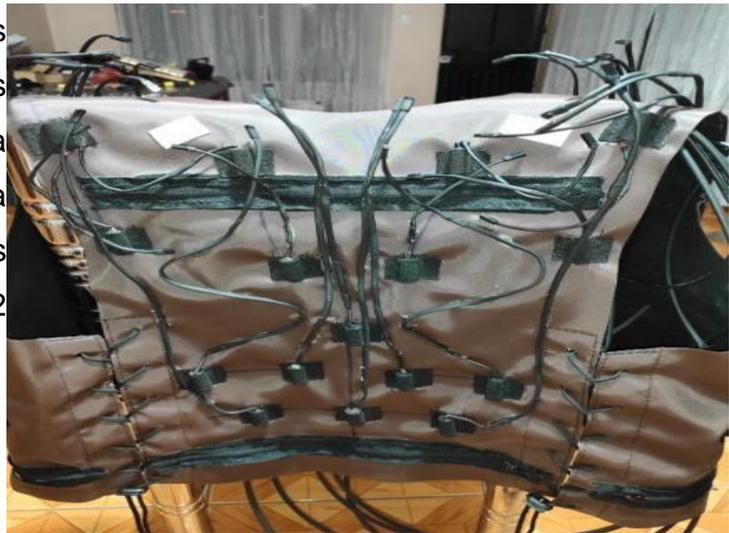
El esquema general del diseño de la placa de control se presenta en la ilustración 61. Para el funcionamiento del dispositivo háptico, se necesitó la

creación de dos placas de control, las cuales son responsables de gestionar todos los actuadores vibrotáctiles que conforman el chaleco. Estas placas se comunican entre sí mediante la interfaz de comunicación I2C con el microcontrolador.

Ilustración 61 Diseño de la placa de control



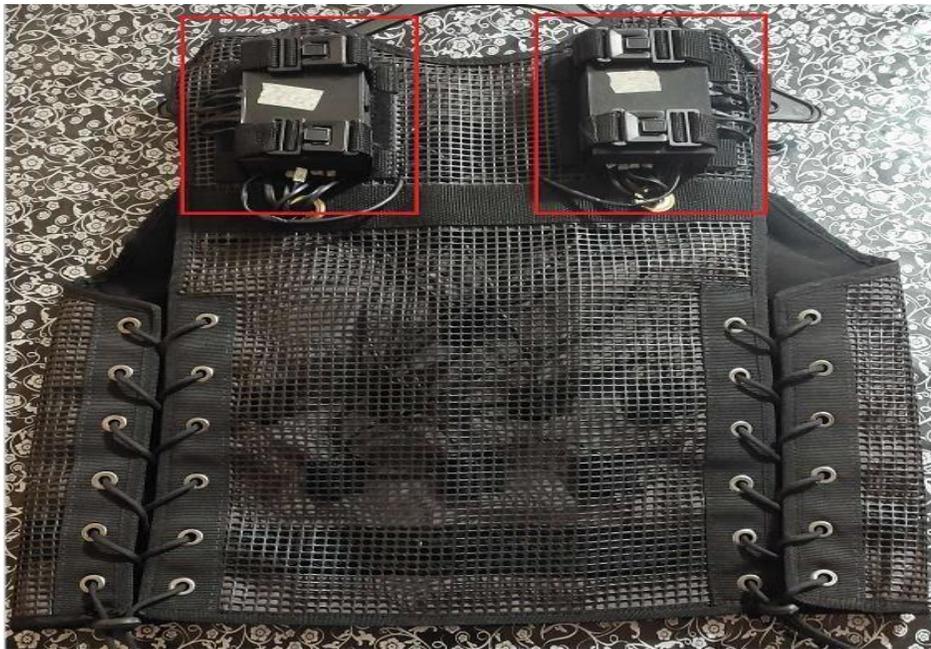
En la ilustración 62 se ilustra la composición interna del chaleco, donde se pueden observar las ranuras elaboradas con elástico para sujetar los actuadores. También se muestra el cableado necesario para conectar los actuadores a las placas de control. Ilustración 62 Cableado de actuadores.



Después de ubicar los actuadores y realizar el cableado correspondiente, se empleó una malla plástica para cubrir el cableado electrónico y proteger los actuadores vibrotáctiles en todo el chaleco, brindándole además un toque estético.

Las placas de control, situadas en la parte externa del chaleco, están resguardadas por carcasas de plástico fabricadas mediante impresión 3D. Estas carcasas están sujetas al chaleco con correas y velcro, lo que permite extraerlas fácilmente para mantenimiento o ajustes. La alimentación del sistema electrónico proviene de una batería lipo ubicada en un bolsillo dedicado en la parte frontal del chaleco. En la ilustración 63, se muestra la ubicación de las placas de control en el chaleco junto a sus respectivas carcasas.

Ilustración 63 Ubicación de placas de control.



En la ilustración 64 se muestra la ubicación de la batería lipo encargada de la alimentación del sistema electrónico.

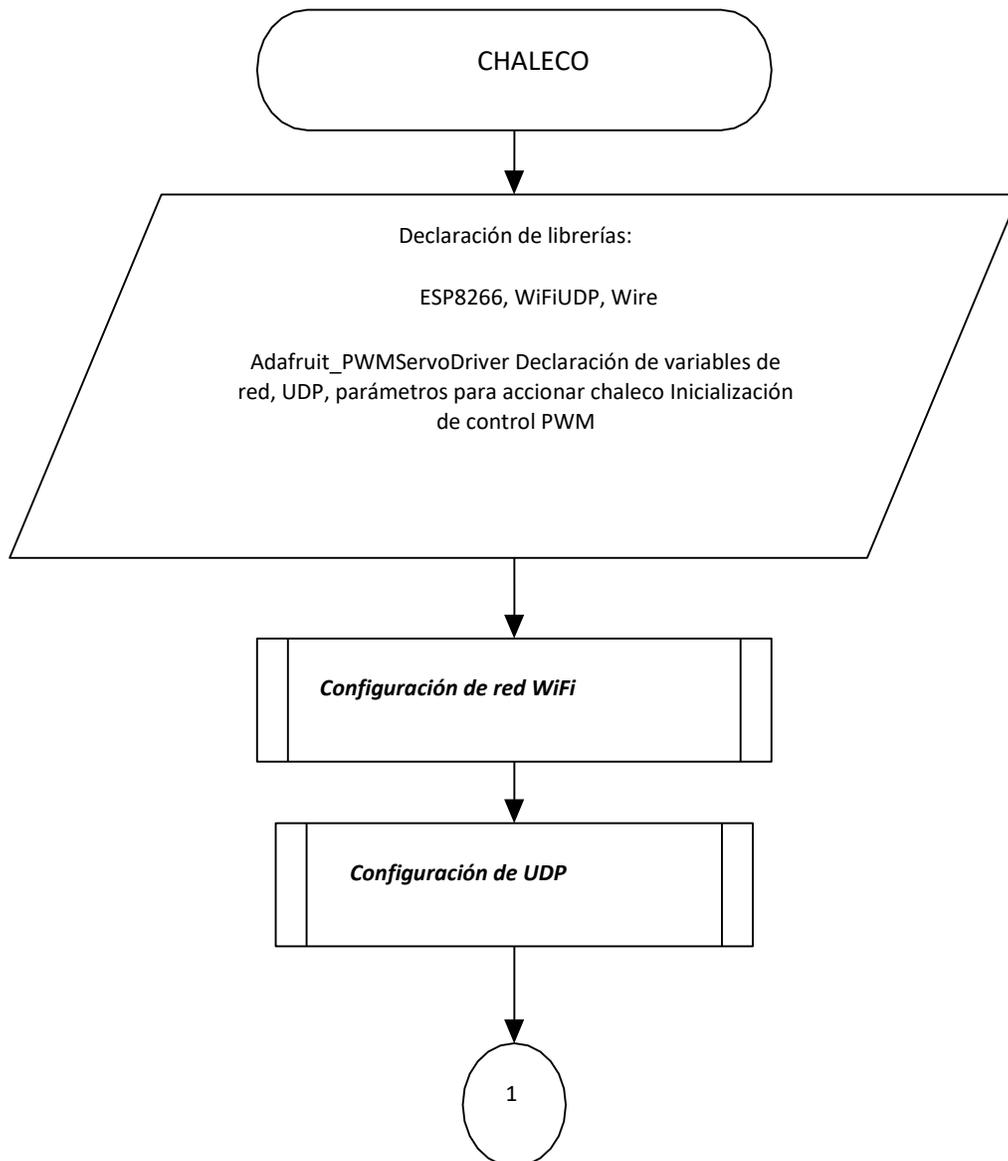
Ilustración 64 Ubicación alimentación del sistema electrónico.



Generación de Patrones de Vibración

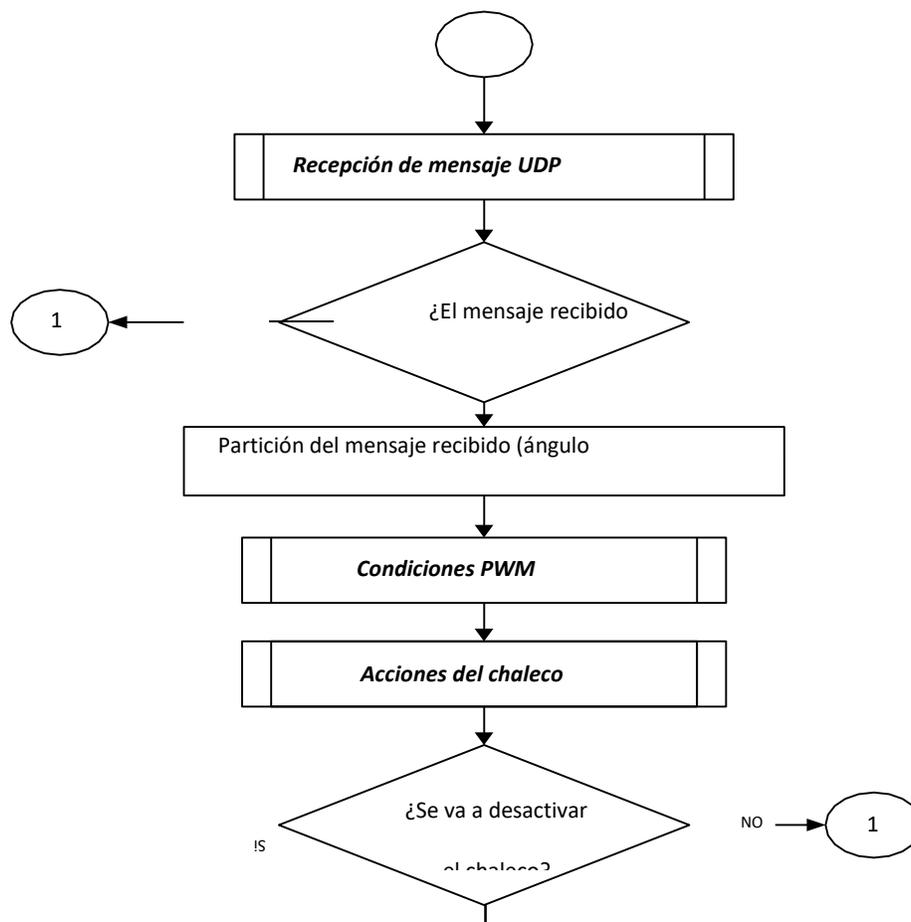
Con el arreglo de actuadores previamente descrito, se crearon secuencias de vibración que responden a distintos parámetros y acciones del vehículo. Estas secuencias se clasifican en: respuestas ante maniobras, respuestas topográficas y respuestas ante variación de velocidad. En la ilustración 65, se muestra el diagrama de flujo correspondiente al algoritmo desarrollado para activar los actuadores vibrotáctiles ubicados en el chaleco, según las condiciones específicas de cada situación.

