



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA
BASADO EN UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA
PREVENIR LA SINIESTRALIDAD VEHICULAR EN
INTERSECCIONES”**

Trabajo de Integración Curricular:

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

AUTORES:

EDGAR ADRIÁN GARCÍA LEMA

CRISTIAN ARIEL CAISAGUANO MOREANO

Riobamba – Ecuador

2022



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA
BASADO EN UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA
PREVENIR LA SINIESTRALIDAD VEHICULAR EN
INTERSECCIONES”**

Trabajo de Integración Curricular:

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

AUTORES: EDGAR ADRIÁN GARCÍA LEMA Y CRISTIAN ARIEL
CAISAGUANO MOREANO

DIRECTOR: Ing. ANDRÉS FERNANDO MOROCHO CAIZA M. Sc.

Riobamba – Ecuador

2022

© 2022, García Lema Edgar Adrián, Caisaguano Moreano Cristian Ariel

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Edgar Adrián García Lema y Cristian Ariel Caisaguano Moreano, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 20 de mayo de 2022

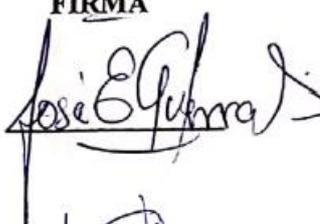
The image shows two handwritten signatures in blue ink. The signature on the left is for Edgar Adrián García Lema, and the signature on the right is for Cristian Ariel Caisaguano Moreano. Both signatures are written in a cursive style.

Edgar Adrián García Lema
060428700-3

Cristian Ariel Caisaguano Moreano
050395998-3

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

El Tribunal de Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular, Tipo: Propuesta Tecnológica; **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA BASADO EN UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA PREVENIR LA SINIESTRALIDAD VEHICULAR EN INTERSECCIONES**; realizado por los señores **EDGAR ADRIÁN GARCÍA LEMA Y CRISTIAN ARIEL CAISAGUANO MOREANO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. José Enrique Guerra Salazar M. Sc. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2022-05-20
Ing. Andrés Fernando Morocho Caiza M. Sc. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2022-05-20
Ing. Dr. Paul Patricio Romero Riera PhD. MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2022-05-20

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mis padres Martha y Gonzalo quienes a pesar de la distancia supieron brindar su apoyo y amor incondicional durante estos años de carrera.

Edgar Adrián García Lema

Dedico el presente trabajo, a mi madre María Luzmila Moreano, por brindarme su apoyo incondicional durante estos años e inculcarme valores que me han ayudado a superarme cada día, a mis hermanos por ser mi pilar fundamental, mis abuelitos quienes me guiaron para ser una persona de bien, a mi novia quien estuvo a mi lado incondicionalmente en los momentos más difíciles, a toda mi familia y amigos por los consejos brindados.

Cristian Ariel Caisaguano Moreano

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a mis familiares, amigos y maestros de la facultad por brindar su consejo y guía en mi vida personal y durante mis años de formación académica.

Edgar Adrián García Lema

Agradezco principalmente a Dios por darme la oportunidad de culminar mi carrera universitaria, a toda mi familia por estar presente en todo momento, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo quien me abrió las puertas para poder formarme profesionalmente, y a todos los docentes de la Facultad de Informática y Electrónica por compartir sus conocimientos. Especialmente a los Ingenieros Andrés Morocho director del Trabajo de Integración Curricular y Paul Romero miembro tribunal quienes aportaron con sus conocimientos para la culminación del presente trabajo.

Cristian Ariel Caisaguano Moreano

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiv
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
SUMMARY.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	xvii

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1. Realidad de los siniestros vehiculares y sistemas desarrollados.....	5
1.1.1. Causas relacionadas a los siniestros vehiculares.....	7
1.1.2. Problemática.....	8
1.1.3. Sistemas desarrollados a nivel regional.....	9
1.1.4. Sistemas desarrollados nivel nacional.....	9
1.2. Definición de los escenarios de aplicación.....	11
1.2.1. Intersecciones en T o unión de vías.....	13
1.2.2. Intersecciones en cruz o cruce de dos vías.....	15
1.3. Redes de sensores inalámbricos WSN.....	17
1.3.2. Análisis comparativo de topologías de comunicación inalámbrica.....	18
1.3.3. Análisis comparativo de tecnologías de comunicación inalámbrica.....	20
1.4. Análisis del hardware que integra un sistema de alerta temprana.....	24
1.4.1. Módulos de posicionamiento global.....	24
1.4.3. Tarjetas de desarrollo.....	27
1.4.4. Dispositivos de visualización y audio.....	30

1.4.5.	<i>Fuentes de alimentación</i>	33
1.4.6.	<i>Regulador de voltaje AMS1117 3,3 V</i>	35
1.4.7.	<i>Módulo TP4056 cargador batería litio con protección.</i>	35
1.5.	Sustento matemático para el desarrollo del algoritmo	36

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	38
2.1.	Definición del escenario para la aplicación del sistema	38
2.2.	Definición de requerimientos.	42
2.3.	Concepción de la arquitectura general del sistema	44
2.4.	Bloques del sistema	46
2.4.1.	<i>Nodo móvil</i>	46
2.4.2.	<i>Nodo fijo</i>	47
2.5.	Selección y construcción del hardware para el sistema de alerta temprana	48
2.5.1.	<i>Módulo GPS NEO 7M</i>	48
2.5.2.	<i>Módulo NRF24L01</i>	48
2.5.3.	<i>Arduino Nano</i>	49
2.6.	Esquema de conexiones para el sistema de alerta temprana	49
2.6.1.	<i>Conexiones del nodo móvil</i>	49
2.6.2.	<i>Conexiones del nodo fijo</i>	51
2.7.	Diseño de las placas PCB	52
2.7.1.	<i>PCB para el nodo fijo</i>	52
2.7.2.	<i>PCB para los nodos móviles</i>	53
2.8.	Diseño de la carcasa	55
2.9.	Selección del software para el desarrollo del sistema	59
2.9.1.	<i>Arduino IDE</i>	59
2.9.2.	<i>Bibliotecas para implementar la WSN</i>	59
2.9.3.	<i>Bibliotecas para el uso del módulo GPS</i>	61

2.9.4.	<i>Biblioteca LiquidCrystal_I2C.h</i>	62
2.9.5.	<i>LowPower.h para ahorro de energía</i>	62
2.10.	Desarrollo del software para el sistema	62
2.10.1.	<i>Algoritmo para el nodo móvil</i>	62
2.10.2.	<i>Algoritmo del nodo fijo</i>	64
2.11.	Generación de mensajes en la interfaz audiovisual	65
2.11.1.	<i>Pantallas principales</i>	65
2.11.2.	<i>Alertas por insuficiente espacio de detención</i>	67
2.11.3.	<i>Alertas por exceso de velocidad</i>	68

CAPÍTULO III

3.	PRUEBAS Y RESULTADOS	71
3.1.	Caracterización del hardware y las comunicaciones	71
3.1.1.	<i>Validación en la adquisición de datos y en el cálculo de variables</i>	71
3.1.2.	<i>Alcance de la señal inalámbrica y velocidad de transmisión</i>	76
3.2.	Tiempos de ejecución de los algoritmos del sistema	79
3.3.	Funcionamiento del sistema	82
3.3.1.	<i>Alertas de velocidad</i>	82
3.3.2.	<i>Alertas por insuficiente espacio de frenado</i>	84
3.4.	Consumo de potencia	90
3.4.1.	<i>Consumo del nodo fijo</i>	90
3.4.2.	<i>Consumo del nodo móvil</i>	91
3.5.	Resumen de costos del sistema	91

	CONCLUSIONES	93
--	---------------------------	----

	RECOMENDACIONES	95
--	------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Evaluación del sistema WSN basado en 6LoWPLAN.....	11
Tabla 2-1:	Características técnicas de la vía colectora de clase B y local A	12
Tabla 3-1:	Características de las topologías de red.....	20
Tabla 4-1:	Prioridades en las características de la tecnología inalámbrica.....	22
Tabla 5-1:	Características de las tecnologías de transmisión inalámbrica.....	23
Tabla 6-1:	Características de los módulos GPS.....	25
Tabla 7-1:	Características de los módulos transceptores	27
Tabla 8-1:	Características de las tarjetas de desarrollo.....	29
Tabla 9-1:	Características de los dispositivos de visualización	31
Tabla 10-1:	Principales características del Módulo Interfaz serial I2C.....	32
Tabla 11-1:	Características de los dispositivos de audio.	33
Tabla 12-1:	Características de las diferentes fuentes de alimentación	34
Tabla 13-1:	Características del regulador de voltaje	35
Tabla 14-1:	Características del módulo TP4056.....	36
Tabla 1-2:	Pines de conexión de Arduino Nano con NRF24L01	50
Tabla 1-3:	Indicadores estadísticos de variabilidad para la velocidad.....	72
Tabla 2-3:	Error absoluto de la velocidad.....	73
Tabla 3-3:	Indicadores estadísticos de variabilidad para la latitud.....	74
Tabla 4-3:	Indicadores estadísticos de variabilidad para la longitud.....	74
Tabla 5-3:	Indicadores estadísticos de variabilidad para la distancia	75
Tabla 6-3:	Error absoluto en el cálculo de la distancia a la intersección.....	76
Tabla 7-3:	Rangos de recepción de la señal a una tasa de transmisión de 250 Kbps	76
Tabla 8-3:	Rangos de recepción de la señal a una tasa de transmisión de 1Mbps.....	77
Tabla 9-3:	Rangos de recepción de la señal a una tasa de transmisión de 2Mbps.....	78
Tabla 10-3:	Tiempos de ejecución del algoritmo cuando el nodo móvil está secundaria	80
Tabla 11-3:	Calidad de la comunicación entre el nodo fijo y móvil en secundaria.....	80
Tabla 12-3:	Tiempos de ejecución del algoritmo del nodo móvil en principal	81

Tabla 13-3:	Calidad de la comunicación entre el nodo fijo y el nodo móvil en principal.....	81
Tabla 14-3:	Tiempos de ejecución del algoritmo para el nodo fijo	81
Tabla 15-3:	Calidad de la comunicación entre el nodo fijo y los móviles de la red	82
Tabla 16-3:	Análisis de emisión para alerta de velocidad OK.....	83
Tabla 17-3:	Análisis de emisión alerta de velocidad ALTA.....	84
Tabla 18-3:	Análisis de emisión para alerta de velocidad MUY ALTA	84
Tabla 19-3:	Estimación del punto de generación de alerta por insuficiente espacio de detención.....	86
Tabla 20-3:	Punto en el que se genera la alerta para el caso 2 con 3 móviles en red y error en la estimación.....	88
Tabla 21-3:	Datos sobre el consumo de corriente del nodo fijo en modo sleep	90
Tabla 22-3:	Datos sobre el consumo de corriente del nodo fijo transmitiendo	90
Tabla 23-3:	Datos sobre el consumo de corriente del nodo móvil	91
Tabla 24-3:	Análisis de costos para el sistema	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Intersección T simple entre vías: Colectora clase B y Local clase A.....	14
Figura 2-1:	Intersecciones en T entre vías Colectora clase B y Local clase A	15
Figura 3-1:	Intersecciones en cruz vías colectora clase B y local clase A	16
Figura 4-1:	Intersecciones candidatas para el desarrollo del sistema.....	17
Figura 5-1:	Arquitectura de redes de sensores inalámbrica (WSN).....	18
Figura 1-2:	Descripción del escenario de aplicación caso 1	39
Figura 2-2:	Descripción del escenario de aplicación caso 2	40
Figura 3-2:	Descripción del escenario de aplicación caso 3	40
Figura 4-2:	Descripción del escenario de aplicación caso 4	41
Figura 5-2:	Descripción del escenario de aplicación caso 5	42
Figura 6-2:	Concepción de la arquitectura del sistema de alerta temprana.....	45
Figura 7-2:	Diagrama de bloques del nodo móvil.....	46
Figura 8-2:	Diagrama de bloques del nodo fijo	47
Figura 9-2:	Diagrama de conexiones para el nodo móvil	50
Figura 10-2:	Diagrama de conexiones del I2C y pantalla LCD(LCM12864R).....	51
Figura 11-2:	Diagrama de conexiones para el nodo fijo	51
Figura 12-2:	Diseño de la placa PCB para el nodo fijo.....	52
Figura 13-2:	Placa PCB terminada para el nodo fijo	53
Figura 14-2:	Diseño de placa PCB para el nodo móvil.....	53
Figura 15-2:	Placa PCB terminada para el nodo móvil.....	54
Figura 16-2:	Placa PCB para acople entre pantalla LCD y módulo I2C.....	54
Figura 17-2:	Modelo 3D de la carcasa para el nodo móvil.	55
Figura 18-2:	Vista frontal y trasera del modelo 3D de la carcasa para el nodo móvil	56
Figura 19-2:	Diseño de carcasa para el nodo móvil con placa PCB incluida	56
Figura 20-2:	Diseño del modelo 3D de la carcasa para el nodo fijo	57
Figura 21-2:	a) Dimensiones de la carcasa para el nodo móvil b) Dimensiones nodo fijo.....	58
Figura 22-2:	Carcasa fabricada para el nodo fijo	58