Ilustración 65 Diagrama de flujo del algoritmo Chaleco.



La ilustración 66 muestra la continuación del diagrama de flujo del algoritmo chaleco descrito anteriormente.

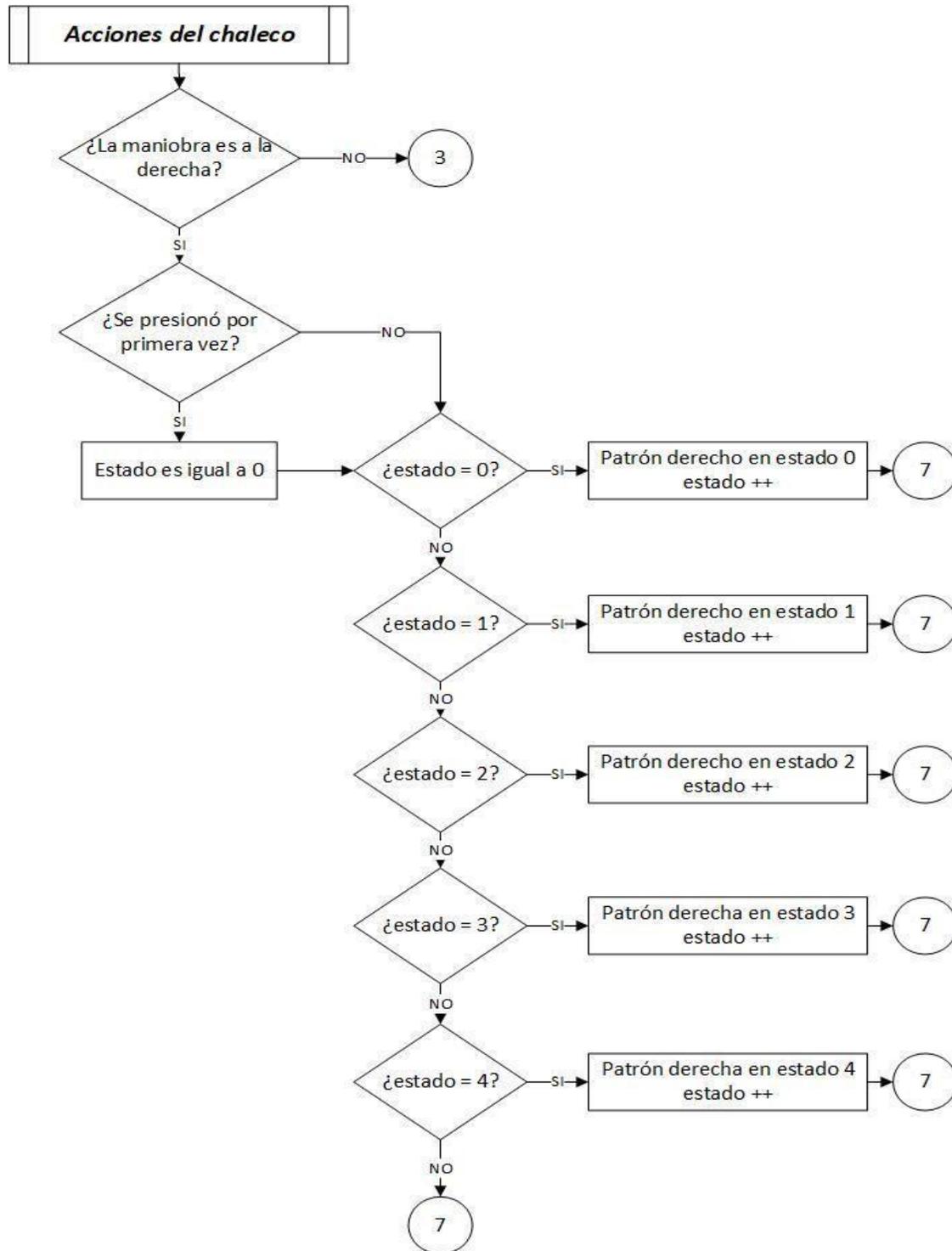
Ilustración 66 Continuación del diagrama de flujo Chaleco.



El subproceso Acciones del chaleco está comprendido por cuatro subdivisiones principales que corresponden a las maniobras ejercidas por el conductor, las cuales son: adelante, atrás, izquierda y derecha. Cada uno de estos patrones tiene una respuesta física independiente y varían de acuerdo con los **FIN** parámetros recibidos tales como inclinación en los diferentes ejes y la velocidad a la que se encuentre el vehículo

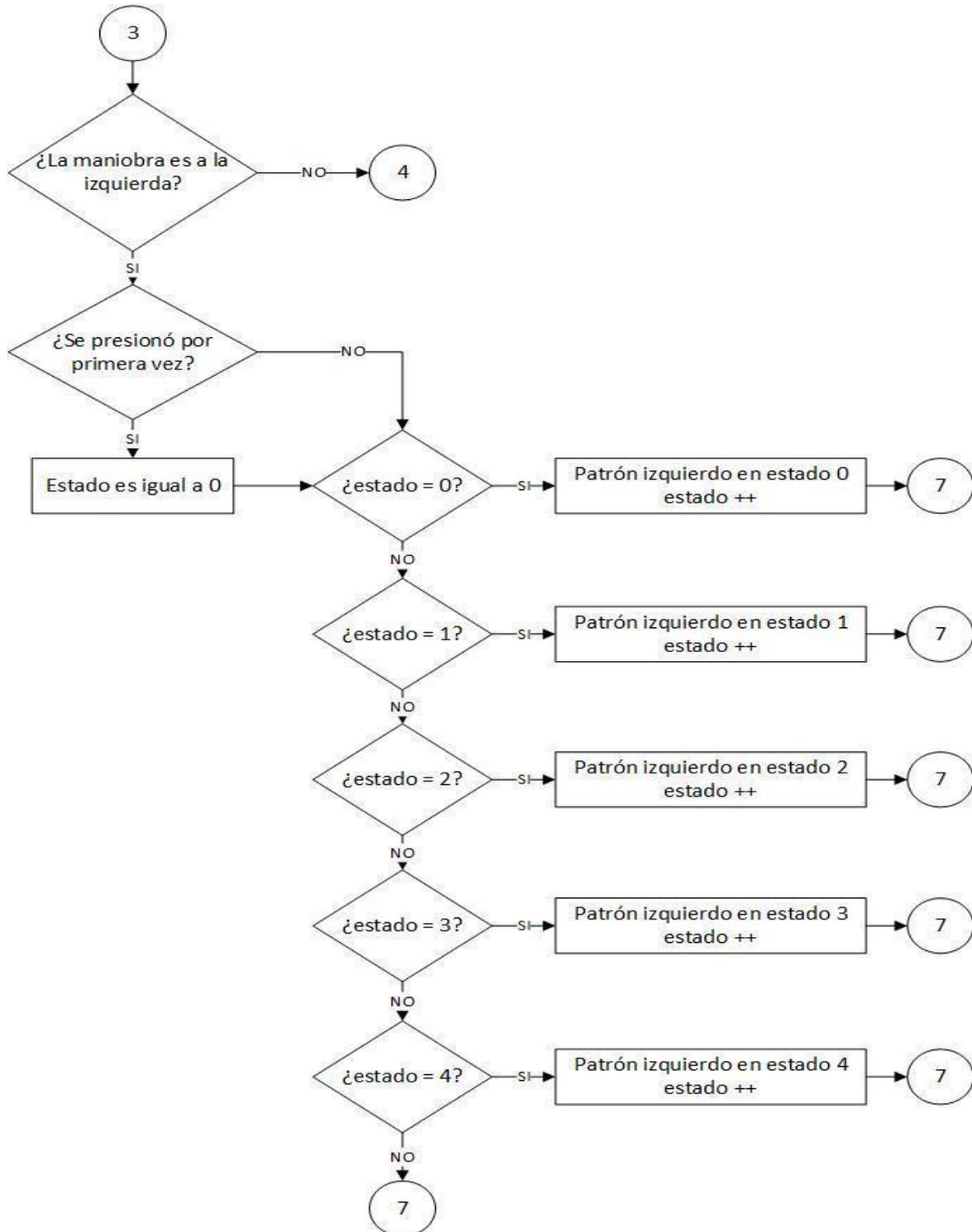
En la ilustración 67 se muestra la primera parte del diagrama de flujo del subproceso Acciones del chaleco.

Ilustración 67 Diagrama de flujo del subproceso Acciones del chaleco.



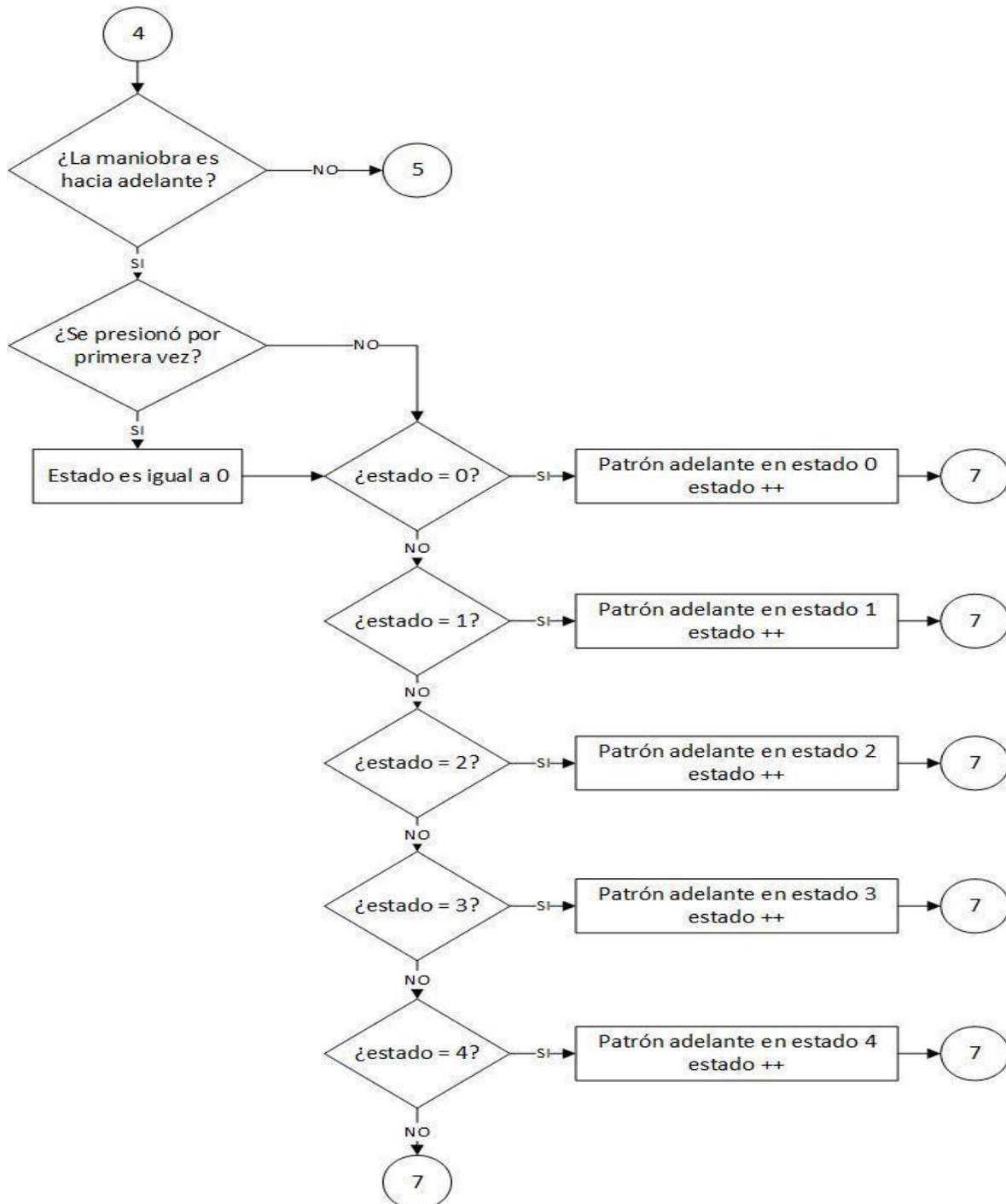
La ilustración 68 muestra la continuación del diagrama de flujo del subproceso acciones del chaleco descrito anteriormente.