Figura 23-2: Carcasa fabricada para los nodos móviles.....	59
Figura 24-2: Topología de la capa de red implementada.....	61
Figura 25-2: Algoritmo para los nodos móviles	64
Figura 26-2: Algoritmo para el nodo fijo.....	65
Figura 27-2: Mensaje que se muestra en el nodo móvil cuando no existe señal GPS	66
Figura 28-2: Mensaje que se muestra en el nodo que circula en principal cuando no existe riesgo de siniestro.....	66
Figura 29-2: Mensaje que se despliega en el LCD cuando el nodo móvil está en secundaria y no existe riesgo de siniestro.....	67
Figura 30-2: Alerta audiovisual para el móvil en principal cuando el móvil en secundaria no tiene espacio de detención.....	67
Figura 31-2: Alerta del nodo móvil en secundaria que no tiene espacio de detención	68
Figura 32-2: Mensaje que se despliega en el LCD cuando el nodo móvil no.....	69
está en el rango del nodo fijo y no circula a exceso de velocidad.....	69
Figura 33-2: Mensaje que se despliega cuando se dispara la alerta	69
por exceso de velocidad estando el móvil dentro del rango del nodo fijo	69
Figura 34-2: Mensaje que se despliega el nodo móvil en principal cuando el nodo móvil en secundaria excede el límite de velocidad	70

ÌNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1:	Tendencia de los siniestros de tránsito en Ecuador	6
Gráfico 2-1:	Tendencia de los siniestros de tránsito en Chimborazo	7
Gráfico 3-1:	Número de siniestros por causas probables para los años 2016 y 2017.....	8
Gráfico 1-3:	Variabilidad en las lecturas de velocidad proporcionadas por el GPS	72
Gráfico 2-3:	Variabilidad en las lecturas de latitud del GPS	73
Gráfico 3-3:	Variabilidad en las lecturas de longitud del GPS	74
Gráfico 4-3:	Variabilidad en el cálculo de la distancia del móvil a la intersección.....	75
Gráfico 5-3:	Definición de rangos de recepción de la señal inalámbrica a 250kbps	77
Gráfico 6-3:	Definición de rangos de recepción de la señal inalámbrica a 1Mbps.....	78
Gráfico 7-3:	Definición de rangos de recepción de la señal inalámbrica a 2 Mbps.....	79
Gráfico 8-3:	Alertas de velocidad emitidas por el nodo móvil.....	83
Gráfico 9-3:	Punto en el que se determina la alerta por insuficiente espacio de frenado	85
Gráfico 10-3:	Evolución de la distancia a la intersección y la distancia de detención para el nodo móvil 2.....	87
Gráfico 11-3:	Evolución de la distancia a la intersección y la distancia de detención para el nodo móvil 4... ..	87
Gráfico 12-3:	Recorrido del nodo móvil en principal y en secundaria ambos a 8 m/s (30km/h).....	89

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Código del nodo fijo

ANEXO B: Código del nodo móvil

ANEXO C: Hoja de datos módulo NEO 7M

ANEXO D: Hoja de datos módulo NFR24L01

ANEXO E: Hoja de Datos Arduino Nano

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

OPS	Organización Panamericana de la Salud
ANT	Agencia Nacional de Tránsito
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>
GSM	Sistema Global de Comunicaciones
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
CEA	Comisariado Europeo del Automóvil
VANET	<i>Vehicular Ad Hoc Network</i>
LCD	<i>Liquid Cristal Display</i>
NCAP	<i>New Car Assessment Programme</i>
GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
UART	Transmisor-Receptor Asíncrono Universal
I2C	<i>Circuits Inter-Integrated</i>
SPI	Interfaz en Serie para Periféricos
MOSI	<i>Master Output Slave Input</i>
MISO	<i>Master Input Slave Output</i>
SCK	<i>Serial Clock</i>
SDA	<i>System Data</i>
SCL	<i>System Clock</i>
HDOP	Indicador de precisión horizontal
CV	Coefficiente de variación

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema de alerta temprana, basando en una red de sensores inalámbricos para prevenir la siniestralidad vehicular en intersecciones, siguiendo la metodología de diseño *top down*. Dicho sistema está compuesto por dos dispositivos, el primero de ellos es el nodo móvil ubicado dentro de los vehículos, gracias al cual, estos tienen la capacidad de compartir su dirección de red, posición y velocidad, datos adquiridos por el módulo NEO 7M. El otro dispositivo es el nodo fijo ubicado en la intersección, el cual, tiene la función de almacenar las coordenadas de esta, así como también, recibir/transmitir y ordenar datos de los automóviles en función a su velocidad y vía de circulación mediante el algoritmo Quicksort. La comunicación inalámbrica es implementada usando el módulo NRF24L01 junto con la biblioteca *NRF24Network.h*, encargada de establecer el protocolo y la capa de red. El funcionamiento del sistema fue evaluado mediante un análisis estadístico descriptivo, con el que se determinó que el alcance máximo de la señal inalámbrica del sistema es de 170m a una velocidad de transmisión de 1Mbps, presenta un tiempo de respuesta de 1,017s, una variabilidad del 11% en el cálculo de distancia, un error absoluto máximo en la estimación de distancia de 4,24m, la topología de red en estrella permite procesar información de hasta 4 nodos móviles con un nodo fijo. Se concluye que el sistema genera alertas audiovisuales en los casos de aplicación considerados, en función, a la comparación entre la distancia de separación del automóvil con la intersección y la distancia de detención del vehículo, permitiendo así, anticipar y prevenir un siniestro vehicular. Se recomienda el desarrollo de algoritmos de control robusto para eliminar el factor humano en la toma de decisión al momento de un posible riesgo de siniestro vehicular.

Palabras clave: < RED DE SENSORES INALÁMBRICOS (WSN) >, < TELEMÁTICA DEL TRANSPORTE >, < SEGURIDAD VIAL >, < COMUNICACIÓN INALÁMBRICA >, < RADIOFRECUENCIA >, < SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE >



Firmado electrónicamente por:
**HOLGER GERMAN
RAMOS UVIDIA**

1298-DBRA-UTP-2022
2022-06-27

SUMMARY

The present research aimed to develop an early warning system, based on wireless sensor networks to prevent car accidents rate at Intersections, following the top-down design methodology. This system is made up of two devices, the first one is the mobile node located inside the cars, thanks to which they can share their network address, position, and speed, data acquired by the NEO 7M module. The other device is the fixed node located at the intersection, which has the function to store the coordinates of this, as well as, receive/transmit and order data from the cars based on their speed and traffic route using the Quicksort algorithm. The wireless communication is implemented using the NRF24L01 module together with the library NRF24Network.h, responsible for establishing the protocol and the network layer. The operation of the system was evaluated through descriptive statistical analysis, in which it was determined that the maximum range of the wireless signal system is 170m at a transmission speed of 1Mbps, giving a response time of 1,017s, a variability of 11% in the calculation of distance, a maximum absolute error in the distance estimation of 4,24m, the star network topology allows to process information up to 4 mobile nodes with a fixed node. It is concluded that the system generates audiovisual alerts in the application cases considered, according to the comparison between the car separation distance with the intersection and the car stopping distance, allowing to anticipate and prevent a car accident. It is recommended that robust control algorithms be developed to eliminate the human factor in the decision-making at the time of a possible risk of car accidents.

Keywords: <WIRELESS SENSOR NETWORKS (WSN)> <TRANSPORT TELEMATICS> <ROAD SAFETY> <WIRELESS COMMUNICATION> <RADIO FREQUENCY> <SMART TRANSPORTATION SYSTEMS>.



Firmado electrónicamente por:
**LENIN
IVAN LARA**

0602546103

1298-DBRA-UTP-2022
2022-06-27

INTRODUCCIÓN

La invención del vehículo a finales del siglo XIX trajo consigo una mejor calidad de vida para las personas, pues permitió acortar el tiempo de viaje al brindar un medio de transporte rápido. Con el desarrollo de la industria automotriz la movilidad no solo se volvió eficiente, sino también costeable y confortable para gran parte de la población mundial, sin embargo, el crecimiento del parque automotor trajo también importantes problemáticas, como el fuerte impacto ambiental y aquella en la cual está enfocada esta investigación; la siniestralidad vehicular. Debido a la presencia de vehículos la integridad de las personas se ha visto afectada negativamente, a pesar de que en la actualidad los automotores cuentan con gran número de sensores, así como también, con sistemas de asistencia en la conducción. Un estudio a nivel regional realizado por la Organización Panamericana de la Salud OPS, menciona que la siniestralidad vehicular es la segunda causa principal de mortalidad en adultos jóvenes, la misma que puede ser afrontada desde diversos ángulos, entre los que se encuentran: aplicar mejores normas de seguridad para las vías de tránsito y los vehículos (Organización Panamericana de la Salud, 2019, pp. 9-40). Por otra parte, a nivel local, según la Agencia Nacional de Tránsito, las 5 causas probables con mayor número de siniestros vehiculares corresponden a la falta de buenas prácticas de manejo y al estado de la señalización de tránsito (ANT Dirección de comunicación social, 2021). Por esto, la presente investigación, desarrolla la propuesta de un sistema de alerta temprana, que brinde información relevante y oportuna al conductor sobre el estado de los vehículos presentes en las inmediaciones de las intersecciones entre una vía principal y una secundaria en sectores urbanos, para que en base a dicha información, el conductor tome acción y prevenga un posible siniestro, enfrentando de esta manera la incidencia de riesgo del factor humano en la conducción y a la vez la carencia de señalización en las vías.

ANTECEDENTES

La siniestralidad vehicular al ser un problema de salud pública ha sido tema de preocupación para organizaciones públicas y privadas. Dichas organizaciones han llevado a cabo proyectos de investigación como los mencionados en Los Santos Aransay (2009, pp. 4-6), donde se desarrollan propuestas tecnológicas basadas en redes de sensores inalámbricos orientadas a mejorar la seguridad vial, entre las que se destacan:

Sistema eCall

Es un proyecto europeo implementado desde el año 2018 cuyo objetivo es salvar vidas. Es capaz de avisar de manera automática a emergencias en caso de accidente, reduciendo así el tiempo de espera desde que se produce el siniestro, hasta que este es atendido. Su funcionamiento se basa en un conjunto de sensores instalados en el vehículo que detectan un siniestro, en tal caso, el sistema graba un mensaje de auxilio que llega a una centralita de emergencias mediante un sistema GSM/GPS, con ello el automóvil es localizado de manera fácil. Puede hacer llamadas de auxilio de manera manual o automática (Fundación CEA Comisariado Europeo del Automóvil, 2021).

Trackss (Technologies for Road Advanced Cooperative Knowledge):

Tiene como objetivo mejorar la seguridad y eficiencia del transporte, para lo cual, usa tecnologías sensoriales inalámbricas que dotan a los vehículos de capacidad de percepción y de igual manera a la infraestructura vial, logrando predecir el estado del tráfico, las condiciones de la infraestructura vial y el medioambiente (TRACKSS Foundation, 2018).

JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

La siniestralidad vehicular es un fenómeno que tiene un impacto negativo en el desarrollo de un país y es una carga significativa para el sistema de salud, como lo señala la OPS en su informe sobre el estado de la seguridad vial en la Región de las Américas. En dicho informe también se da a conocer la preocupación que existe respecto al aumento de las cifras de siniestros de tránsito en la región, y menciona que dicho fenómeno se puede afrontar por medio de la aplicación de una legislación relacionada con factores de riesgo, aplicando también, normas de seguridad para las vías de tránsito y los vehículos, y a la vez, mejorando el acceso a la atención prehospitalaria de calidad (Organización Panamericana de la Salud, 2019, p.6). Por otra parte, a nivel local los datos no indican una situación más favorable, pues en Ecuador, los siniestros de tránsito también presentan cifras preocupantes. Esto se puede aseverar ya que de enero a septiembre del 2021 se han registrado 15.393 siniestros vehiculares, cifra que está muy próxima a alcanzar los 16.972 siniestros ocurridos durante todo el año 2020. La Agencia Nacional de Tránsito en su balance de siniestralidad vehicular en el período 2020 relacionado con 2019, menciona que, de las 27 causas probables de siniestralidad de tránsito, que dicho ente gubernamental usa para sus reportes, existen 5 causas principales para la problemática, la mayoría de ellas, relacionadas con la conducta de las personas detrás del volante y otras al mal estado de la señalización en las vías (Agencia Nacional de Tránsito, 2021).

En base a lo expuesto anteriormente se hace evidente que la siniestralidad vehicular es un problema que debe ser afrontado para salvaguardar la vida y la integridad de la ciudadanía, pues la combinación de la falta de buenas prácticas de conducción junto con la carencia de señalización en las vías acrecienta la problemática. Por esto, la presente investigación afronta estos dos factores de riesgo, brindando información relevante y oportuna al conductor, sobre el estado de los demás vehículos presentes en las inmediaciones de las intersecciones de sectores urbanos, donde se presentan la combinación de los factores antes mencionados. Además, cabe señalar este trabajo de investigación hace uso de la teoría existente relacionada con la temática para desarrollar una propuesta tecnológica, por lo que no se explora la creación de nuevas teorías.