Ilustración 68 Continuación del subproceso Acciones del chaleco.



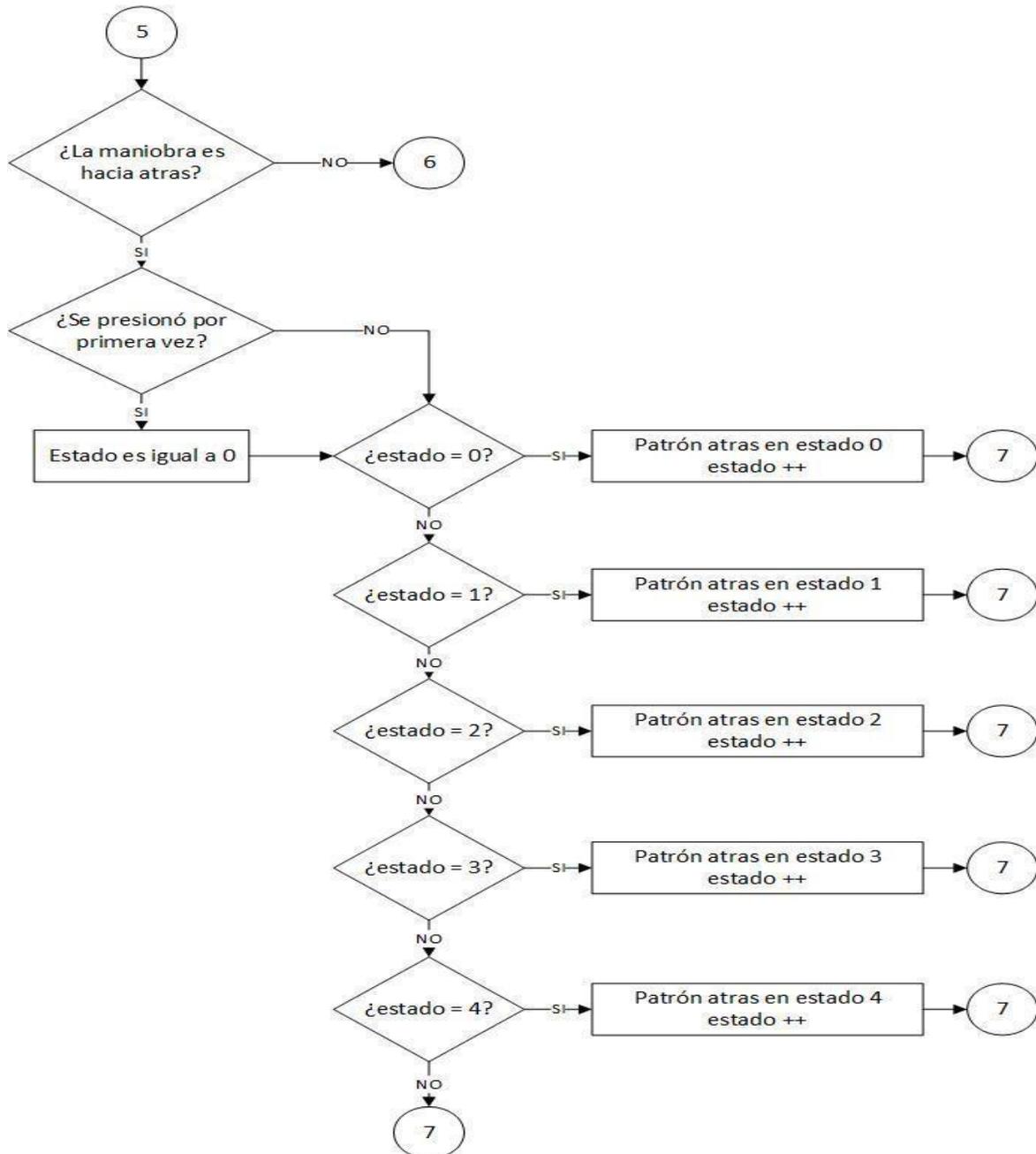
La ilustración 69 muestra la continuación del diagrama de flujo del subproceso acciones del chaleco descrito anteriormente.

Ilustración 69 Continuación del subproceso Acciones del chaleco.



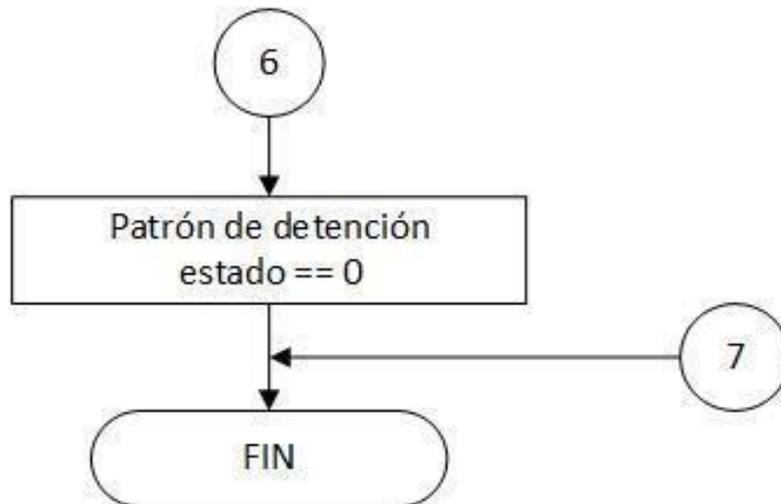
La ilustración 70 muestra la continuación del diagrama de flujo del subproceso acciones del chaleco descrito anteriormente.

Ilustración 70 Continuación del subproceso Acciones del chaleco.



La ilustración 71 muestra la continuación del diagrama de flujo del subproceso acciones del chaleco descrito anteriormente.

Ilustración 71 Continuación del subproceso Acciones del chaleco.



Respuestas ante Variación de Maniobras.

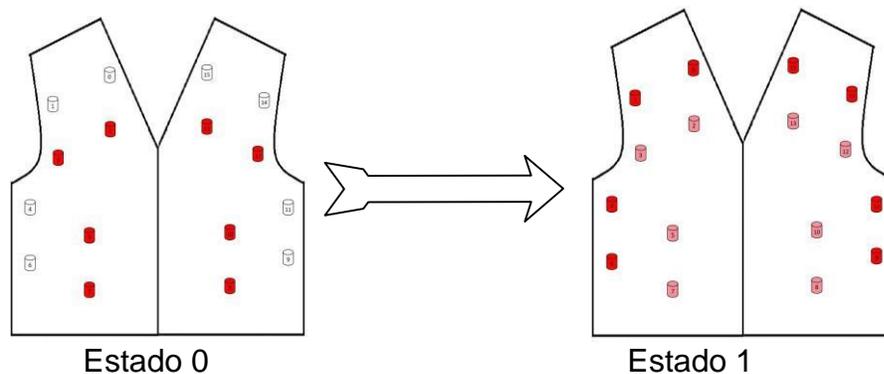
El propósito es que el conductor sea capaz de identificar cada una de las acciones generadas desde la estación de control mediante el dispositivo háptico y aumentar la sensación de realismo cuando se realiza alguna tarea, es decir, las maniobras adelante, atrás, izquierda y derecha son percibidas al momento de ser ejecutadas.

Para llevar este proceso a cabo se generó una determinada secuencia para cada una de estas acciones.

La maniobra “adelante” está constituida por 5 estados que son ejecutados al momento de recibir la acción. Cada uno de los estados activa a un determinado grupo de actuadores vibrotáctiles y tendrá un tiempo de duración entre estados de 50ms.

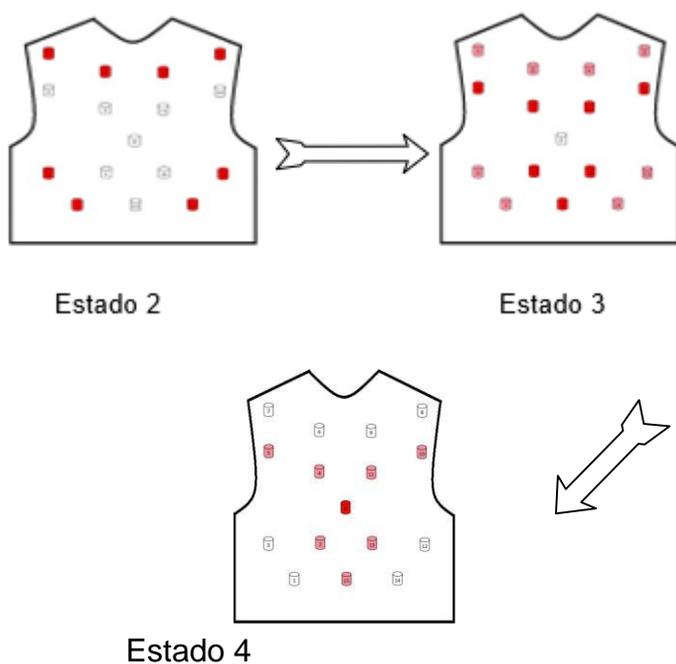
En la ilustración 72 se muestra los estados 0 y 1 de la secuencia, los cuales corresponden a la parte frontal del chaleco.

Ilustración 72 Secuencia de estados de la maniobra “adelante”.



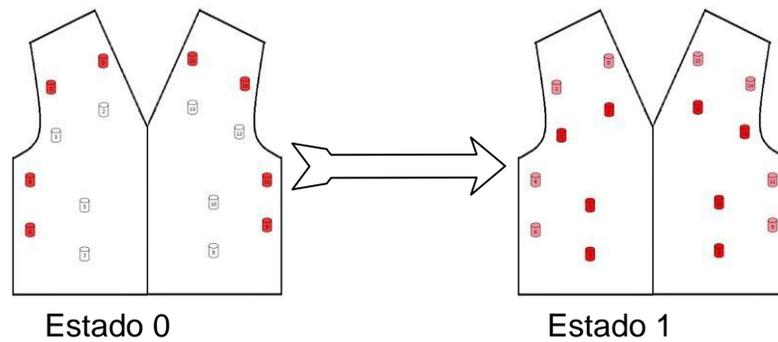
En la ilustración 73 se indica la continuación de la secuencia de la maniobra “adelante”, la misma que está seguida por los estados 2, 3 y 4 que se ubican en la parte de atrás del chaleco.