JUSTIFICACIÓN APLICATIVA

El trabajo de integración curricular: “Desarrollo de un sistema de alerta temprana basado en una red de sensores inalámbricos para prevenir la siniestralidad vehicular en intersecciones”, se basa en la necesidad de mejorar la seguridad vial de los sectores urbanos. El resultado de este trabajo permite reforzar el concepto de manejo a la defensiva en el conductor, teniendo como consecuencia la reducción de las distracciones, además de aumentar el tiempo para reaccionar a las eventualidades de la conducción, y por tanto, contribuyendo positivamente a la seguridad de toda la comunidad que hace uso de la infraestructura vial. Todo esto se logra gracias al desarrollo de un sistema de alerta temprana, el cual, está compuesto fundamentalmente por dos partes, una instalada al interior de los vehículos y la otra ubicada en un punto estratégico de una intersección. La primera parte del sistema de alerta temprana (nodo móvil), está encargada de la adquisición de los datos de velocidad y posición del vehículo, dichos datos, son enviados hacia a un sistema micro controlado de manera cableada, luego, esta información es compartida inalámbricamente dentro del rango de transmisión de un módulo transceptor hacia la segunda parte del sistema (nodo fijo), ubicada en un área estratégica de una intersección. El nodo fijo se encarga de recibir y ordenar los datos de los nodos móviles en función a la velocidad, también está encargado de difundir esta información en la red, para que así, los nodos móviles que estén dentro del alcance de la señal inalámbrica, puedan conocer esta información y utilizarla como datos de entrada en un algoritmo, cuyo propósito es calcular la distancia al nodo fijo, la distancia de detención y emitir una alerta temprana basada en la velocidad de los nodos y la comparación entre las distancias calculadas. Dicha alerta es mostrada al conductor, esto último, con el objetivo de que sea la persona quien tome la acción necesaria sobre el vehículo y prevenga o evite una colisión en la intersección. Es importante señalar que el sistema de alerta temprana está pensado para ser un

producto complementario al vehículo, por lo que no interviene de manera alguna con otros sistemas de sensores de este, ni con el sistema de tracción, frenado u otros, aunque sí surge la necesidad de intervenir en cierto grado el sistema eléctrico del vehículo, con el fin de obtener la alimentación para los componentes electrónicos que conforman el sistema de alerta temprana.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de alerta temprana basado en una red de sensores inalámbricos para prevenir la siniestralidad vehicular en intersecciones.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir la topología de la WSN, el protocolo de comunicación entre los nodos que la componen y el sistema de adquisición para datos de posición y velocidad a instalar en cada nodo móvil (vehículo).
- Diseñar el algoritmo de gestión de la información recolectada por la WSN referente a datos de posición y velocidad de cada nodo móvil (vehículo) e implementarlo en dichos nodos.
- Diseñar la interfaz gráfica y auditiva del sistema de alerta temprana para el nodo móvil de la WSN e implementarlo en los vehículos involucrados en el estudio.
- Evaluar y validar el sistema de alerta temprana en un entorno real controlado.

El presente documento, resume el proceso de diseño bajo la metodología *Top Down* de un sistema de alerta temprana, cuya finalidad es la de prevenir y en consecuencia disminuir siniestros en intersecciones de sectores urbanos, mediante alertas audiovisuales. Este trabajo consta de 3 capítulos; en el primero de ellos se expone el fundamento teórico, el segundo describe el marco metodológico y el último presenta el análisis de los resultados de la investigación.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

Este capítulo detalla información sobre la siniestralidad vehicular, para tal fin, se presentan estadísticas del comportamiento de dicho fenómeno a nivel regional y local en los últimos años, así como también, las principales causas para el mismo. El capítulo continúa exponiendo sistemas orientados a mejorar la seguridad vial desarrollados a nivel regional y nacional. Luego, se exponen las especificaciones de diseño para las vías del sector urbano en la ciudad de Riobamba, con el fin de definir el alcance mínimo de transmisión de los datos y el tipo de intersección a considerar para el desarrollo del sistema de alerta temprana. En este capítulo también se definen y analizan los conceptos de: red de sensores inalámbricos, topologías de red y tecnologías de transmisión inalámbrica. Además, se exponen las características de dispositivos electrónicos necesarios para la implementación de la propuesta tecnológica y se finaliza con el sustento matemático con el que se calculan las variables del sistema.

1.1. Realidad de los siniestros vehiculares y sistemas desarrollados

La siniestralidad vial es un problema de salud pública en la Región de las Américas que ha aumentado en los últimos años, pues los resultados del informe sobre seguridad vial en la región publicado por la Organización Panamericana de la Salud (2019, p.6), muestran que 154.997 personas perdieron la vida como consecuencia de un accidente de tránsito, 1.283 más que en 2013, convirtiéndose así, en la segunda causa principal de mortalidad en adultos jóvenes. Este informe también señala que para mejorar la seguridad vial es necesario adoptar y hacer cumplir una legislación firme en lo que respecta a la conducción bajo los efectos del alcohol, uso del cinturón de seguridad, mejorar las normas de seguridad de los vehículos y las infraestructuras viales, además de aumentar el acceso a la atención de urgencia de calidad (Organización Panamericana de la Salud, 2019, p.7).

A nivel nacional las cifras de siniestros vehiculares para el período 2020 relacionado con el 2019 han disminuido un 31%, teniendo un total de 24.595 siniestros para el 2019 y de 16.972 para el 2020, correspondiendo a este último año un total de 369 siniestros ocurridos en la provincia de Chimborazo. Además, según el Reporte Nacional de Siniestros de Tránsito, emitido por la ANT, de enero a septiembre del 2021 ya se registran 15.393 siniestros a nivel nacional, 387 de ellos ocurridos en la provincia de Chimborazo, de esta última cifra, 226 se registran como siniestros

con personas lesionadas y 47 fueron fatales. Según este reporte, existen cuatro tipos de causa final con mayor frecuencia: pérdida de carril, choque lateral, choque frontal y estrellamientos, con una cantidad de: 12, 10, 8 y 5 siniestros fatales correspondientemente. Otras causas finales son: arrollamientos, atropellos, caída de pasajeros y demás. Este reporte también indica que la provincia con mayor número de siniestros en 2021 es Guayas, seguida de Pichincha, Manabí, Los Ríos y otras. En este ranking, Chimborazo ocupa la décima posición. Es importante señalar que esta tendencia se ha mantenido desde el 2008, teniendo como punto diferenciador el 2018, donde la provincia de Chimborazo estuvo en la sexta posición dentro de las provincias con mayor número de siniestros vehiculares (ANT Dirección de comunicación social, 2021; Agencia Nacional de Tránsito, 2021). La evolución de la siniestralidad vehicular en Ecuador se observa en el gráfico 1-1 y para la provincia de Chimborazo en el gráfico 2-1.



Gráfico 1-1: Tendencia de los siniestros de tránsito en Ecuador

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Fuente: Agencia Nacional de Tránsito, 2021



Gráfico 2-1: Tendencia de los siniestros de tránsito en Chimborazo

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Fuente: Agencia Nacional de Tránsito, 2021

1.1.1. Causas relacionadas a los siniestros vehiculares

Los eventos trágicos que tienen lugar en la infraestructura vial y que involucran a vehículos o a otros actores viales, se pueden diferenciar en dos grandes grupos de acuerdo con la causalidad del evento, por lo que, se llama accidente a aquel evento imprevisto no previsible que genera una desgracia o un daño. Por otra parte, siniestro, definición que ocupa esta investigación, hace referencia a un evento que resulta de la interacción entre diferentes factores identificables, por lo que, es predecible y prevenible (Villa Maura et al., 2019, pp. 121-129).

En base a la distinción hecha en el párrafo anterior, en el gráfico 3-1 se muestran el número de siniestros por causa probable, los datos pertenecen a los años 2016 (en color azul) y 2017 (en color rosa). Las causas probables han sido etiquetadas de C01 a C28, dicha etiqueta indica solamente el tipo de causa probable. Del mencionado gráfico se puede extraer que las principales causas probables de siniestros de tránsito en el Ecuador, ordenadas de mayor a menor número de siniestros son:

- C09: Conducir el vehículo superando los límites máximos de velocidad.
- C14: Conducir desatento a las condiciones de tránsito.
- C23: No respetar las señales, reglamentos de tránsito.
- C11: No mantener la distancia prudencial.
- C06: Realizar un cambio brusco o indebido de carril.
- C19: Conducir bajo la influencia de alcohol.
- C26: No guardar la distancia lateral mínima de seguridad entre vehículos

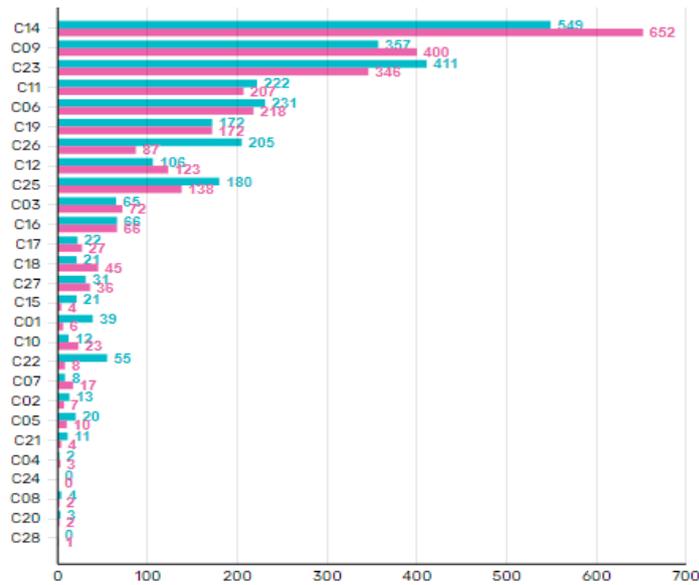


Gráfico 3-1: Número de siniestros por causas probables para los años 2016 y 2017

Realizado por: SES Safety Enforcement Systems

Fuente: Agencia Nacional de Tránsito, 2021

Estas causas continúan siendo las de mayor número de siniestros de tránsito según el balance de siniestralidad de tránsito en el período 2020 emitido por la ANT de enero a septiembre del 2021.

1.1.2. Problemática

En las secciones anteriores la información presentada, tiene el fin de resaltar la importancia de desarrollar un sistema de alerta temprana, que brinde información sobre el estado del tránsito vehicular para aumentar el tiempo de reacción del conductor a las posibles eventualidades durante el manejo. De los datos presentados se puede notar que los siniestros de tránsito se deben en su mayoría al factor humano y en menor medida a la señalización de las vías, pues entre las causas con mayor número de siniestros se encuentran: conducir a exceso de velocidad, conducir desatento al estado del tránsito y el irrespeto a las señales de tránsito. Por lo tanto, el desarrollo del sistema de alerta temprana está orientado contrarrestar el factor de riesgo humano y de infraestructura vial suministrando información de velocidad y distancia a la intersección de un vehículo a otro de manera oportuna, atacando a la vez, la carencia o el mal estado de la señalización de tránsito y las distracciones del conductor. La implementación del sistema en lo que va del año 2021 podría haber ayudado a evitar 10 accidentes fatales y 2 personas lesionadas por choque lateral dentro de la provincia de Chimborazo, además de un total de 535 siniestros fatales y 490 lesionados por la misma causa final si el sistema se hubiera implementado en todas las provincias del Ecuador (Agencia Nacional de Tránsito, 2021).

1.1.3. Sistemas desarrollados a nivel regional

En este apartado se exponen publicaciones que son relevantes y tienen el objetivo de prevenir siniestros vehiculares, ya sea con alertas preventivas u otro sistema de seguridad vehicular, las cuales evidencian, que este tipo de investigaciones son de gran valor social al presentar soluciones a un problema de salud pública. Dichas investigaciones se toman como referencia bibliográfica para el desarrollo de este trabajo.

Red híbrida vehicular y de sensores. La publicación fue desarrollada por la Universidad Autónoma de Sinaloa, México y por la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Sus investigadoras Carolina Tripp-Barba y Mónica Aguilar Igartua, proponen dos soluciones para brindar seguridad vial al momento de movilizarse mediante el uso de las redes Ad Hoc como las WSN (*Wireless Sensor Network*, por sus siglas en inglés) y las VANET (*Vehicular Ad Hoc Network*, por sus siglas en inglés). Una propuesta es desarrollada tomando en cuenta cinco condiciones generales: el monitoreo del entorno dentro de la red de sensores, el envío de los datos en la red de sensores inalámbricos a un vehículo que este dentro de su alcance, la distribución de los datos en la VANET, así como el reenvío de datos de la red híbrida vehicular y a la red de sensores inalámbricos, por último, el transporte de los datos en todos los nodos móviles. (Tripp y Aguilar, 2013, pp. 2-3) La segunda propuesta busca trabajar con dos tipos de sensores: un sensor estático (ubicado en la carretera) y otros sensores móviles (alojados en cada vehículo). La comunicación de los sensores se realiza cuando estén suficientemente cerca. Los nodos sensores que se encuentran en la carretera recolectan la información (velocidad, posición y orientación) de todos los vehículos que circulan, mientras que los sensores móviles son capaces de comunicarse con los sensores estáticos ubicados en la carretera y a su vez consigo mismo (Tripp y Aguilar, 2013, pp. 3-4). Esta propuesta a pesar de ser similar a la primera tiene algunos cambios debido a la segmentación de las vías y a las especificaciones. Utiliza cinco generalidades que son: la segmentación de las vías, intervención de la información que se desarrolla en las carreteras, los sensores estáticos, los sensores móviles y por último los protocolos de comunicación. (Tripp y Aguilar, 2013, pp. 3-4)

1.1.4. Sistemas desarrollados nivel nacional

En esta sección describe la implementación de un sistema de seguridad vehicular preventiva mediante WSN orientada al ámbito vehicular, se detalla cómo está constituida la investigación y los parámetros de validación con los que cuenta el sistema una vez finalizado la implementación.