Ilustración 73 Continuación de la secuencia de estados de la maniobra “adelante”.



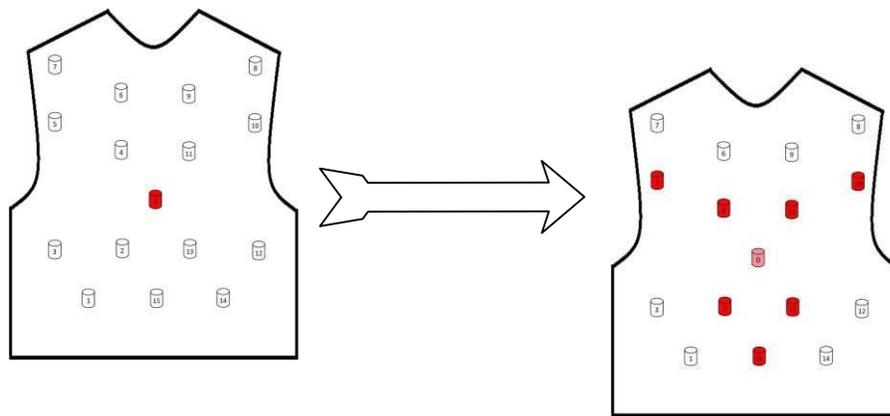
Al igual que la maniobra anterior la maniobra “atrás” está constituida por 5 estados que activan un grupo de actuadores vibrotáctiles con un tiempo de duración entre estados de 50ms. En la ilustración 74 se muestran los 2 primeros estados de la secuencia que involucran los actuadores correspondientes a la parte frontal del chaleco.

Ilustración 74 Secuencia de estados de la maniobra “atrás”.



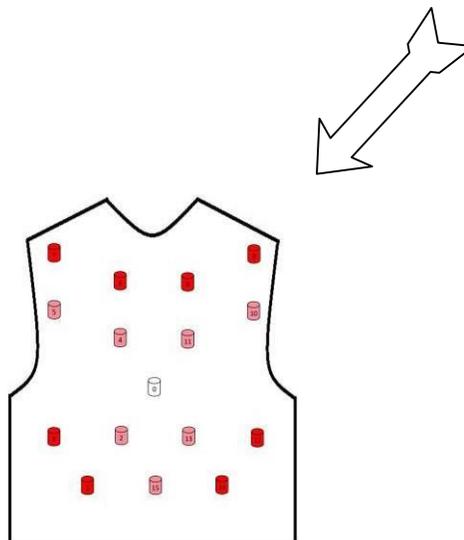
En la ilustración 75 se indica la continuación de la secuencia, la misma que conforma los estados 2, 3 y 4 que se ubican en la parte de atrás del chaleco.

Ilustración 75 La continuación de la secuencia de estados de la maniobra “atrás”.



Estado 2

Estado 3

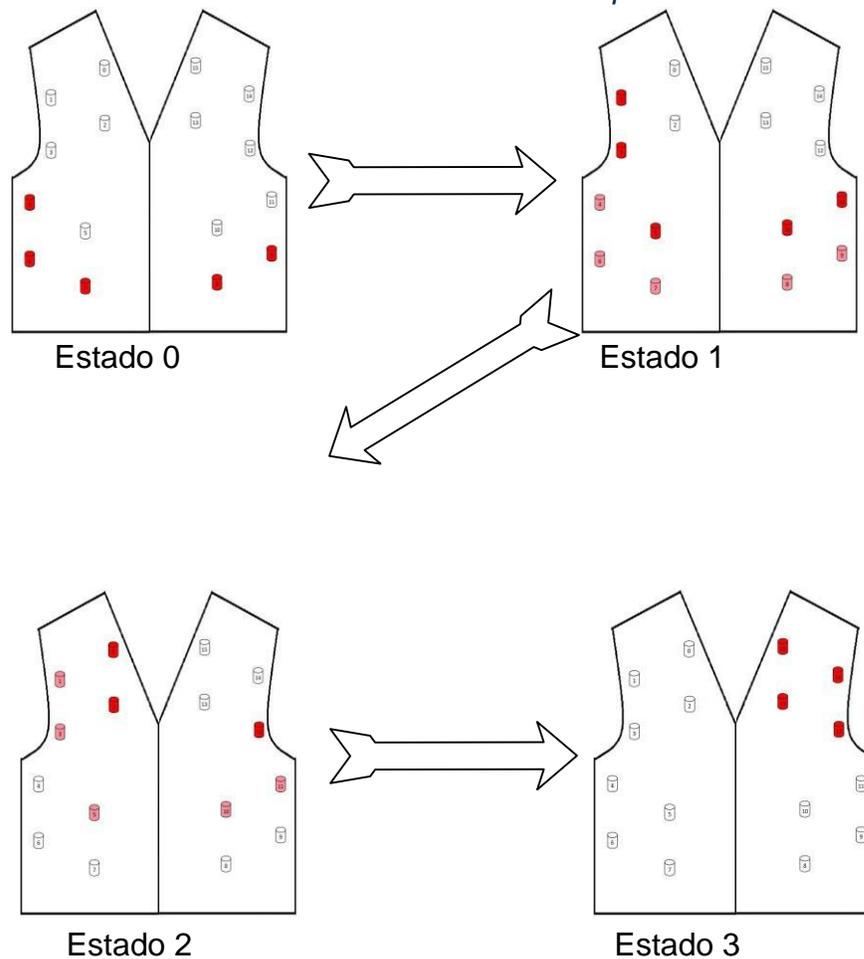


Estado 4

La maniobra “izquierda” está constituida por 8 estados, que son ejecutados al momento de recibir la acción. Cada uno de estos estados activa un grupo de actuadores vibrotáctiles con un tiempo de duración entre estados de 50ms.

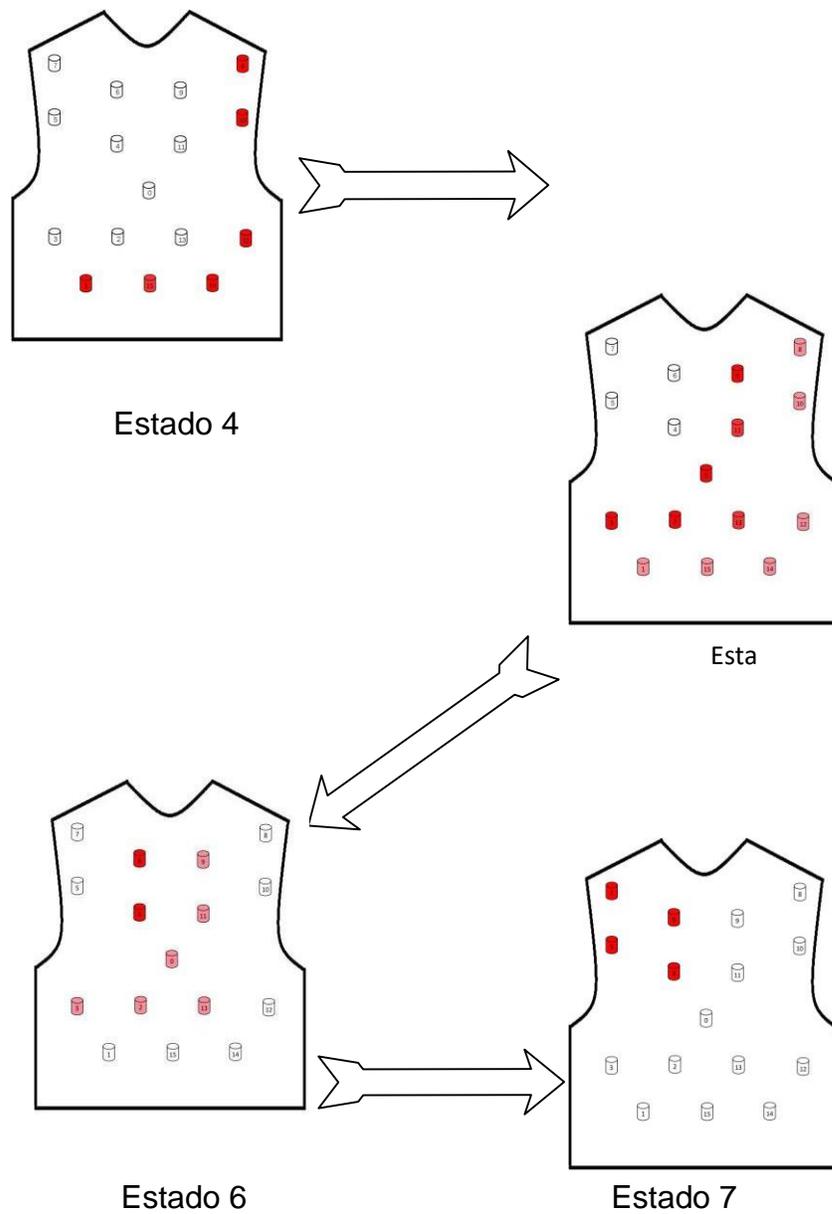
En la ilustración 76 se muestran los primeros cuatro estados de la secuencia, que corresponden a los actuadores de la parte frontal del chaleco.

Ilustración 76 Secuencia de estados de la maniobra “izquierda”.



En la ilustración 77 se indica la continuación de la secuencia “izquierda”, que corresponde a la parte de atrás del dispositivo háptico.