Como referencia de sistema desarrollado a nivel nacional se toma el trabajo: Implementación de una WSN basado en 6LoWPLAN para mejorar el sistema de seguridad vehicular preventivo (Miranda y Padilla, 2016, pp. 80-82), desarrollada en la ESPOCH dentro de la Facultad de Informática y Electrónica, en la carrera de Ingeniería Electrónica Telecomunicaciones y Redes. El sistema de seguridad vehicular preventiva establece cuatro procesos fundamentales, los cuales son: obtención de datos, transmisión de datos, procesamiento de la información y respuesta del sistema. Los elementos de hardware que tiene este sistema son: nodo sensor, actuadores, un sistema de comunicación, fuente de alimentación, estación base y un nodo coordinador. Para el sistema se hace uso de una WSN basada en 6LoWPLAN la misma que usa direccionamiento IPV6 para la configuración de los nodos sensores y el nodo coordinador, la topología que se utiliza para el diseño de este sistema es la topología tipo estrella, ya que todos los nodos sensores necesitan conectarse con el nodo coordinador. La WSN tiene cuatro nodos sensores y un nodo coordinador, este último está conformado por un módulo de comunicación inalámbrica XBee, una tarjeta programable Arduino 2560 y una pantalla LCD de 40x20. Los nodos sensores se encargan de tomar las señales establecidas, luego de la obtención de los datos mediante los sensores, la información es enviada al nodo coordinador para determinar la medida de corrección, emitiendo una alerta de manera audiovisual, sobre las medidas de seguridad que el conductor del vehículo ha ignorado o ha pasado por alto, las mismas que son: colocarse el cinturón de seguridad, exceso en el límite de velocidad, puertas mal cerradas, parabrisas sucios y conducir a grandes velocidades en la calzada mojada. Para la obtención de los parámetros del sistema, se activa intencionalmente cada nodo sensor así se comprueba su funcionamiento, una vez verificado que el nodo esta activo, el dato tomado por el sensor es enviado al nodo coordinador encargado de procesar la información y el mismo activa la alerta audiovisual en el caso de ser necesario (Miranda y Padilla, 2016, pp. 80-82).

Para evaluar la eficiencia del sistema de seguridad preventiva vehicular, se hace una comparación entre el sistema de seguridad vehicular preventiva actual y el sistema de seguridad preventiva que tenía de fábrica dicho vehículo y se califica cada uno, tomando en cuenta únicamente las variables pertinentes a los sistemas de seguridad preventiva vehicular y utilizando la valoración del Programa Europeo de Evaluación de Automóviles (Euro NCAP), el cual establece 5 valores con los que se califica el nivel de seguridad de cada sistema, estos valores se asignan dependiendo las variables cualitativas (Miranda y Padilla, 2016, p. 90).

- Seguridad de 5: Buen rendimiento general de protección en caso de colisión, bien equipado con tecnología solida de prevención de colisiones.
- Seguridad de 4: Buen rendimiento general de protección en caso de colisión, posible presencia de tecnología de prevención de colisiones

- Seguridad de 3: Buena protección de ocupantes en general, pero falta de tecnología de prevención de colisiones.
- Seguridad de 2: Protección ante colisiones, pero falta de tecnología de prevención de colisiones.
- Seguridad de 1: Protección contra colisiones mínima.

La tabla 1-1 muestra la evaluación realizada por los autores del sistema de seguridad vehicular preventiva utilizando la valoración del Euro NCAP el cual permite evaluar un antes y un después de la implementación del sistema. Demostrando una efectividad en el sistema del 60%.

Tabla 1-1: Evaluación del sistema WSN basado en 6LoWPAN

Variables	Antes		Después		Eficiencia	
	Valoración	%	Valoración	%	Valoración	%
Seguridad en puertas y capó	2	40%	5	100%	3	60%
Seguridad en cinturones de seguridad	2	40%	5	100%	3	60%
Seguridad en humedad del parabrisas	3	60%	4	80%	1	20%
Seguridad en humedad de calzada	1	20%	5	100%	4	80%
Seguridad de dirección del vehículo	1	20%	3	60%	2	40%
Seguridad en velocidad	1	20%	5	100%	4	80%
Total	10	33.3%	27	90%	18	56.7%

Fuente: Miranda y Padilla, 2016

Realizado por: Miranda y Padilla, 2016

1.2. Definición de los escenarios de aplicación

El área específica del sector urbano en la que se enfoca el sistema de alerta temprana para el análisis de las variables involucradas (posición, velocidad y distancia) son las intersecciones entre una calle principal y una secundaria. Con el fin de definir el parámetro de diseño respecto al alcance de la señal inalámbrica, es necesario conocer las dimensiones de la infraestructura vial en esta área, para ello se tomó como referencia el documento: Libro IV: De Las Normas de Arquitectura y Construcción, elaborado por el GAD municipal de Riobamba (2021, pp. 255-272), en el cual, en su capítulo II sección tercera, se realiza una jerarquización del sistema vial y se definen

las especificaciones de diseño para cada clasificación. Debido a que el área de aplicación del sistema de alerta temprana son las intersecciones de los sectores urbanos, se consideran las especificaciones de diseño para las Vías Colectoras de Clase B, las mismas que son definidas como rutas de enlace entre vías arteriales y locales, cuya función es distribuir el tráfico dentro de sectores urbanos. También se toma en consideración la vía Local de Clase A, la cual conforma el sistema vial urbano menor y se conecta solo con vías colectoras (GAD municipal de Riobamba, 2021, pp. 260-266). Las características de este tipo de vías, tanto Colectora B como Local A son presentadas en la tabla 2-1, en ella, los parámetros de interés son la distancia mínima paralela entre vías y la velocidad de operación.

Tabla 2-1: Características técnicas de la vía colectora de clase B y local A

CARACTERÍSTICAS	COLECTORA B	LOCAL A
Velocidad de proyecto	70 km/h	50 km/h
Velocidad de operación	30 - 50 km/h	Máximo 30 km/h
Distancia paralela entre ellas	500 - 1500 m	100 - 300 m
Control de accesos	Intersecciones a nivel	Intersecciones a nivel
Número mínimo de carriles	1 por sentido	2
Ancho de carriles	3,65 m	3,5 m
Carril de estacionamiento lateral	Mínimo 2,20 m; deseable 2,40 m	2,00 m
Distancia de visibilidad de parada	50 km/h => 60 m	30 km/h => 40 m
Radio mínimo de curvatura	50 km/h => 80 m	3 m
Gálibo vertical mínimo	5,50 m	5,50 m
Radio mínimo de esquinas	5 m	3 m
Aceras	Mínimo 2,10 m	2,50 m

Fuente: GAD municipal de Riobamba; Libro IV: De Las Normas de Arquitectura y Construcción, 2021

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Para definir el escenario, también es necesario conocer la distancia de detención, la cual depende del estado de la calzada, el sistema de frenos, los neumáticos, la velocidad del automóvil y el tiempo de reacción del conductor (Berardo e Irureta, 2021, pp. 2-15). Al tratarse de una vía Colectora de Clase B el límite de velocidad es de 50 km/h, a esta velocidad, con pavimento seco y neumáticos aptos corresponde una distancia de detención de 49m, por lo tanto, esta es la distancia

límite del móvil a la intersección en la que el sistema de alerta temprana debe mostrar la alerta a los automóviles.

Para garantizar la seguridad de la distancia de detención y el tiempo de procesamiento del sistema de alerta temprana, el alcance de la tecnología de transmisión inalámbrica debe ser al menos de 100 metros, lo que corresponde a una distancia de detención para un automóvil que circula a 80 km/h, es decir, próximo al doble del límite de velocidad en sectores urbanos (Agencia Nacional de Regulación y Control del Transporte Terrestre, 2012, pp. 38-40). Otra manera de enfocar el caso es limitar el alcance de la señal inalámbrica, a la longitud de una cuadra en una vía secundaria o Local Clase A, la cual es de 100 metros, esto debido a que es la distancia más corta en comparación con la longitud de una cuadra de la Colectora Clase B o vía urbana principal. En base a lo expuesto anteriormente, el alcance de la tecnología de transmisión inalámbrica se establece en 100 metros. Una vez definido el alcance de la tecnología de transmisión en base a las dimensiones de la infraestructura vial y la distancia de detención, se pone en consideración distintos tipos de intersección, para así, definir las alertas a emitir en los automóviles cuando se produce el conflicto de paso.

En las figuras utilizadas dentro de esta sección para ilustrar las intersecciones y los conflictos de paso; los automóviles que circulan en la vía principal están representados por flechas de color azul y los automóviles que circulan en la vía secundaria por flechas de color rojo. Además, se supone que todos los vehículos se encuentran dentro del alcance de la señal de transmisión inalámbrica del nodo ubicado en la intersección, dicha señal, es representada por los arcos dibujados con líneas entrecortadas, también se supone que los vehículos cuentan con neumáticos y sistema de frenos en buen estado y además la calzada se encuentra con pavimento seco.

1.2.1. Intersecciones en T o unión de vías

En primera instancia se considera el escenario más sencillo, una intersección en T entre una vía principal Colectora Clase B de dos carriles y una secundaria Local Clase A de un carril, ambas vías de un solo sentido como se muestra en la figura 1-1.

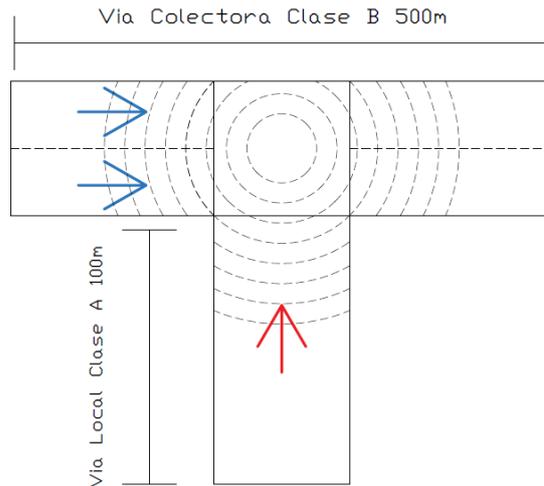


Figura 1-1: Intersección T simple entre vías: Colectora clase B y Local clase A

Fuente: GAD municipal de Riobamba; Libro IV: De Las Normas de Arquitectura y Construcción, 2021

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En este escenario el derecho de paso lo tienen los automóviles que circulan por la vía principal por lo que las situaciones de riesgo que se consideran junto con las alertas a mostrar son:

- Los automóviles de la vía principal y de la secundaria circulan dentro del límite de velocidad y no superan la distancia de detención. En este caso, el sistema informa a todos los vehículos de la presencia de los otros, mostrando velocidad, distancia a la intersección del auto con mayor velocidad, así como también la cantidad de nodos móviles cercanos a la intersección.
- Existe un automóvil en la vía secundaria circulando a exceso de velocidad y también autos en la vía principal circulando dentro del límite de velocidad, todos sin superar la distancia de detención. En esta situación el sistema alerta a todos los autos de la vía principal informándoles del exceso de velocidad del automóvil que se acerca por la vía secundaria. Al automóvil con exceso de velocidad se le pide disminuir de inmediato la velocidad. Se aplica lo mismo si el que excede el límite de velocidad es el vehículo que circula por la vía principal, pero se intercambian las alertas.
- En caso de que los vehículos que circulen en la vía secundaria sobrepasen la distancia de detención, circulando tanto al límite de velocidad como en exceso, se les informará a los autos de la vía principal y también al vehículo de la vía secundaria.

El análisis de los conflictos y alertas para el escenario anterior puede extenderse para aquellas intersecciones en las que la vía principal es de dos carriles y doble sentido, también para cuando la secundaria es de doble carril o uno solo, pero en ambos casos esta vía es de un solo sentido

como se muestra en la figura 2-1. Aunque en estos escenarios se deben tener en cuenta además las siguientes consideraciones:

- Determinar si los autos que circulan en la vía principal se acercan o alejan de la intersección. Con esto no se muestran alertas innecesarias a los autos que se alejen de la zona de conflicto y se optimiza el uso de recursos de procesamiento.
- Determinar cuál vehículo en los carriles de la vía secundaria o principal representa mayor peligro, es decir, establecer que vehículo lleva la mayor velocidad y en consecuencia la mayor distancia de detención necesaria.
- Aumenta el tiempo y la potencia de procesamiento al existir más autos dentro de la zona de conflicto y mayores consideraciones de riesgo.

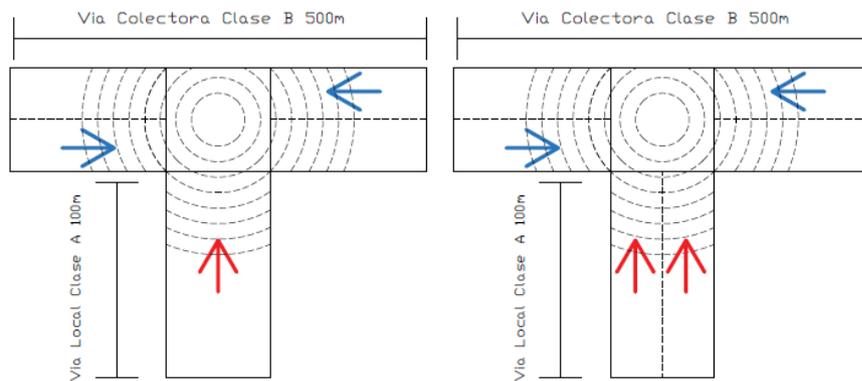


Figura 2-1: Intersecciones en T entre vías Colectora clase B y Local clase A

Fuente: GAD municipal de Riobamba; Libro IV: De Las Normas de Arquitectura y Construcción, 2021

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

1.2.2. Intersecciones en cruz o cruce de dos vías

Para este escenario se consideran el cruce de dos vías Locales de Clase A ambas de dos carriles y un solo sentido, así como también de doble sentido, los dos escenarios se muestran en la figura 3-1.

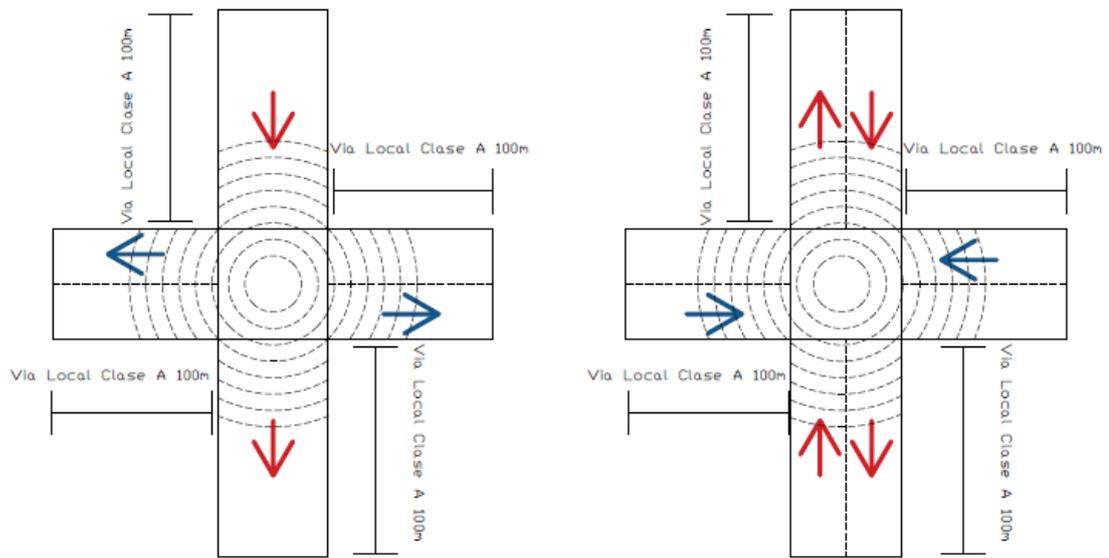


Figura 3-1: Intersecciones en cruz vías colectora clase B y local clase A

Fuente: GAD municipal de Riobamba; Libro IV: De Las Normas de Arquitectura y Construcción, 2021

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Aquí se puede aplicar el mismo análisis de los potenciales peligros y sus respectivas alertas realizado en la sección anterior, teniendo además en consideración que en este escenario el peligro lo representan los vehículos que se acercan a la intersección tanto en la vía principal como en la secundaria, y de la misma manera, si las vías que conforman la intersección son de doble carril y dos sentidos. En todos los casos mencionados, aumenta el tiempo y la potencia de procesamiento, así como también la complejidad del algoritmo que gestiona los datos.

Con el fin de garantizar la funcionalidad del sistema de alerta temprana y de no necesitar un algoritmo complejo, y por tanto, permitir un desarrollo con hardware menos potente y más costeable, se opta por tomar como posibles escenarios para la aplicación del sistema; una intersección en T entre una vía Colectora Clase B y una Local Clase A, ambas de dos carriles y un solo sentido, así como también una intersección en cruz entre dos vías Locales Clase A ambas de dos carriles y un solo sentido, las mismas que se observan en la figura 4-1.

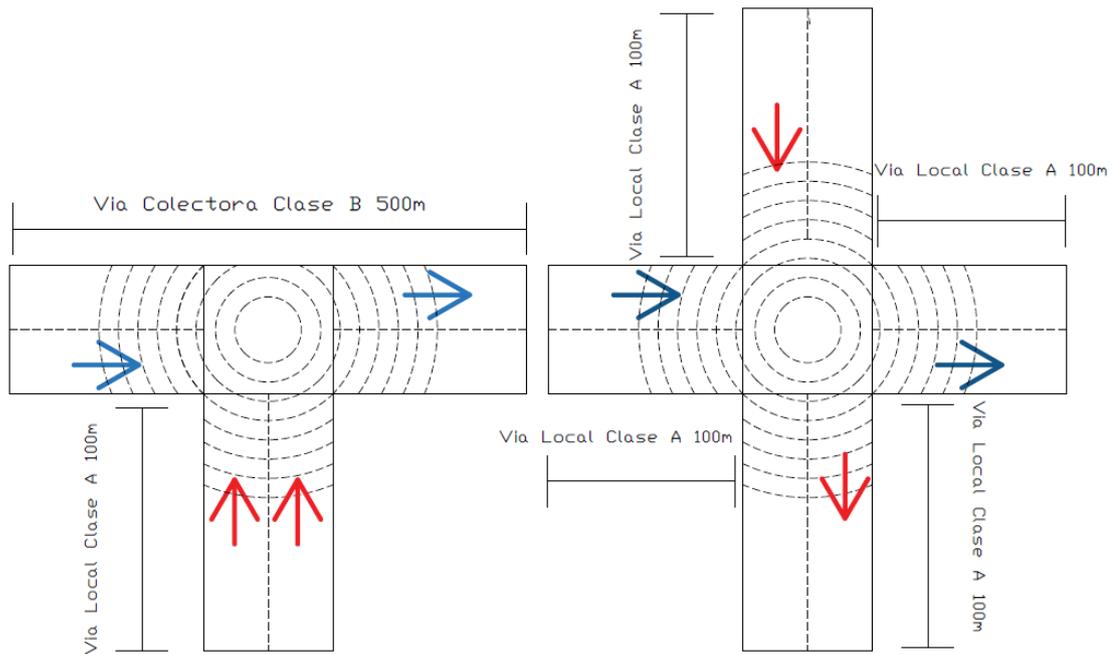


Figura 4-1: Intersecciones candidatas para el desarrollo del sistema

Fuente: GAD municipal de Riobamba; Libro IV: De Las Normas de Arquitectura y Construcción, 2021

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

1.3. Redes de sensores inalámbricos WSN

Una red de sensores inalámbricos (*WSN*, por sus siglas en inglés) está constituida por dispositivos autónomos llamados nodos, los mismos que se distribuyen a lo largo del área de trabajo y cuyo principal objetivo es monitorear parámetros físicos y/o químicos. Los nodos tienen la capacidad de asociarse de manera colaborativa para recolectar datos y enviarlos hacia un nodo central, y pueden también, determinar la mejor ruta para la transmisión de datos. Entre las muchas características de la *WSN*, se puede destacar su bajo consumo de energía, dotando de esta manera de gran autonomía a los dispositivos que la conforman, por tanto, permitiendo aplicaciones en localizaciones de difícil acceso. Como desventaja, se puede mencionar la dificultad que presentan en cuanto a gestión de datos y despliegue de nodos. Cabe mencionar, que las *WSN* generalmente son bidireccionales lo cual permite configurar dispositivos, o a su vez enviar comandos (Tekniker Member of Basque Research & Technology Alliance, 2021).

1.3.1. Arquitectura de una red WSN

Una red de sensores inalámbrica (*WSN*) conformada por un conjunto de nodos, equipados de uno o más sensores que se comunican con otros recursos y con actuadores a través de una red de

comunicación, normalmente, tiene tres niveles que la constituyen para su funcionalidad como se muestra en la Figura 5-1 (Pazmiño y Sánchez, 2010, p.19).

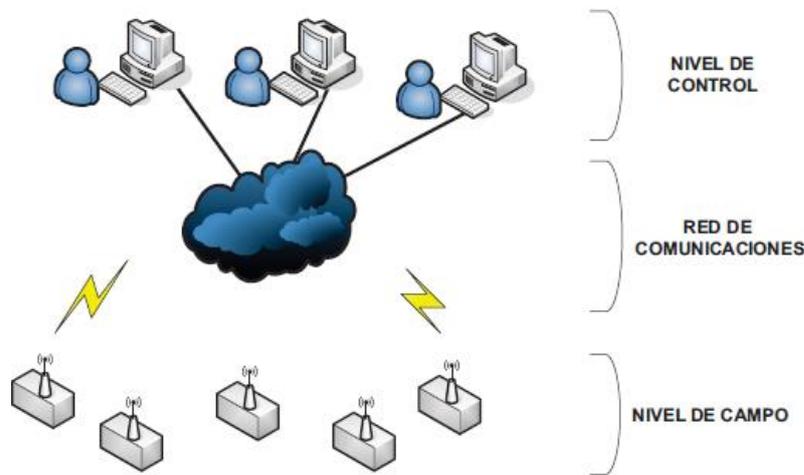


Figura 5-1: Arquitectura de redes de sensores inalámbrica (WSN)

Fuente: Pazmiño y Sánchez, 2010

En el primer nivel está el campo, el cual está conformado por un conjunto de actuadores o a su vez de sensores cuya función es observar los fenómenos naturales tales como: acústica, óptica, térmica u otros. El segundo nivel está compuesto por la red de comunicaciones, la cual, constituye la entrada de la información al sistema. El tercer nivel se encarga de tomar las decisiones en base a la información recolectada por los sensores, en base a esto, los actuadores reciben órdenes y las ejecutan (Pazmiño y Sánchez, 2010, p. 19).

1.3.2. Análisis comparativo de topologías de comunicación inalámbrica

Se llama topología de comunicación inalámbrica a las diferentes estructuras de intercomunicación en las que se pueden asociar las redes de transmisión de datos. Ocurre cuando los dispositivos de control o automatización como: sensores, actuadores, robots programables y demás, intercambian información para interconectarse físicamente mediante una estructura seleccionada. La topología física, es aquella que define la estructura física de la red, mientras que la topología lógica comprende un grupo de parámetros generalmente asociados a la topología física, la cual, genera la gestión de transmisión de los datos hacia la red (Rosado, 2003, p. 21).

El uso de una determinada topología es influenciado por el flujo de información, así como también por el control de la red y en la forma que se puede llegar a expandir o actualizar (Rosado, 2003, p. 21). La topología de red va a depender también, de la cantidad de nodos que se requieran, así como

de la tasa de datos a ser enviados, además de la distancia de transmisión y de acuerdo con el requerimiento de energía, tomando en cuenta estas consideraciones se seleccionan tres posibles tipos de topologías que se pueden aplicar sin descartar el resto de ellas (Bravo y Belduma, 2017, p.3).

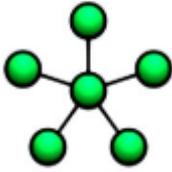
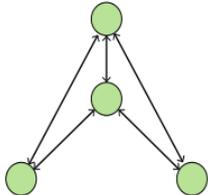
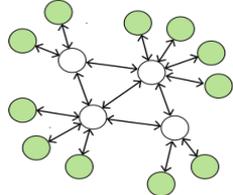
Topología estrella. Es una distribución de red sencilla, tiene un nodo que hace la función de coordinador, él puede enviar o recibir los mensajes de los nodos restantes. Los nodos solo pueden comunicarse con el nodo coordinador, por lo que la comunicación entre ellos es nula. El beneficio de esta topología es que mantiene a los nodos remotos con consumo de energía mínima. La principal desventaja que poseen este tipo de topología es la dependencia de un nodo para poder realizar la gestión de la red, así como el rango del coordinador para que se pueda mantener una comunicación con los sensores que conforman la red (Bravo y Belduma, 2017, p.3).

Topología malla. Permite la transmisión de cualquier nodo que se encuentre dentro del rango o en la misma red, generalmente está compuesta por nodos multi-trayecto, los cuales, son los encargados de transmitir los mensajes de los nodos de bajo consumo hacia los otros nodos de la red. Para que un nodo envíe información hacia otro que se encuentra fuera del rango de comunicación, debe usar un nodo intermedio, el cual, le permite redirigir el mensaje hacia el nodo destino. Los principales beneficios de utilizar esta topología recaen en su escalabilidad y redundancia. La principal desventaja del uso de esta topología es el derroche de energía de los nodos que usan los multi-trayectos, lo cual, lleva a la limitación en la duración de la batería. La comunicación de un nodo hacia otro está ligada a los saltos que se realicen, entre mayor es el número de saltos hacia el destino, el tiempo de entrega del mensaje también es mayor (Bravo y Belduma, 2017, p.3).

Topología híbrida. La topología híbrida es una combinación de las topologías estrella y malla, esto permite utilizarla para implementar una red que sea más robusta y a la vez versátil, manteniendo el consumo de la energía de los nodos participantes en la red en el mínimo posible. Un beneficio de usar esta topología es no permitir que los nodos con menor consumo de energía tengan la capacidad de enviar mensajes, delegando así, toda la responsabilidad de la transmisión a los nodos que son multi-trayecto. Esta topología es muy usada en la red mallada para las aplicaciones que tienen tecnología ZigBee (Bravo y Belduma, 2017, pp. 3-4).

Comparación entre las topologías de red. El análisis comparativo de las diferentes topologías de red se resume en la Tabla 3-1, la cual describe los beneficios y desventajas que tiene cada una de las topologías.

Tabla 3-1: Características de las topologías de red

Topología	Representación	Análisis de la topología
Estrella		<p>Una de las topologías que es un estándar en las redes inalámbricas.</p> <p>Mantiene a los nodos remotos con consumo de energía mínima.</p> <p>Posee un nodo coordinador.</p> <p>Los nodos solo pueden conectarse con el nodo coordinador.</p>
Malla		<p>Permite la transmisión de cualquier nodo que se encuentre dentro o en el mismo rango de la red.</p> <p>La topología debe estar ligada a la escalabilidad y a su redundancia.</p> <p>Compuesta por nodos multi-trayectos.</p>
Híbrida		<p>Utilizada para implementar redes robustas.</p> <p>Esta topología es muy usada en la red mallada de tecnología ZigBee</p>

Fuente: Bravo y Belduma, 2017

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Una vez definidas las tres topologías de redes más comunes, se selecciona la topología de red en estrella ya que posee un nodo coordinador el mismo que recibe la información de los nodos sensores y procesa la información, además mantiene a los nodos remotos con un consumo bajo de energía.