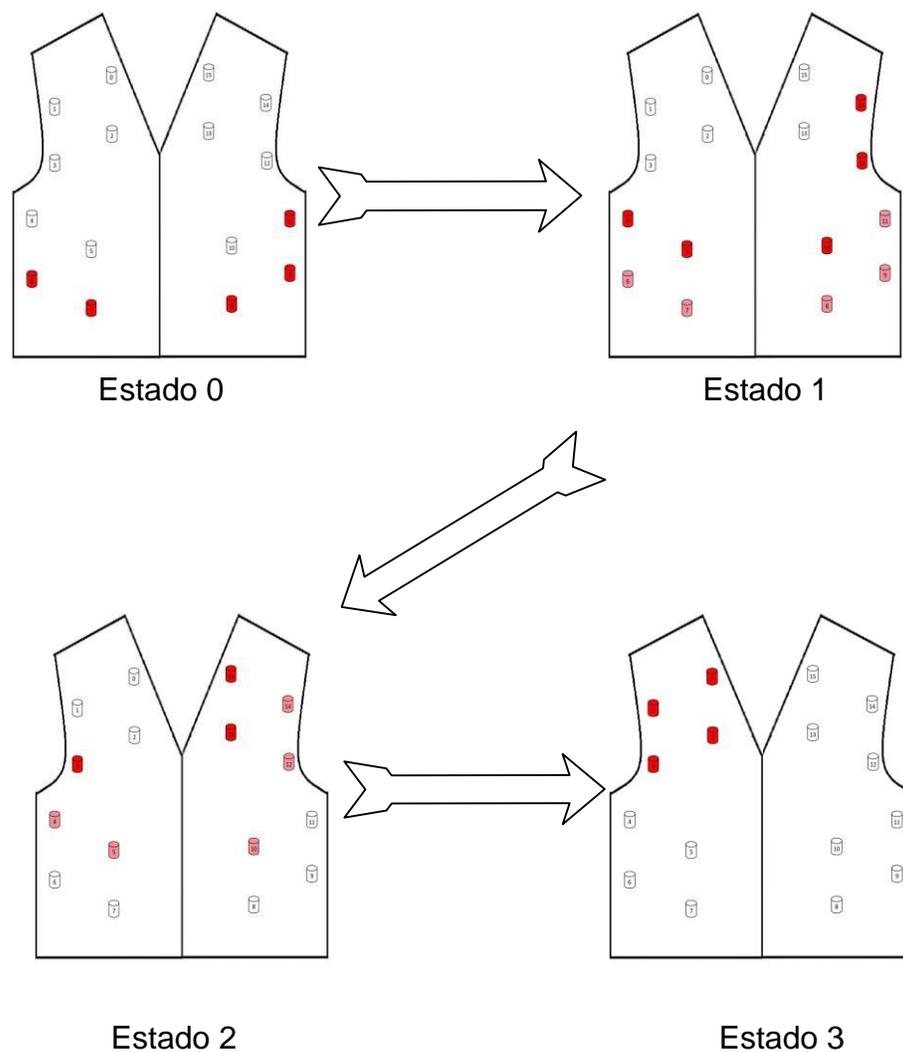
Ilustración 77 Continuación de la secuencia de estados de la maniobra “izquierda”.



Al igual que la maniobra anterior la maniobra “derecha” está formada por 8 estados que activan de igual manera un grupo de actuadores vibrotáctiles con un tiempo de duración entre estados de 50ms.

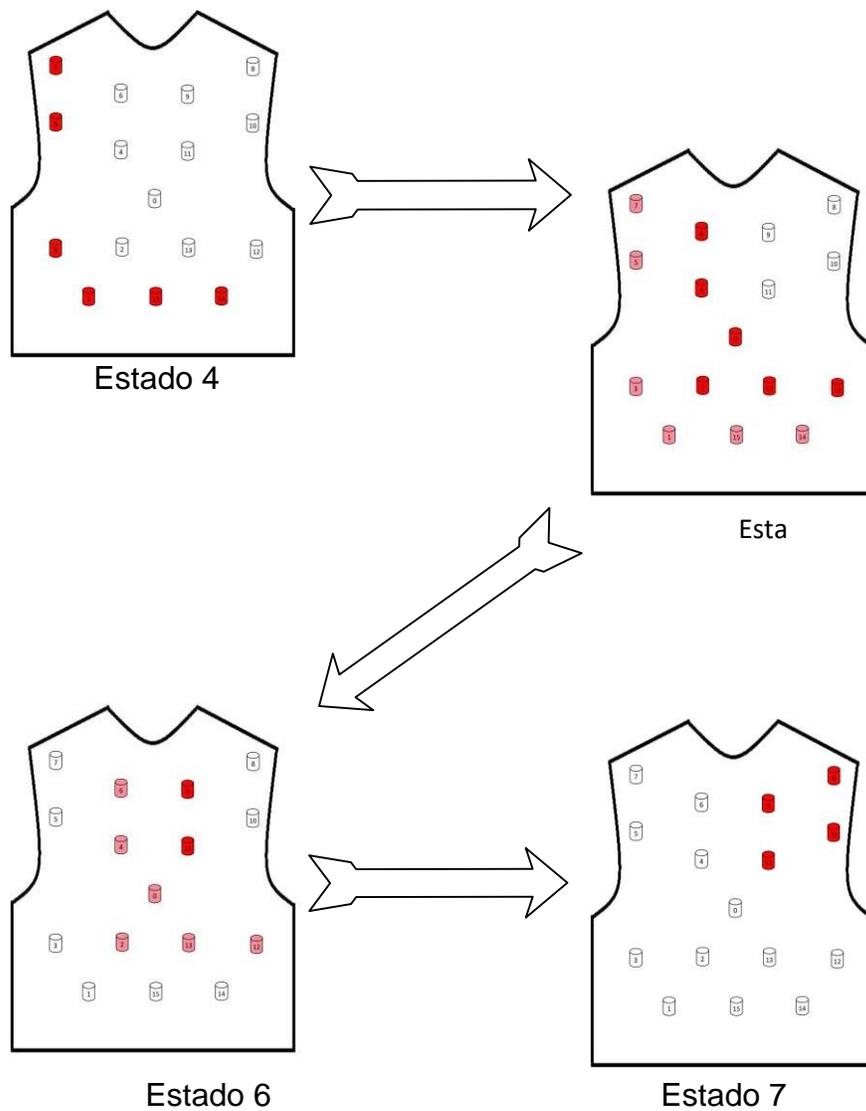
En la ilustración 78 se muestra los primeros estados de la secuencia que involucran los actuadores correspondientes a la parte frontal del chaleco.

Ilustración 78 Secuencia de estados de la maniobra “derecha”.



En la ilustración 79 se indica la continuación de la secuencia “derecha”, que corresponde a la parte de atrás del dispositivo háptico.

Ilustración 79 Continuación de la secuencia de estados de la maniobra “derecha”.



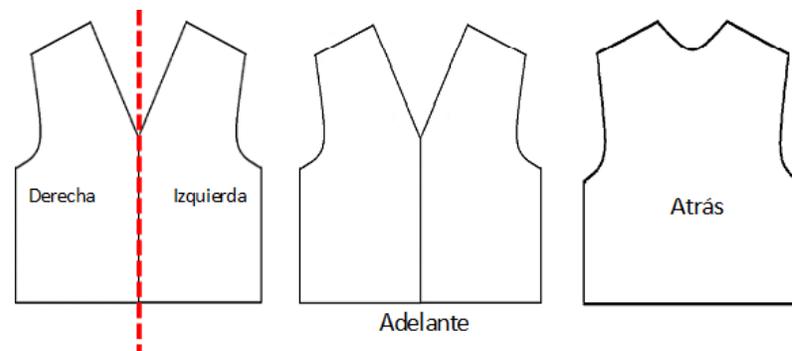
Es importante tener en cuenta que, una vez terminada cualquier secuencia está se repetirá hasta que exista cambio de acción.

Respuestas Topográficas.

El vehículo es capaz de desempeñar tareas en diferentes tipos de superficie, por lo que puede verse afectado por diferentes grados de inclinación. Por lo que este grado de inclinación es percibida e identificada por el conductor. Para lo cual se generó un conjunto de secuencias que responda a estas irregularidades en la superficie. La respuesta del chaleco está dada por los ejes X y Y que son valores conseguidos por la implementación del giroscopio, el mismo que fue explicado anteriormente.

La ilustración 80 detalla las 4 divisiones gráficas que se realizaron en el chaleco para una mejor distribución de los actuadores.

Ilustración 80 Subdivisiones gráficas del dispositivo háptico.



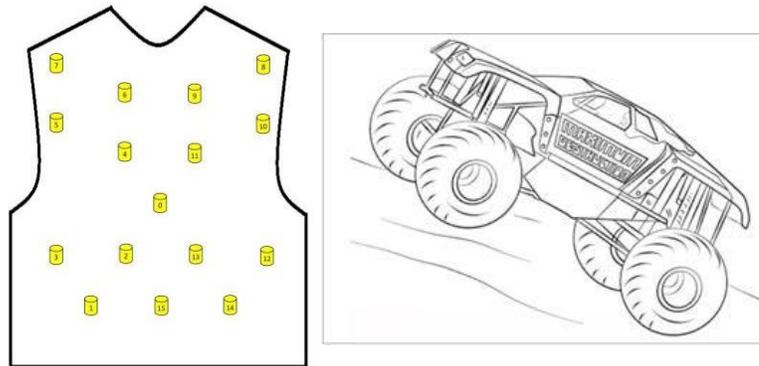
El grado de intensidad de vibración de los actuadores ubicados en las subdivisiones adelante y atrás que se muestran en las Figuras 62 y 63 dependen de los valores del eje Y, si el vehículo se encuentra en ascenso

a una pendiente los valores del eje Y oscilan entre 0 a 90, siendo 90 cuando la pendiente sea máxima. Mientras tanto, si el vehículo se encuentra en descenso los valores oscilan entre 0 a -90, que son procesados para ser enviados a los actuadores.

De este modo, cuando el vehículo esté en ascenso, la intensidad de vibración aumenta en los actuadores ubicados en la parte de atrás del chaleco al conservar el patrón de la maniobra que se ejecuta ya sea adelante, atrás, izquierda o derecha.

La ilustración 81 muestra los actuadores que sufrirán los cambios de intensidad al momento de que el vehículo tenga una elevación ascendente.

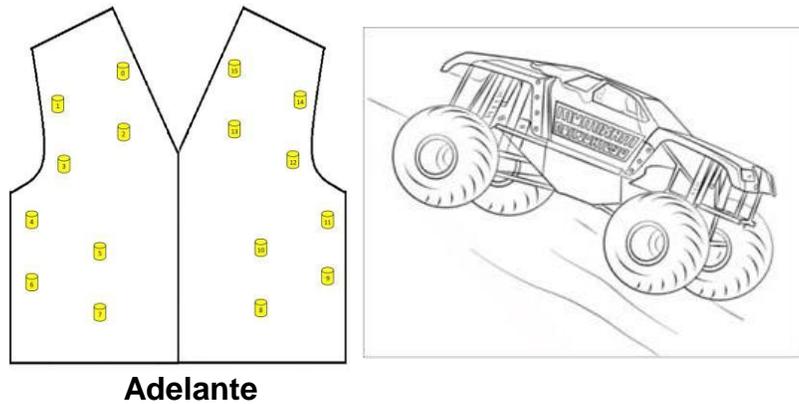
Ilustración 81 Actuadores activados cuando el vehículo ascienda.



Atrás

De manera similar cuando el vehículo esté en descenso, se aumenta la intensidad de vibración de los actuadores en la parte frontal del chaleco al conservar el patrón de la maniobra que se ejecuta. En la ilustración 82 se indica los actuadores que cambiarán su intensidad cuando el vehículo tenga una elevación descendente.

Ilustración 82 Actuadores activados cuando el vehículo descienda.

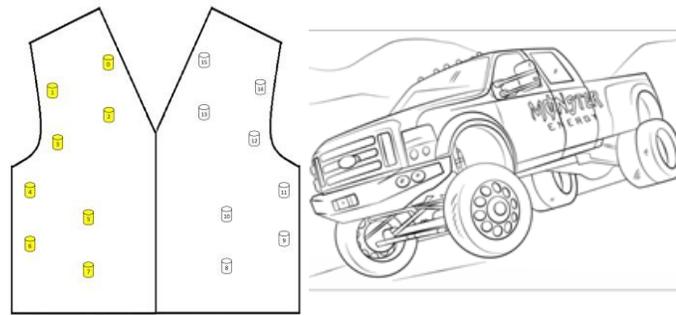


El grado de intensidad de vibración de los actuadores ubicados en las subdivisiones izquierda y derecha dependen de los valores del eje X, si el vehículo presenta un grado de inclinación hacia la izquierda el eje X oscila entre 0 a 90, siendo 90 cuando la inclinación sea máxima. Mientras tanto, si el vehículo presenta un grado de inclinación hacia la derecha los valores oscilan entre 0 a -90, que son procesados para ser enviados a los actuadores.