1.3.3. Análisis comparativo de tecnologías de comunicación inalámbrica

En esta sección se realiza el estudio las tecnologías de transmisión inalámbricas consideradas para el desarrollo del sistema de alerta temprana, las mismas que son:

Sistema global para comunicaciones móviles GSM. Es un sistema digital estándar usado para la comunicación celular, su velocidad de transmisión es de 270 Kbps y la banda de frecuencia depende de la región, siendo 900 y 1800 MHz para Europa y 1900 MHz para Estados Unidos. Al ser una tecnología ampliamente extendida, la cobertura GSM es prácticamente mundial, depende en gran medida del operador y en general es de excelente calidad dentro de los sectores urbanos. Por otra parte, la cobertura se ve afectada en ubicaciones geográficas donde existen pocas antenas que proveen la señal o en lugares donde existen interferencias físicas, como por ejemplo túneles. Otra desventaja es el posible colapso de la red por el acceso simultáneo de números usuarios y el costo del servicio (Porras, 2012; Universidad Internacional de Valencia, 2018).

ZigBee. Es un estándar abierto que especifica un conjunto de protocolos para el diseño de redes inalámbricas de corta distancia (300 metros en línea de vista) y baja tasa de transmisión (hasta 250Kbps), fue desarrollado por la ZigBee Alliance y está basado en el estándar IEEE 802.15.4. Opera en la banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical* por sus siglas en inglés) de 2,4GHz y está diseñado para cumplir un ultra bajo consumo, lo que permite usarlo en equipos a batería, los dispositivos transceptores son de fácil instalación, su uso es libre y gratuito. Las principales áreas de aplicación de ZigBee son el control y monitoreo, permite conectar hasta 65 000 dispositivos, además existen módulos electrónicos que toman como base el protocolo ZigBee y pueden tener un alcance de hasta 24 Km con antenas de alta ganancia, aunque su costo es elevado (Connectivity Standards Alliance, 2021).

Radiofrecuencia. Tecnología de comunicación inalámbrica basada en la propagación de ondas electromagnéticas de baja energía, cuyas principales características son: bajo costo, fácil implementación, brinda la posibilidad de transmitir y recibir información gratuitamente en la banda ISM de 2.4GHz, además es importante mencionar que en el mercado existen transceptores de gran alcance (1000m), de muy bajo costo y alta compatibilidad con tarjetas de desarrollo y sistemas embebidos en general (García et al., 2018, pp. 821-831).

Z-wave. Es una estándar propiedad de Silicon Labs, permite conectar 232 dispositivos en un rango de acción de hasta 100 metros, tiene una velocidad de transferencia de datos máxima de

100 Kbps. Usa distintas bandas de frecuencia, siendo para Estados Unidos 908.4/908.42/916 MHz (Z-Wave Alliance, 2021).

Una vez presentadas las características de las tecnologías, se establece que la red inalámbrica a desarrollar debe servir como una herramienta para gestionar la información adquirida por los módulos de posicionamiento ubicados en los nodos móviles (vehículos). Además, la red debe detectar dichos nodos para determinar las alertas preventivas a ser mostradas, por lo tanto, se establece como premisas de diseño que: el número de nodos móviles conectados a un nodo fijo (intersección) es máximo 8, en una intersección de tipo cruz entre vías Local Clase A y Colectora Clase B, es decir, 2 automóviles por carril, y de un máximo de 4 nodos móviles para la intersección tipo T. Además, se establece el alcance de la señal inalámbrica en 100 metros y que los nodos móviles deben ser identificables de manera única en la red. Por otra parte, las características de las tecnologías de comunicación inalámbrica a considerar son:

- **Área de cobertura:** debe ser de al menos 100 metros o una cuadra promedio.
- **Tasa de transferencia:** debe ser media-alta, se transmite información que contiene datos de velocidad, posición y dirección de red de los nodos móviles además de posición del nodo fijo y los datos usados por el protocolo de comunicación.
- **Número de dispositivos en red:** debe soportar al menos 8.
- **Topología de red apropiada:** existe un nodo central por lo que se opta por la topología en estrella.
- **Administración de la energía:** la tecnología debe hacer uso eficiente de la energía pues a los nodos se les suministra potencia por medio de baterías.
- **Economía:** es importante que la tecnología sea costeable.

Como guía para realizar el análisis comparativo se usa una escala de prioridad del 1 al 3, donde 1 es crítico, 2 significa deseable y 3 poca prioridad. En la tabla 4-1, se muestran las prioridades consideradas por los autores para el problema de aplicación.

Tabla 4-1: Prioridades en las características de la tecnología inalámbrica

Características de la tecnología	Prioridad
Área de cobertura	1
Tasa de transferencia	1
Número de dispositivos en red	2
Topología de red	3
Administración de la energía	1
Costo	1

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Por último, en la tabla 5-1 se presentan las características de las tecnologías de transmisión inalámbrica consideradas para el desarrollo del sistema de alerta temprana, con el fin de establecer la comparación.

Tabla 5-1: Características de las tecnologías de transmisión inalámbrica

Nombre Comercial	ZigBee	GSM/GPRS	Radiofrecuencia	Z-Wave
Estándar	802.15.4	CDMA/1xRTT	Espectro electromagnético	-
Aplicación	Control y monitoreo	Datos y voz	Datos, voz, video	Control y monitoreo
Recursos del sistema	4KB-64KB	16MB	-	4KB-64KB
Duración de la batería (Días)	100-1000	1-7	100-1000	100-1000
Dispositivos en red	65000	1	-	232
Tasa de transmisión (kbits/s)	20-250	64-128	250-1Mbps-2Mbps	9.6-40
Rango de transmisión (metros)	1-300	1000	100-1000	1-30
Métricas relevantes	Confiable, bajo consumo	Calidad, alcance	Bajo costo, fácil implementación, banda ISM gratuita, alcance, bajo consumo	Confiable, bajo consumo

Fuente: Del Carmen Silva López, 2007, pp. 30-37

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En base a las características de las tecnologías y su prioridad asignada, se opta por considerar para el desarrollo del sistema una transmisión inalámbrica por radiofrecuencia, al ser la tecnología más costeable, presentar el mayor alcance, bajo consumo y tazas de transmisión de datos media y alta,

por lo que en posteriores secciones relacionadas al análisis del hardware que conforma el sistema se presentan módulos transeptores que usan esta tecnología.

1.4. Análisis del hardware que integra un sistema de alerta temprana

El sistema de alerta temprana para cumplir con sus funciones y tareas debe estar conformado fundamentalmente de los siguientes elementos de hardware: sistema microcontrolado, módulo GPS, módulo transeptor inalámbrico, pantalla de visualización, dispositivo de audio y fuente de alimentación. En esta sección se presentan y describen las características de los módulos comerciales disponibles en el mercado local que son contemplados para la implementación del sistema de alerta temprana y al final de esta, se realiza un análisis comparativo para determinar la familia o modelos de módulos adecuados para la aplicación.

1.4.1. Módulos de posicionamiento global

GPS (*Global Positioning System*, por sus siglas en inglés) es un sistema de navegación por satélite que puede funcionar en cualquier parte del mundo y puede ser usado de manera gratuita. Mediante un módulo GPS se puede conocer las coordenadas de ubicación en las cuales se encuentra el vehículo y su velocidad (Descubre arduino, 2004).

Módulo GPS NEO-7M. Este módulo cuenta con una antena de cerámica incluida la cual se conecta directamente a la PCB. El módulo se basa en un receptor Ublox NEO-7M, posee una alta precisión de los datos adquiridos, además posee una batería de respaldo que permite conservar los datos que son recolectados en caso de fallo en la alimentación, su voltaje de funcionamiento es de 3,3V a 5V, proporciona la información en forma de sentencias NMEA (del inglés *National Marine Electronics Association*). En la tabla 6-1 se observa el módulo GPS, el cual es compatible con Arduino. Si el Arduino transmite información hacia el módulo GPS se necesita un convertidor de nivel ya que las señales que entran y salen son de 3,3 V, en el caso de que solo se desee recibir datos estandarizados de acuerdo con las sentencias NMEA basta con conectar el pin TX con el RX de Arduino y recibir los datos que envía el módulo, en este caso no hace falta un convertidor de niveles ya que el Arduino reconoce los 3,3 V como nivel alto (Ublox, 2014).

Módulo Beitian BN-880 GPS. Este módulo GPS es perfecto cuando se utiliza controladores de vuelo para código abierto, además cuenta con memoria flash permitiendo guardar configuraciones, por lo cual no es necesario reiniciarlo al momento de volverlo a usar. Su nivel

de datos es RS-232 o TTL. Cuando se utiliza para Raspberry Pi, no es necesario un controlador, pero se debe instalar un software adicional (AliExpress, 2010).

El análisis comparativo de los diferentes módulos GPS se resume en la Tabla 6-1, donde se describe las especificaciones técnicas que posee cada módulo.

Tabla 6-1: Características de los módulos GPS

Dispositivos	Representación	Especificaciones módulos GPS
<p>Módulo Beitian BN-880 GPS</p>		<p>Fuente de alimentación 3,3 V o 5,0 V en CC Corriente 50 mA a 5 V Precisión de velocidad: 0,1 m/s Velocidad máxima 600 m/s Altura máxima 18000 m Tasa de soporte 38400 bps Frecuencia de salida 1Hz a 10 Hz Precisión de posicionamiento horizontal 3,5m</p>
<p>Módulo GPS NEO-7M</p>		<p>Voltaje operación 3,3 -5,0 V en CC Corriente de funcionamiento 35 mA Impedancia TXD/RXD 510Ω aplicaciones Formato recepción GPS-NMEA Tiempo de posicionamiento en frío 30 s Tiempo de posicionamiento en caliente 28 s Velocidad máxima actualización 10 Hz Comunicación serial UART Altitud 50000 m Velocidad de baudios 9600 bps Precisión de posicionamiento horizontal 2,5m Velocidad máxima: 500 m/seg Precisión de velocidad de 0,1 m/seg</p>

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021.

Fuente: Ublox, 2014; AliExpress, 2010

Una vez descritas las características de los diferentes módulos GPS se selecciona la familia de módulos GPS NEO-7M ya que posee una batería de respaldo, garantizando que los datos adquiridos queden guardados, posee una precisión de velocidad de 0,1 m/seg y una precisión de

posicionamiento horizontal de 2,5m y fundamentalmente porque se encuentra disponible en el mercado local y es idónea para trabajar con tarjetas de desarrollo.

1.4.2. Módulos de transmisión y recepción inalámbrica

La función de este componente es la de transmitir inalámbricamente los datos del nodo móvil al nodo fijo y viceversa. Para su análisis comparativo se contempla el alcance de la señal, la tasa de transferencia de datos, el número de dispositivos que pueden estar en red, el consumo de energía y el costo.

Módulo transceptor inalámbrico NRF24L01. Fácil de utilizar, posee un bajo consumo, la frecuencia de funcionamiento es 2.4 GHz. Tiene la capacidad de enviar y recibir datos, pero no se puede realizar las dos opciones a la vez, por este motivo su costo es bajo y el funcionamiento es sencillo y a la vez robusto. El módulo transceptor cuyas características se presentan en la tabla 7-1 utiliza una interfaz SPI (Interfaz Periférica Serial), siendo ideal para comunicaciones inalámbricas (Nordic Semiconductor ASA, 2004).

XBee PRO-SERIE 3. Permite realizar conexiones inalámbricas entre dispositivos, presenta un costo medio, su frecuencia de trabajo es de 2.4 GHz, además, se puede crear redes con conexión punto a punto, punto a multipunto, broadcast y malla. Con la serie 3 de Xbee ya no es necesario usar un microcontrolador, ya que usa microphyton y se puede programar los nodos Xbee para realizar las operaciones necesarias, es decir, se procesa la información de forma directa con el Xbee (MCI Electronic, 2021).

El análisis comparativo de los diferentes módulos transceptor se resume en la Tabla 7-1, la cual describe las especificaciones técnicas que posee cada módulo.

Tabla 7-1: Características de los módulos transceptores

Dispositivos	Representación	Especificaciones del Transceptor
<p><i>Módulo transceptor inalámbrico NRF24L01</i></p>		<p>Voltaje de funcionamiento 1,9 - 3,3 V Corriente transmitiendo 135 mA a 19dBm Alcance transmisión en línea de vista 1000 m en zona abierta Frecuencia banda ISM 2,4- 2,5 Ghz Canales 125. Tasa de transferencia datos (1Kbps, 2Kbps, 250Kbps). Comunicación SPI Pines 8 Temperatura operación -40° C a 80° C</p>
<p><i>XBEE PRO-SERIE 3</i></p>		<p>Alcance en línea de vista 750m Potencia de transmisión 10dBm Corriente de consumo 340mA Frecuencia ISM 2,4 Ghz Velocidad de transmisión 250kbps Alimentación 2,8 a 3,4V</p>

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Fuente: Nordic Semiconductor ASA, 2004; MCI Electronic, 2021

En base a la tabla 7-1 se elige como módulo transceptor al dispositivo NRF24L01, por su alcance de transmisión, su tasa de transferencia de datos, consumo moderado y costo asequible.

1.4.3. Tarjetas de desarrollo

Las tarjetas de desarrollo con el paso del tiempo han evolucionado notablemente, encontrándose en el mercado tarjetas fáciles de programar. En el sistema de alerta temprana la tarjeta de desarrollo se encarga de procesar la información y mediante un algoritmo toma las decisiones que se requieren, a continuación, se describen las tarjetas de desarrollo más utilizadas.

Arduino. Es la tarjeta de desarrollo que más se utiliza a nivel mundial, se basa en la línea de microcontroladores AVR de Atmel, tiene pines de configuración analógicos, digitales, entre otros. La popularidad de Arduino no se debe solo a la facilidad de uso del hardware sino también al

software libre, su IDE amigable y a la enorme comunidad de desarrolladores que publican librerías de uso gratuito. Además, Arduino ha logrado evitar los empaquetamientos complejos y desorganizados detalles de programación que tienen los microcontroladores, permitiendo un uso de paquete simple de programar (Arduino, 2021).

Raspberry Pi. Es un pequeño ordenador, se puede conectar a un televisor y a un teclado para poder controlarlo, esta placa está compuesto por un SoC, memoria RAM, CPU, cuenta con puertos de entrada y salida de audio y video, ranura SD para almacenamiento, conectividad para internet, alimentación, reloj, conexión para periféricos de bajo nivel, la tarjeta Raspberry Pi es un ordenador el cual nos permite realizar diversas aplicaciones (Rodríguez, 2018).

ESP32. Es un sistema de bajo costo económico y bajo consumo energético, cuenta con un microcontrolador de chip con wifi y bluetooth. Este módulo maneja un microcontrolador Tensilica LX6 con variaciones de doble núcleo y a su vez de simple núcleo, también tiene incluido interruptores de antena incorporados, amplificador de potencia, filtros y módulos de administración de energía (Arturo, 2020).

El análisis comparativo de las diferentes tarjetas de desarrollo se resume en la Tabla 8-1, la cual describe las especificaciones técnicas que posee cada tarjeta.

Tabla 8-1: Características de las tarjetas de desarrollo

Dispositivos	Representación	Especificaciones de tarjetas de desarrollo
<p>Arduino Nano</p>		<p>Microcontrolador ATmega328 Pines analógicos 8 Pines digitales 22 (6 PWM) Voltaje de operación 5 V Corriente máxima I/O 40 mA Puerto serial UART 0 (Rx) 1 (Tx) SPI 10(SS),11(MOSI),12(MISO),13(SCK) I2C A4(SDA), A5(SCL) Memoria 32 KB Interrupción externa pines 2 y 3 Corriente de consumo 19 mA</p>
<p>Raspberry Pi</p>		<p>Procesador ARM cortex- A72 de 1,5 GHz Slot para tarjeta microSD de hasta 32 GB Bluetooth 5.0, Wifi-Fi, Gigabit Ethernet Puertos de entrada y salida de audio y video</p>
<p>ESP32</p>		<p>Amplificador de potencia Amplificador de bajo ruido Interruptores de antena Wifi modo dual 2,4 Ghz Chip bluetooth TSMC 40nm Pines de entrada/ salida</p>

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Fuente: Arduino, 2021; Arturo, 2020; Rodríguez, 2018

Una vez detallada las características de las tarjetas de desarrollo se selecciona la familia Arduino por su bajo costo, existencia de librerías para múltiples aplicaciones, por su comunidad de desarrollo que brinda información de calidad, costo asequible y disponibilidad en el mercado local a un costo asequible.

1.4.4. Dispositivos de visualización y audio

El dispositivo de visualización que se contempla para el desarrollo del sistema de alerta temprana es la pantalla, en ella se muestran las alertas al conductor del vehículo. Debe ser suficientemente grande y tener un buen contraste para que el conductor este en la capacidad de reconocer la alerta de manera rápida y efectiva.

Pantalla táctil capacitiva. Esta pantalla tiene un control táctil capacitivo con una imagen de giro vertical y horizontal, necesita una fuente de alimentación de 12V y 1A, tiene la capacidad de soportar un contenido gráfico de 864 x 480 x 24 bits a través de SSD, además tiene un disco CD con un controlador relacionado, el voltaje del puerto de datos no debe sobrepasar los 3,6 V (Amazon, 2015).

Pantalla LCD (LCM12864R). Este tipo de pantalla se contempla por su disponibilidad en el mercado y debido a que posee un ajuste de contraste para la pantalla LCD, permitiendo que la alerta temprana sea reconocida con niveles altos de luz ambiente. Además, permite representar datos alfanuméricos y recibir comandos, la pantalla es idónea para trabajar con Arduino, aunque es necesario el uso del módulo interfaz serial I2C para optimizar el uso de pines E/S de la tarjeta de desarrollo (Qingyun, 2009, pp. 3-4).

El análisis comparativo de los dispositivos de visualización se resume en la Tabla 9-1, la cual describe las especificaciones técnicas que posee cada dispositivo.

Tabla 9-1: Características de los dispositivos de visualización

Dispositivos	Representación	Especificaciones de dispositivos visualización
<p>Pantalla táctil capacitiva</p>		<p>Tamaño 7 pulgadas</p> <p>1 puerto HDMI</p> <p>Voltaje de funcionamiento 12V</p> <p>Corriente de 1 A</p> <p>Control táctil capacitivo</p> <p>contenido gráfico de 864 x 480 x 24 bits a través de SSD</p>
<p>Pantalla LCD (LCM12864R)</p>		<p>Pulgadas 3,2"</p> <p>Pixeles 128 largo X 64 ancho</p> <p>Voltaje de operación 3,3V a 5V</p> <p>Corriente operación 250 mA</p> <p>Control puerto serie/ paralelo PSB</p> <p>Contraste variable</p> <p>Velocidad datos 2 Mhz</p> <p>Peso 80 g</p>

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Fuente: Amazon, 2015; Qingyun, 2009

En base a las características presentadas en la tabla 9-1, se establece como dispositivo de visualización a la pantalla LCD (LCM12864R) por su bajo consumo de energía, contraste variable, así como también, por su disponibilidad en el mercado local con precio accesible.

Módulo interfaz serial I2C. El módulo que se muestra en la tabla 10-1 tiene un chip I2C PCF8574 el mismo que convierte datos en serie I2C a datos en paralelo para la pantalla LCD, el beneficio de este módulo es que permite conectar la pantalla LCD con tan solo dos pines para poder visualizar los datos, lo cual es idóneo para optimizar el uso de pines de la tarjeta de desarrollo (Rifansyah, 2017).

Mas especificaciones técnicas del dispositivo se muestran en la tabla 10-1.

Tabla 10-1: Principales características del Módulo Interfaz serial I2C

Dispositivo	Representación	Especificaciones del módulo serial I2C
<p>Módulo Interfaz serial I2C</p>		<p>Microcontrolador ATMEL ATMEGA328 Voltaje de entrada 5 V- 9 V CC Voltaje de salida 3,3 V – 5 V CC Corriente máxima I/O 40 mA Interfaz I2C/ TWI/ SPI Líneas de salida 4 Potenciómetro ajuste contraste y luz de fondo de la pantalla LCD Dirección I2C del dispositivo 0x 20/ 0x27 Pines digitales I/O 14 Pines analógicos I/O 6 Tamaño 5,4 cm x 1,9 cm</p>

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Fuente: Rifansyah, 2017

El dispositivo de audio que se contempla para el desarrollo del sistema de alerta temprana es un transductor electroacústico, su aplicación es generar alarmas sonoras en el sistema para alertar al conductor mediante la activación de este componente cuando existe una posible colisión.

Buzzer Zumbador 5 V Activo. Es un pequeño dispositivo capaz de causar un sonido diferente, de acuerdo con la frecuencia de conmutación. El buzzer tiene un oscilador incorporado por lo que solo es necesario suministrar corriente al dispositivo para que genere su sonido (Prosignal, 2012, p.1).

Bocina de alerta 9 V. Es un dispositivo utilizado para las alarmas de sistemas de seguridad. GSM, su función es generar un ruido de 120 dB con un voltaje de 9 V lo que causa su activación y un sonido fuerte (Newchic, 2014).

El análisis comparativo de los dispositivos de audio se resume en la Tabla 11-1, la cual describe las especificaciones técnicas que posee cada dispositivo.

Tabla 11-1: Características de los dispositivos de audio.

Dispositivos	Representación	Análisis de dispositivos auditivos
<p>Buzzer Zumbador 5V Activo</p>		<p>Voltaje de entrada 5 VDC Corriente máxima 30 mA Frecuencia resonancia 23 Khz Salida de sonido mínima a 10 cm 85 Db Dimensiones 12 mm x 9,5 mm Pines 2 Peso 2 g</p>
<p>Bocina de alerta 9 V</p>		<p>Voltaje nominal 9 VDC Corriente nominal 100 - 150 mA Frecuencia resonante 120 dB Dimensiones 52x52x48 mm Frecuencia de sonido 3,8 KHz + 10%</p>

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Fuente: Newchic, 2014; Prosignal, 2012, p.1

En base a las características presentadas en la tabla 11-1, se establece como dispositivo de audio al buzzer zumbador 5 V activo por su costo, frecuencia que posee y debido a que no requiere un voltaje superior a los 5 V. Así como también su disponibilidad en el mercado local.

1.4.5. Fuentes de alimentación

Los componentes electrónicos que conforman el sistema de alerta temprana tienen un determinado nivel de consumo de corriente y voltaje, en otras palabras, es necesario suministrarles potencia, por lo que en esta sección se pone en consideración diferentes fuentes de alimentación en base al consumo estimado de los módulos considerados en las secciones anteriores.

Baterías LIPO. Son baterías recargables basadas en el polímero de litio, su energía es fiable, tienen gran capacidad de almacenamiento y una tasa de descarga muy alta (EcuRed, 2021).

Baterías LITIO. Son baterías recargables, poseen una alta calidad y capacidad de corriente, estas baterías proporcionan una fuente de alimentación eficiente, son ligeras, pueden soportar altos

picos de corrientes, el voltaje de la batería debe mantenerse entre 4,2V el máximo y 2,75V el mínimo para preservar la vida útil de la batería. En la tabla 12-1 se observan las baterías recargables de iones de Litio, las mismas que se usan para energizar los circuitos que componen el dispositivo de alerta temprana, el voltaje que poseen las baterías es de 3,7V, son recargadas mediante un módulo TP4056 para así garantizar que el sistema cuente con energía (Ultrafire, 2020).

Toma de mechero del vehículo. Es un conector eléctrico que se puede encontrar en casi todos los automóviles, este conector también puede ser utilizado para suministrar energía eléctrica mediante un enchufe de mechero o un transformador, por esta toma puede circular una corriente máxima de 10 A (MundoMotor, 2021).

El análisis comparativo de las fuentes de alimentación se resume en la Tabla 12-1, la cual describe características que posee cada dispositivo.

Tabla 12-1: Características de las diferentes fuentes de alimentación

Dispositivo	Representación	Especificaciones fuentes de alimentación
Batería LIPO		Energía fiable Batería recargable Tasa de descarga muy alta Gran capacidad de descarga
Batería LITIO		Voltaje de uso 2,75 V – 3,7 V Capacidad de corriente normal 2980 mAh Descarga 1 C Descarga estándar 600 mA a 2,75 V Carga 0,5 A – 1 A max 4,35 V Energía volumétrica 577 Wh/I - 11,20 Wh Temperatura operación 0° C – 45 ° C Peso 47 g
Alimentación a través de la toma de mechero del vehículo		Alimentación para dispositivos GPS Recarga para teléfonos móviles Usado como tomacorriente

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Fuente: Ultrafire, 2020; MundoMotor, 2021; EcuRed, 2021

En base a las características de las fuentes de alimentación presentadas en la tabla 12-1, se determina alimentar el nodo móvil (vehículo) mediante baterías recargables de Litio y emplear la toma de mechero para recargar las baterías. El nodo fijo ubicado en la intersección se alimenta mediante baterías de Litio.

1.4.6. Regulador de voltaje AMS1117 3,3 V

El módulo que se muestra en la tabla 13-1 es un regulador de voltaje que permite obtener una salida estable de 3,3 V a partir de 4,5 V y 7,0 V. Otras características se pueden observar en la tabla 13-1.

Tabla 13-1: Características del regulador de voltaje

Dispositivo	Representación	Especificaciones Regulador de voltaje
Regulador de voltaje AMS1117 3,3 V		Voltaje de entrada 4,5 V- 7 V Voltaje de salida 3,3 V Corriente de salida 1 A Regulación de línea 0,2 % max Regulación de carga 0,4 % max Tamaño 2,5 x 1,1 cm

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Fuente: Systems, 2021

El uso del regulador es fundamental debido a que el módulo NRF24L01 trabaja con una alimentación externa de 3,3 V, este componente electrónico ayuda a que se establezca el voltaje necesario y se encarga de suministrar la corriente estable para el correcto funcionamiento del transceptor.

1.4.7. Módulo TP4056 cargador batería litio con protección

El módulo que se muestra en la figura 11-2 es un cargador de batería, es usado para recargar baterías de litio de una sola celda de 3,7 V a 1 A, posee un chip de protección de batería DW01 el mismo que ofrece una corriente de carga de 1 A. Es capaz de desconectarse cuando la batería se ha cargado por completo para así cuidar su vida útil. Cuando el voltaje de la batería es inferior a los 2,4 V el chip desconecta la carga para proteger a la celda de funcionar con un voltaje

demasiado bajo, se encarga también de proteger contra sobretensiones, no trabaja con voltajes inversos (Ratings,2021, pp. 1-3).