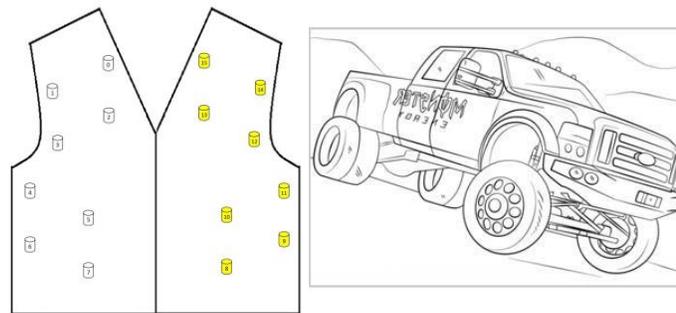
De este modo, cuando el vehículo éste inclinado ya sea a la izquierda o derecha, se aumenta la intensidad de vibración de los actuadores en dicho sector y conservan el patrón de la maniobra que se ejecuta ya sea adelante, atrás, izquierda o derecha.

La ilustración 83 indica los actuadores que cambiarán su intensidad cuando el vehículo se incline a cualquiera de los dos lados.

Ilustración 83 Actuadores activados cuando el vehículo se inclina hacia los lados.



Derecha



Izquierda

Respuestas ante Variación de Velocidad.

Un estímulo fundamental en el diseño del sistema de conducción es la capacidad de percibir los cambios en la velocidad del vehículo. Esta información se obtiene a través de la lectura del sensor encoder, como se explicó previamente. Los valores registrados por este sensor permiten incrementar progresivamente la intensidad de vibración en todos los actuadores distribuidos en el chaleco, sin alterar los patrones previamente establecidos, lo que proporciona una retroalimentación sensorial coherente con la aceleración del vehículo.

CAPÍTULO V

**Más Allá del
Laboratorio: Resultados,
Experiencias y Viabilidad
del Prototipo**

Pruebas y Resultados

El objetivo principal de las pruebas realizadas fue evaluar el rendimiento integral del prototipo de emulación vehicular a escala, validando la respuesta en tiempo real de sus principales componentes: el control del vehículo, la transmisión de video y la activación del dispositivo háptico. Las pruebas se desarrollaron en dos tipos de escenarios —ambientes externos con línea de vista y ambientes internos sin línea de vista—, utilizando redes WiFi en diferentes bandas de frecuencia y estándares del protocolo IEEE 802.11.

Pruebas en Ambiente Externo con Línea de Vista

Estas pruebas se realizaron en las canchas aledañas al Coliseo General Miguel Iturralde, en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. El objetivo fue determinar el alcance efectivo de funcionamiento del prototipo en un entorno libre de obstáculos físicos significativos y con baja interferencia de redes inalámbricas.

La estación de control y el punto de acceso (AP) se ubicaron en el Punto A, y el vehículo inició su recorrido desde una distancia de 10 metros, aumentando progresivamente cada 10 metros hasta observar retardos o pérdida de comunicación. Se utilizó la aplicación **WiFi Analyzer** para escanear el espectro y comprobar la ocupación de canales en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz.

Resultados por Estándar de Red

- **IEEE 802.11n:**
 - Retardo perceptible: 83 m
 - Pérdida total de comunicación: 95 m
- **IEEE 802.11g:**
 - Retardo perceptible: 91 m
 - Pérdida total de comunicación: 102 m
- **IEEE 802.11b:**
 - Retardo perceptible: 105 m

- Pérdida total de comunicación: 112 m

Estos resultados indican que el estándar IEEE 802.11b, a pesar de ser más antiguo, presentó mayor alcance en este tipo de entorno, posiblemente debido a su menor susceptibilidad a interferencias y mejor penetración.

Pruebas en Ambiente Interno sin Línea de Vista

Las pruebas en interiores se llevaron a cabo en un domicilio ubicado en el sector Atahualpa, al sur de Quito. Este entorno representa un escenario típico de alta interferencia por redes vecinas y múltiples obstáculos físicos como paredes y muebles.

El área total de construcción del inmueble es de aproximadamente 600 m². El vehículo fue conducido a lo largo de todas las estancias del lugar mientras se evaluaba la pérdida progresiva de señal.

Resultados por Estándar de Red

- **IEEE 802.11n:**
 - Retardo perceptible: 12 m
 - Pérdida total de comunicación: 14 m
- **IEEE 802.11g:**
 - Retardo perceptible: 17.5 m
 - Pérdida total de comunicación: 19 m
- **IEEE 802.11b:**
 - Retardo perceptible: 20 m
 - Pérdida total de comunicación: 23 m

En este contexto, el estándar IEEE 802.11b volvió a destacar como el de mayor alcance, mostrando su eficacia en ambientes donde predominan los obstáculos físicos.

Pruebas de Transmisión de Video en Banda de 5GHz

La transmisión de video en tiempo real se realizó mediante la aplicación **IP Webcam**, que permitió ajustar distintos parámetros para observar el impacto en el desempeño. Se evaluaron tres resoluciones:

Resolución	Calidad de video	FPS	Alcance estimado
1280x720	30/100	Sin límite	70 m
640x480	30/100	Sin límite	90 m
320x240	30/100	Sin límite	100 m

Como era de esperarse, a menor resolución se logró mayor alcance de transmisión, evidenciando un compromiso entre calidad visual y estabilidad de la conexión.

Análisis en Ambiente Externo con Línea de Vista

Para contrastar la efectividad real del prototipo en ambientes abiertos, se compararon los valores de alcance obtenidos en las pruebas con los valores teóricos, utilizando un modelo de propagación adaptado a redes WLAN en frecuencia de 2.4 GHz para áreas abiertas, según la fórmula de pérdidas propuesta por Molina Reino (2017):

$$L(\text{dB}) = 51.93 + 22.59 \log(d)$$

Donde d es la distancia en metros.

El cálculo del alcance teórico consideró además el balance de enlace:

$$PRx = PTx + GATx + GARx - L(\text{dB})$$

Donde:

- PRx es la potencia de recepción, calculada como la suma de la sensibilidad del receptor (S) más un margen de seguridad (M).
- PTx , $GATx$, y $GARx$ corresponden respectivamente a la potencia de transmisión y las ganancias de antena en transmisión y recepción.

Los resultados experimentales y teóricos se sintetizan en la Tabla 9:

Tabla 2 Resultados en ambientes con línea de vista

Estándar	Sistema	Banda	RSSI	Alcance teórico	Alcance obtenido
IEEE 802.11b	Vehículo y dispositivo háptico	2.4 GHz	-78 dBm	109.50 m	< 105 m
IEEE 802.11g	Vehículo y dispositivo háptico	2.4 GHz	-70 dBm	93.97 m	< 91 m
IEEE 802.11n	Vehículo y dispositivo háptico	2.4 GHz	-69 dBm	84.87 m	< 83 m

Se observó que, al configurar el sistema bajo el estándar IEEE 802.11b, el vehículo logró operar sin fallos perceptibles hasta una distancia cercana a los 105 metros, evidenciando una señal superior a -78 dBm. Bajo el estándar IEEE 802.11g, el alcance fue de hasta 91 metros, mientras que en el caso de IEEE 802.11n, se alcanzaron 83 metros de operación estable. Los márgenes de error se calcularon con la fórmula:

$$\% \text{ error} = (|\text{valor obtenido} - \text{valor real}| / \text{valor real}) \times 100$$

Tabla 3 Margen de error en ambientes externos

Estándar	Valor real	Valor obtenido	% error
IEEE 802.11b	109.50 m	< 105 m	4.11%
IEEE 802.11g	93.97 m	< 91 m	3.16%
IEEE 802.11n	84.87 m	< 83 m	2.20%

Estos resultados reflejan que, a pesar de ser una tecnología más antigua, el estándar IEEE 802.11b sigue ofreciendo un desempeño aceptable en condiciones de visibilidad directa, lo que lo convierte en una opción viable cuando se prioriza el alcance sobre la velocidad de transmisión.

Análisis en Ambiente Interno sin Línea de Vista

Para ambientes cerrados, se utilizó el modelo de propagación **UIT-R** para interiores (Castro & Jaramillo, 2013), que incorpora pérdidas por obstáculos físicos y por penetración de pisos:

$$L(\text{dB}) = 20 \log(f) + 30 \log(d) + Lf(n) - 28,$$

con $Lf(n) = 15 + 4(n - 1)$

Donde:

- f es la frecuencia en MHz,
- d la distancia en metros,
- n el número de pisos penetrados.

Los valores teóricos y obtenidos se presentan en la Tabla 11:

Tabla 4 Resultados obtenidos en ambientes sin línea de vista

Estándar	Sistema	Banda	RSSI	Alcance teórico	Alcance obtenido
IEEE 802.11b	Vehículo y dispositivo háptico	2.4 GHz	-76 dBm	20.57 m	< 20 m
IEEE 802.11g	Vehículo y dispositivo háptico	2.4 GHz	-72 dBm	18.34 m	< 17.5 m
IEEE 802.11n	Vehículo y dispositivo háptico	2.4 GHz	-69 dBm	12.49 m	< 12 m

Los resultados muestran que, incluso en ambientes sin línea de vista, el sistema mantuvo una operación estable hasta cerca de los 20 metros (IEEE 802.11b), evidenciando su robustez ante obstáculos. La precisión entre los valores teóricos y experimentales se refleja en los márgenes de error de la Tabla 12:

Tabla 5 Margen de error en ambientes internos

Estándar	Valor real	Valor obtenido	% error
IEEE 802.11b	20.57 m	< 20 m	2.79%
IEEE 802.11g	18.34 m	< 17.5 m	4.57%
IEEE 802.11n	12.49 m	< 12 m	3.95%

Se concluye que el rendimiento del sistema se mantiene dentro de márgenes de error aceptables, destacándose nuevamente el estándar IEEE 802.11b como el más estable frente a las condiciones adversas de propagación.

Análisis de Transmisión de Video en Banda de 5 GHz

El desempeño del sistema de transmisión de video se evaluó modificando la resolución y la calidad de imagen mediante la aplicación **IP Webcam**. Los resultados indicaron que, a mayor resolución, la estabilidad de transmisión disminuye, lo que afecta directamente la capacidad de conducción del vehículo en tiempo real, especialmente al realizar maniobras rápidas.

Las resoluciones de **1280x720** y **640x480** presentaron interrupciones esporádicas en la imagen al superar los 70 y 90 metros respectivamente. En cambio, la resolución **320x240** con calidad de video al 30% ofreció una experiencia de conducción más fluida y confiable, sin pérdida de detalles esenciales para la interpretación del entorno.

Este resultado evidencia un compromiso necesario entre calidad de imagen y estabilidad de transmisión. Aunque es posible operar con resoluciones más altas disminuyendo la calidad del video, ello implica una pérdida considerable en la percepción de objetos, lo que compromete la seguridad y efectividad de la conducción remota.

Evaluación de percepción del dispositivo háptico

Con el propósito de evaluar la eficacia y la calidad de experiencia del dispositivo háptico —un chaleco diseñado para complementar la conducción remota del vehículo a escala— se diseñó una encuesta orientada a usuarios con alguna familiaridad con este tipo de sistemas. El objetivo fue recoger percepciones subjetivas sobre aspectos clave como comodidad, utilidad, respuesta háptica y calidad del entorno de conducción mediado por tecnología.

Determinación del tamaño muestral

Para establecer un tamaño de muestra adecuado, se utilizó la siguiente fórmula estadística:

$$n = \frac{Z^2\sigma^2N}{e^2(N-1) + Z^2\sigma^2},$$

donde:

n = tamaño de la muestra poblacional.

N = tamaño de la población total.

σ = desviación estándar de la población.

Z = valor constante mediante niveles de confianza.

e = límite aceptable de error muestral.

Con estos parámetros, el tamaño de muestra ideal fue de 92 personas. Sin embargo, debido a restricciones impuestas por la emergencia sanitaria global (COVID-19), solo fue posible aplicar la encuesta a 12 personas. Aunque el tamaño reducido limita la generalización de los resultados, ofrece una valiosa visión exploratoria sobre la experiencia del usuario.

Resultados de la encuesta

A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada una de las nueve preguntas aplicadas a los participantes:

1. ¿El dispositivo fue invasivo?

El 83.33% de los encuestados indicó que el chaleco no fue percibido como invasivo. Este dato es relevante, ya que la comodidad del usuario es un aspecto esencial para la adopción de tecnologías inmersivas.

2. ¿Percibió los diferentes cambios de vibración mientras conducía el vehículo?

El 91.67% de los usuarios (11 de 12) afirmó haber notado los cambios de vibración, lo que indica que el sistema es perceptible y sensible a las variaciones contextuales del entorno de conducción.

3. ¿El chaleco mejoró su experiencia al momento de manejar el vehículo?

El 83.33% consideró que la experiencia de conducción fue enriquecida gracias al dispositivo háptico, lo cual respalda su utilidad como herramienta sensorial complementaria.

4. ¿Siente que los estímulos que recibe son suficientes?

El 75% respondió afirmativamente. Un 16.67% opinó que debería reducirse la vibración, mientras que un 8.33% señaló que esta podría ser más intensa. Estos resultados revelan una experiencia mayormente positiva, aunque con matices personales que podrían guiar futuros ajustes de calibración.

5. ¿En una escala del 1 al 5, considera que las vibraciones son sincrónicas con el movimiento del vehículo?

Las respuestas oscilaron entre 4 y 5, reflejando una percepción generalizada de sincronía entre el feedback táctil y el comportamiento vehicular.

6. ¿Considera que el chaleco es un distractor o un apoyo para el sistema de manejo?

El 83.33% de los participantes lo considera un apoyo valioso, reafirmando la potencialidad del sistema háptico para aumentar la inmersión sin generar distracción.

7. ¿Consideraría aumentar el número de puntos de vibración en el dispositivo háptico?

Solo una persona mostró interés en incrementar la cantidad de puntos de vibración, lo que sugiere que el número actual es percibido como adecuado por la mayoría.

8. ¿Considera que la interfaz del vehículo es amigable?

Un 91.67% respondió afirmativamente, lo que evidencia un diseño de interfaz intuitivo, accesible y funcional.

9. ¿Cómo considera la calidad del video?

El 66.67% calificó la calidad del video como buena, un 25% como muy buena, y un 8.33% como regular. Este aspecto es clave, ya que una buena calidad de video mejora la orientación visual durante la conducción y la interpretación del entorno.

A pesar del tamaño limitado de la muestra, los resultados indican una aceptación positiva del sistema háptico por parte de los usuarios. La percepción de utilidad, sincronía, y comodidad refuerzan el valor del dispositivo como complemento sensorial en escenarios de conducción remota. Esta retroalimentación es especialmente valiosa para el perfeccionamiento del prototipo, y abre posibilidades para explorar su aplicación en entornos formativos, terapéuticos o de simulación vehicular avanzada.

Análisis de Costo

El análisis de costo del prototipo desarrollado tiene como objetivo identificar y desglosar el valor económico de cada uno de los sistemas que lo conforman. Este análisis se centra únicamente en los componentes de hardware, excluyendo

el software, ya que las plataformas empleadas —como Node-RED y Arduino— son de libre acceso y no representan un gasto económico adicional.

Costo del Dispositivo Háptico

El dispositivo háptico constituye uno de los componentes clave del prototipo, dado que permite la retroalimentación táctil al usuario. En la Tabla 6 se presenta el detalle del costo de los materiales empleados en su construcción, los cuales incluyen actuadores vibrotáctiles, microcontroladores, módulos electrónicos y elementos estructurales como baquelita, impresión y modelado 3D.

Tabla 6 Costo de materiales del Dispositivo Háptico

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Subtotal
32	Actuadores vibrotáctiles	\$2.87	\$91.84
1	Regulador de voltaje	\$8.00	\$8.00
2	Módulo PCA9685	\$12.00	\$24.00
1	Microcontrolador ESP8266	\$10.00	\$10.00
1	Batería Lipo	\$40.00	\$40.00
2	Baquelita	\$20.00	\$40.00
1	Impresión 3D	\$40.00	\$40.00
1	Modelado 3D	\$20.00	\$20.00
1	Malla plástica	\$20.00	\$20.00
1	Corosil	\$18.00	\$18.00
1	Insumos electrónicos	\$30.00	\$30.00
	TOTAL		\$341.84

Costo del Sistema Vehicular

El sistema vehicular, que representa la estructura móvil del prototipo, está compuesto por un carro a escala modificado, sensores, módulos de comunicación y procesamiento, además de componentes electrónicos de soporte. En la Tabla 7 se detalla el valor de cada uno de estos elementos.

Tabla 7 Costo de materiales del Sistema Vehicular

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Subtotal
1	Carro Luctan	\$77.00	\$77.00
1	Microcontrolador ESP8266	\$10.00	\$10.00
1	Batería Lipo	\$40.00	\$40.00
1	Módulo Encoder FC-03	\$5.00	\$5.00
1	Giroscopio MPU6050	\$7.00	\$7.00
1	Puente H L298N	\$8.00	\$8.00
1	Arduino Nano	\$9.00	\$9.00
1	Impresión 3D	\$20.00	\$20.00
1	Modelado 3D	\$10.00	\$10.00
1	Ventilador	\$5.00	\$5.00
1	Teléfono Huawei	\$200.00	\$200.00
1	Insumos electrónicos	\$10.00	\$10.00
	TOTAL		\$401.00

Costo del Sistema de Comunicación

El sistema de comunicación utilizado en el prototipo se basa en tecnología WiFi para garantizar la transmisión en tiempo real entre el vehículo y la estación

de control. Para ello, se empleó un router de alta capacidad, como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 8 Costo de materiales del Sistema de Comunicación

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Subtotal
1	Router TP-Link AC-1350	\$60.00	\$60.00
	TOTAL		\$60.00

Costo de la Estación de Control

La estación de control es la interfaz física a través de la cual el usuario interactúa con el sistema. Esta incluye elementos como volante y pedales, necesarios para una simulación de conducción más realista. Su costo se resume en la Tabla 16.

Tabla 9 Costo de materiales de la Estación de Control

Cantida	Descripción	Precio Unitario	Subtotal
1	Volante y pedales	\$50.00	\$50.00
	TOTAL		\$50.00

Costo Total del Prototipo

Finalmente, en la Tabla 17 se presenta el resumen del costo total de todos los subsistemas que integran el prototipo completo de conducción remota con retroalimentación háptica.

Tabla 10 Costo total del prototipo

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Subtotal
1	Sistema vehicular	\$401.00	\$401.00
1	Dispositivo háptico	\$341.84	\$341.84
1	Sistema de comunicación	\$60.00	\$60.00
1	Estación de control	\$50.00	\$50.00
	TOTAL		\$852.84

Este análisis de costos permite dimensionar los recursos invertidos en la elaboración del prototipo y, a su vez, sirve como referencia para futuras implementaciones o mejoras del sistema.

CAPÍTULO VI

**El Futuro Conectado:
Lo que Aprendimos y lo
que Viene**

Conclusiones y Futuro

¿Qué se logró?

El desarrollo del prototipo de conducción vehicular a escala, basado en telepresencia e inmersión, permitió integrar exitosamente diversas tecnologías de comunicación, sensorización y retroalimentación háptica en un solo sistema funcional. La combinación del protocolo MQTT para la organización de datos sensoriales y del protocolo UDP para la comunicación háptica logró una experiencia de conducción remota fluida, con mínima latencia y alta capacidad de respuesta.

Los valores registrados por los sensores del giroscopio y el encoder se tradujeron en estímulos vibrotáctiles, facilitando una percepción física en tiempo real de variables como la inclinación del vehículo y su velocidad. El uso de actuadores distribuidos estratégicamente en el dispositivo háptico, junto con su respuesta proporcional a los datos, permitió alcanzar un alto nivel de aceptación y percepción de inmersión por parte de los usuarios.

Además, el análisis de conectividad mediante pruebas en entornos internos y externos demostró que el estándar IEEE 802.11b ofrece una cobertura adecuada para el tipo de operaciones del sistema, con errores mínimos respecto a los modelos teóricos de propagación. En cuanto a la transmisión de video, la resolución de 320x240 en la banda de 5 GHz se consolidó como la más estable y eficiente para mantener la percepción visual sin comprometer el rendimiento general del sistema.

La retroalimentación obtenida en las pruebas con usuarios, aunque limitada por las restricciones sanitarias globales, evidenció que el dispositivo háptico fue percibido como cómodo, no invasivo, y complementario a la experiencia de conducción. El sistema completo resultó eficaz en la

teleoperación y en la transmisión sensorial remota, cumpliendo con los objetivos propuestos en el proyecto.

¿Qué se podría mejorar?

Pese a los logros alcanzados, existen oportunidades claras de mejora. La principal reside en la miniaturización y portabilidad de la estación de control. Aunque funcional, su tamaño podría reducirse significativamente al migrar la interfaz de control a dispositivos móviles con sistemas Android, aprovechando la compatibilidad multiplataforma de Node-RED. Esto abriría paso a soluciones más versátiles y ergonómicas.

Otro aspecto por mejorar es la resolución de video. Aunque se optó por configuraciones que privilegiaron la estabilidad de conexión, futuras versiones del sistema podrían incorporar opciones más robustas para ajustar dinámicamente la calidad del video en función del ancho de banda disponible.

También se identificó la necesidad de considerar más variables hápticas. El sistema actual basa su respuesta exclusivamente en vibración, sin incorporar otras sensaciones físicas que enriquecerían la experiencia. La introducción de sensores ambientales como temperatura, humedad o proximidad permitiría diversificar los tipos de estímulos hápticos y aumentar la fidelidad del entorno simulado.

Finalmente, sería recomendable aumentar la muestra poblacional en futuras pruebas para obtener resultados estadísticamente representativos y robustos sobre la percepción del usuario.

Potenciales aplicaciones

La versatilidad del prototipo permite visualizar múltiples aplicaciones futuras en distintos ámbitos de la sociedad:

Operaciones de rescate:

En escenarios de riesgo como zonas afectadas por desastres naturales o estructuras colapsadas, la posibilidad de teleoperar un vehículo con retroalimentación háptica en tiempo real permitiría a los operadores explorar áreas peligrosas sin exponerse directamente. Sensores adicionales podrían detectar gases tóxicos, calor o estructuras inestables, y transmitir esta información táctilmente al operador.

Educación técnica y profesional:

Este tipo de prototipos puede ser integrado en programas de formación en robótica, electrónica, mecatrónica o ingeniería. La experiencia inmersiva mediante el uso de un sistema háptico no solo facilita el aprendizaje práctico, sino que también estimula el pensamiento crítico y la resolución de problemas en contextos reales simulados.

Simuladores de conducción avanzada:

El sistema puede acoplarse a simuladores de conducción comercializados actualmente, integrando retroalimentación física y visual con sistemas de mecánica compleja (actuadores, amortiguadores, pantallas envolventes). Esto permitiría crear experiencias realistas tanto para entrenamiento de conductores como para estudios en ergonomía, psicología del tránsito o diseño de infraestructura vial.

Aplicaciones industriales y médicas:

Mediante la incorporación de brazos robóticos y sistemas hápticos avanzados, el concepto puede adaptarse a entornos de precisión como laboratorios de análisis químico o quirófanos robotizados, donde la percepción táctil remota es esencial para garantizar la seguridad y precisión en tareas delicadas.

Exploración y vigilancia remota:

La incorporación de visión computacional y algoritmos de reconocimiento de objetos abre la posibilidad de usar este sistema para patrullaje autónomo, inspección de maquinaria pesada o vigilancia ambiental en espacios de difícil acceso o con condiciones extremas.

En definitiva, este proyecto representa una base sólida para el desarrollo de soluciones tecnológicas que integren la inmersión sensorial con la tele operación. Su potencial para adaptarse a distintas disciplinas lo convierte en una plataforma abierta para la innovación, tanto en el ámbito académico como en el profesional e industrial.

Referencias

- Aguirre, M. E. (2018). *Emulador a escala de un sistema remoto de conducción vehicular terrestre mediante la transferencia de su dinámica*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí.
- Asuni, N. (2017). *electroncaptv*. Obtenido de <http://www.electroncaptv.com/modulo-puente-h-driver-l298n-para-motores-paso-a-paso-detail?tmpl=component&format=pdf>
- Atmoko, R., Riantini, R., & Hasin, M. (2017). IoT real time data acquisition using MQTT protocol. *Shipbuilding Institute of Polytechnic Surabaya*, Indonesia.
- Bodenhamer, A. (2012). *Development of an immersive training vest*. Charlottesville: IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium.
- Borja Díaz, M. (2015). *Uart Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- Carrión, J. (2017). *Diseño de una interfaz para la captura de patrones de vibración hápticos*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Castro, L. E., & Jaramillo, A. L. (2013). Métodos de diseño y cobertura para redes wifi indoor y outdoor, caso UTPL. *Loja*.
- Castromonte, P., & Sanchez, Á. (2016). *Desarrollo de una interfaz háptica con patrones de estímulos vibrotáctiles*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid.
- Ceja, J., Renteria, R., Ruelas, R., & Ochoa, G. (2017). Módulo ESP8266 y sus aplicaciones en el internet de las cosas. *ECOFRAN*, 72.
- Cornejo, J., Vargas, M., & Cornejo Aguilar, J. (2020). Aplicaciones innovadoras de la robótica y biomédica en la salud pública durante la pandemia del Covid-19. *Revista de la Facultad de Medicina Humana*, 20.
- García, V. (Marzo de 2018). *Configurar el MPU6050*. Obtenido de <https://www.diarioelectronico hoy.com/blog/configurar-el-mpu6050>
- GPTOYS. (2015). *Luctan S912*. (GPTOYS, Editor) Obtenido de https://g-p.hk/maual/912/s912Manual_new-connector.pdf
- Herrera Lozada, J. C. (2010). *Teoría PWM (Modulación por Ancho de Pulsos)*. México.

- Hoffmann, R., Valgeirsdóttir, V., Jóhannesson, O., Unnthorsson, R., & Kristjánsson, A. (2018). Measuring relative vibrotactile spatial acuity: Effects of tactor type, anchor points and tactile anisotropy.
- Játiva, J. E., & Morales, S. J. (2018). *Encendido y apagado de un foco con atenuación desde cayenne y un módulo ESP 8266*. Universidad Politécnica Salesiana, Quito.
- Kofman, J., Wu, X., Luu, T., & Verma, S. (2005). Teleoperation of a robot manipulator using a vision-based human-robot interface. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- Lacroix, R., Greenish, M., & Ramsay, B. (2014). *California, Estados Unidos Patente nº 8.791.799 B2*.
- LANTRONIX. (Diciembre de 2017). *LANTRONIX*. Obtenido de https://www.lantronix.com/wp-content/uploads/pdf/Using-Wi-Fi-SoftAP-for-Network-Setup-and-Gateway-Provisioning_FINAL-1.pdf
- Llamas, L. (Septiembre de 2016). *Determinar la orientación con Arduino y el IMU MPU-6050*. Obtenido de <https://www.luisllamas.es/arduino-orientacion-imu-mpu-6050/>
- Marca. (22 de abril de 2020). *Marca*. Obtenido de <https://www.marca.com/claromx/trending/2020/04/22/5ea055aee2704e34308b45a0.html>
- McMahan, A. (2003). Immersion, engagement, and presence: A method for analyzing 3-D video games (67-86 ed.). New York.
- Mechatronics, N. (2018). *Sensor Encoder Infrarrojo FC-03*. Obtenido de <https://naylorlampmechatronics.com/robotica-movil/240-encoder-infrarrojo.html>
- Mihelj, M., & Podobnik, J. (2012). *Haptics for Virtual Reality and Teleoperation* (Vol. 64). New York.
- Molina Reino, M. A. (2017). *Modelo de propagación para la ciudad de Cuenca (Ecuador), en redes WLAN operando en 2.4GHz y 5.8GHz, en ambientes exteriores*. Guayaquil.
- Node-RED. (2020). *node-red-dashboard*. Obtenido de <https://flows.nodered.org/node/node-red-dashboard>
- Nuño Ortega, E., & Basañez Villaluenga, L. (2004). *Teleoperación de Robot: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

- NXP Semiconductors. (Julio de 2009). *PCA9685*. Obtenido de <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/PCA9685.pdf>
- Rojas, C. (2006). *Diseño y simulación de técnicas de modulación PWM natural para el control de motores trifásicos*. Universidad de Pamplona, Pamplona.
- Sancho, P. (Abril de 2020). *Fundamentos de Node-Red*. Obtenido de <https://www.techedgegroup.com/es/blog/fundamentos-node-red>
- Stallings, W. (2008). *Comunicaciones y Redes de Computadores*. México.
- Torres, J. R., Pérez, J. S., Camargo, E., & Padilla, M. Á. (2018). *Dispositivo háptico vibrotáctil inalámbrico para asistencia de actividades motoras*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
- TP-LINK. (2016). www.static.tp-link.com. Obtenido de [https://static.tp-link.com/res/down/doc/Archer_C60\(EU\)_V1_UG.pdf](https://static.tp-link.com/res/down/doc/Archer_C60(EU)_V1_UG.pdf)
- Velázquez, F. (15 de abril de 2020). *El Universal*. Obtenido de <https://www.eluniversal.com.mx/autopistas/coronavirus-vehiculos-autonomos-y-su-importancia-ante-la-pandemia>

GLOSARIO DE TERMINOS

Ciberfísico

Sistema que combina componentes físicos con sistemas computacionales, como robots, sensores o dispositivos controlados a distancia, utilizados en aplicaciones de automatización y control.

Chaleco háptico

Dispositivo portátil que proporciona retroalimentación táctil al usuario mediante vibraciones o presión, utilizado en simuladores o entornos de entrenamiento para ofrecer una experiencia inmersiva.

Escala reducida

Representación o modelo de un objeto o sistema en una proporción más pequeña que el original, utilizada en simulaciones o pruebas experimentales.

Emulador de conducción vehicular

Sistema que simula el comportamiento y las características de un vehículo en un entorno virtual o a escala reducida, con el objetivo de entrenar o probar conductores sin el riesgo de un entorno real.

Estímulos táctiles

Señales físicas transmitidas a través del sentido del tacto, como vibraciones, presión o temperatura, para comunicar información al usuario en un entorno virtual o físico.

Interfaz háptica

Dispositivo o sistema que utiliza estímulos táctiles (como vibraciones o presión) para proporcionar retroalimentación física al usuario durante una interacción con un entorno virtual o una máquina remota.

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)

Protocolo de mensajería ligero y basado en el patrón de publicación/suscripción, utilizado principalmente en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) para transmitir datos en tiempo real.

Modulación por Ancho de Pulsos (PWM)

Técnica de modulación utilizada para controlar la potencia entregada a una carga, ajustando el ancho de los pulsos de señal digital, muy utilizada en el control de motores eléctricos y en la transmisión de señales en comunicaciones.

Protocolos de comunicación

Conjunto de reglas y normas que definen cómo se envían, reciben y gestionan los datos entre dispositivos en una red, como el protocolo MQTT utilizado en el Internet de las Cosas (IoT).

Realidad virtual (VR)

Tecnología que crea entornos tridimensionales interactivos que el usuario puede explorar y manipular, generalmente a través de un dispositivo de visualización como un casco o gafas VR.

Redes IoT (Internet of Things)

Sistema de dispositivos interconectados a través de Internet, que pueden recopilar y compartir datos, como sensores, actuadores y otros dispositivos inteligentes.

Redes WLAN (Wireless Local Area Network)

Red local que utiliza ondas de radio para conectar dispositivos sin necesidad de cables, permitiendo la transmisión de datos de manera inalámbrica.

Sensores inerciales (IMU)

Dispositivos que miden la aceleración y la rotación, utilizados en sistemas de navegación y control para detectar la orientación, la velocidad y la aceleración de un objeto.

Simulación de dinámicas vehiculares

Reproducción digital del comportamiento físico y mecánico de un vehículo bajo distintas condiciones, utilizada para el análisis de rendimiento y entrenamiento.

Sistema háptico

Dispositivo o tecnología que simula el sentido del tacto mediante estímulos físicos, como vibraciones o movimientos, para que el usuario pueda "sentir" la interacción con objetos virtuales o remotos.

Teleoperación

Método de control de un sistema o robot a distancia, usando tecnologías de comunicación y dispositivos de retroalimentación que permiten al operador interactuar con el entorno de manera remota.

Telepresencia

Tecnología que permite a una persona interactuar con un entorno distante como si estuviera presente físicamente, a través de dispositivos como cámaras, micrófonos y pantallas.

Tecnología inmersiva

Conjunto de tecnologías que permiten a los usuarios sumergirse en un entorno simulado, brindando experiencias visuales, auditivas y táctiles realistas. Ejemplos incluyen la realidad virtual (VR) y la realidad aumentada (AR).

Vibrotáctil

Relativo al sentido del tacto y a la estimulación mediante vibraciones, utilizado en dispositivos que permiten al usuario sentir información física a través del tacto.

Wi-Fi

Tecnología de comunicación inalámbrica que permite la transmisión de datos a través de ondas de radio, utilizada para conectar dispositivos a redes locales o a Internet.



UNIVERSIDAD
BICENTENARIA

¡Sueña, haz que suceda!