Tabla 14-1: Características del módulo TP4056

Dispositivo	Representación	Especificaciones módulo TP4056
<p>Módulo TP4056 cargador batería litio con protección</p>		<p>Corriente 1 A Carga precisión 1,5 % Voltaje entrada 4,5 V a 5,5 V Voltaje de carga completa 4,2 V Interfaz de entrada Mini USB Indicador Led Rojo (carga en uso) Verde (carga finalizada) Polaridad invertida No Temperatura de trabajo -10 °C a 80 °C</p>

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Fuente: Ratings, 2021, pp. 1-3

El módulo se seleccionó debido a que las baterías del nodo móvil son recargables, de igual manera para el nodo fijo, este módulo garantiza un ciclo de carga y descarga seguro para las baterías. Más especificaciones se observan en la tabla 14-1.

1.5. Sustento matemático para el desarrollo del algoritmo

Para determinar la distancia de los nodos móviles (vehículos) al nodo ubicado en la intersección, se utilizan las coordenadas geográficas de dichos nodos. Para ello se emplea la posición de los móviles definida por la longitud y la latitud. Con estas coordenadas se puede estimar la distancia entre los nodos usando la fórmula de la distancia de círculo máximo o distancia esférica, ecuación 1-1. Dicha expresión presenta un error máximo de 0,5% en la estimación de la distancia al asumir que la tierra es redonda y es implementada por el método “*TinyGPSPlus::distanceBetween()*” de la biblioteca TinyGPS++.h (Hart, 2022).

$$d = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{(\cos(\phi_2) \sin(\Delta\lambda))^2 + (\cos(\phi_1) \sin(\phi_2) - \sin(\phi_1) \cos(\phi_2) \cos(\Delta\lambda))^2}}{\sin(\phi_1) \sin(\phi_2) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \cos(\Delta\lambda)} \right]$$

Ecuación 1-1: Distancia de círculo máximo

Para el uso de la ecuación 1-1 se debe tener las siguientes consideraciones:

- Las latitudes φ y longitudes λ deben estar en radianes
- Considerar a la tierra de forma esférica
- φ_1, λ_1 son la latitud y longitud del punto inicial correspondientemente.
- φ_2, λ_2 son la latitud y longitud del punto final correspondientemente.
- $\Delta\lambda$ es la diferencia $|\lambda_1 - \lambda_2|$
- La distancia d está dada en metros.

La velocidad del vehículo se obtiene directamente del módulo GPS, el mismo, es capaz de brindar este parámetro de forma precisa.

Para calcular la distancia de detención mínima conocida la velocidad del móvil en m/seg, se usa la ecuación 2-1. Dicha expresión contempla el tiempo de reacción total, cuyo valor promedio es de 2,5 segundos para el 90% de los conductores según (Berardo e Irureta, 2021, p.5). Dicho valor de tiempo tiene en cuenta las etapas de reacción total humana (identificación evaluación, emoción, respuesta) y mecánica promedio, también considera el valor del coeficiente de rozamiento longitudinal del asfalto (Berardo e Irureta, 2021, p.7).

$$D_{fmax} = \frac{(V_{vehiculo})^2}{13.132} + t_{reaccion}V_{vehiculo}$$

Ecuación 2-1: Fórmula para calcular la distancia de detención

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta el desarrollo del sistema de alerta temprana siguiendo la metodología *Top Down*, se establece el escenario de aplicación y se definen los requerimientos *hardware* y *software*, la concepción de la arquitectura y los diagramas de bloques para los nodos móviles y el nodo fijo. Se seleccionan los componentes electrónicos que están comercialmente disponibles a nivel local para el desarrollo del sistema, y se presentan sus diagramas de conexión. Además, se describen las herramientas utilizadas para el diseño del software junto con los algoritmos implementados en los nodos y sus diagramas de flujo, finalmente, se presenta el diseño de la interfaz audiovisual para las alertas y los modelos 3D de las carcasas para los nodos móvil y fijo.

2.1. Definición del escenario para la aplicación del sistema

En base a lo expuesto en el capítulo 1 sobre los escenarios a considerar, se toma como objeto de estudio una intersección en cruz entre dos vías locales de Clase A, de un carril en un solo sentido con la presencia de tres vehículos. Para este escenario, las alertas que se muestran sugieren una acción condicionada a la preferencia de paso en conjunto con la evaluación de la distancia de detención y, por ende, de la velocidad de los nodos móviles que circulan en la vía secundaria.

Los posibles casos a considerar junto con las alertas que se presentan en cada uno de ellos, se describen en los siguientes párrafos, en todos los casos, el flujo de la información y la evaluación de las variables es como sigue: todos los nodos móviles envían su información al nodo fijo, dicho nodo, la ordena en función a la velocidad, después, busca el nodo con mayor velocidad y pregunta si ese nodo circula por vía secundaria, si esto se cumple, envía dicha información junto con la coordenada de la intersección y el número de nodos presentes en la intersección a todos los nodos móviles, ellos la reciben y en primera instancia determinan si también circulan en secundaria, si es así, evalúan su espacio de detención y luego evalúan si se encuentran dentro del límite de velocidad, en base a estas dos evaluaciones determinan el tipo de alerta audiovisual. Si, por el contrario, el nodo que se conduce circula en principal, se realiza el proceso mencionado anteriormente, pero con los datos proporcionados por el nodo fijo.

Caso 1. Los nodos móviles se encuentran dentro del alcance de la señal inalámbrica del nodo fijo, todos ellos sin superar el límite de velocidad y la distancia de detención de los móviles que circulan en secundaria es suficiente.

En este caso no se dispara ninguna alerta, se visualiza la velocidad y distancia de separación a la intersección del nodo móvil que se conduce, y también del nodo móvil externo que circula por la secundaria con mayor velocidad junto con su dirección de red. En la figura 1-2, se describen los mensajes que se muestran en este caso.

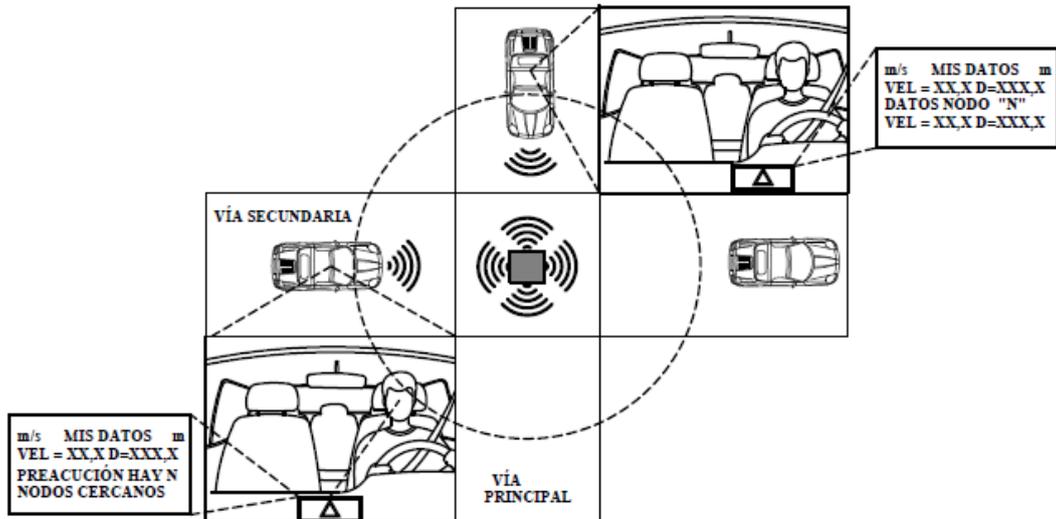


Figura 1-2: Descripción del escenario de aplicación caso 1

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Caso 2. Los nodos móviles se encuentran dentro del alcance de la señal inalámbrica del nodo fijo, todos sin exceder el límite de velocidad, alguno de ellos circula en secundaria y no tiene espacio de detención.

En este caso se dispara la alerta audiovisual en el nodo que no tiene espacio de detención, al mismo se le muestra un mensaje pidiéndole frenar y a los demás nodos en secundaria se les informa de la cantidad de nodos que están próximos en la intersección. Los nodos móviles que circulan en principal determinan la alerta por insuficiente espacio de detención, si el nodo que no cumple esta condición circula en secundaria y es también el nodo con mayor velocidad o el único que está en secundaria. En la figura 2-2, se describen los mensajes y alertas que se muestran en este caso.

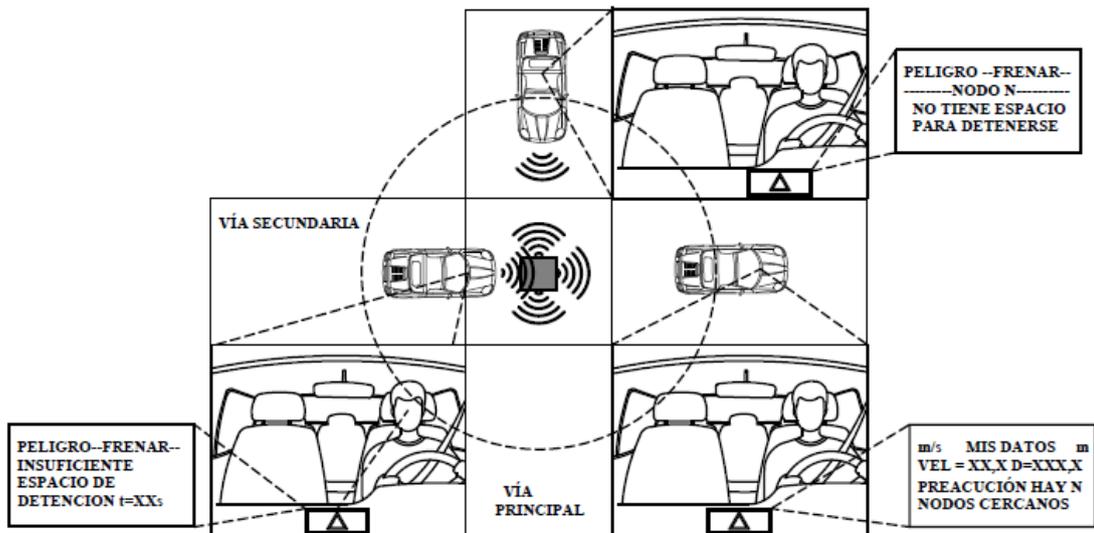


Figura 2-2: Descripción del escenario de aplicación caso 2

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Caso 3. Los nodos móviles se encuentran dentro del alcance de la señal inalámbrica, alguno de ellos circula en secundaria y excede el límite de velocidad, pero tiene suficiente espacio de detención. En este caso se dispara una alerta visual en el nodo con exceso de velocidad y se muestra un mensaje en función al exceso de velocidad, los demás nodos determinan la misma alerta, junto con la dirección de red del nodo que lleva el exceso de velocidad. En la figura 3-2, se describen los mensajes y alertas que se muestran en este caso.

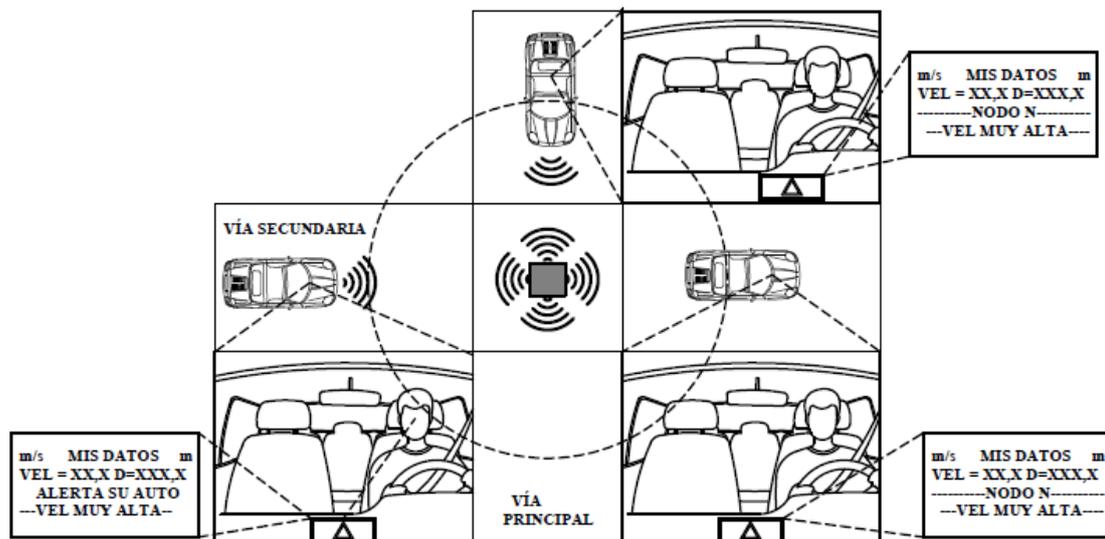


Figura 3-2: Descripción del escenario de aplicación caso 3

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Caso 4. Los nodos móviles se encuentran dentro del alcance de la señal inalámbrica, todos exceden el límite de velocidad y ninguno tiene espacio de detención.

Este es el peor de los casos, aquí la información que tiene prioridad es la del nodo que circule en secundaria con mayor velocidad, la alerta es audiovisual y está condicionada por la distancia de detención. En la figura 4-2, se describen los mensajes y alertas que se muestran en este caso.

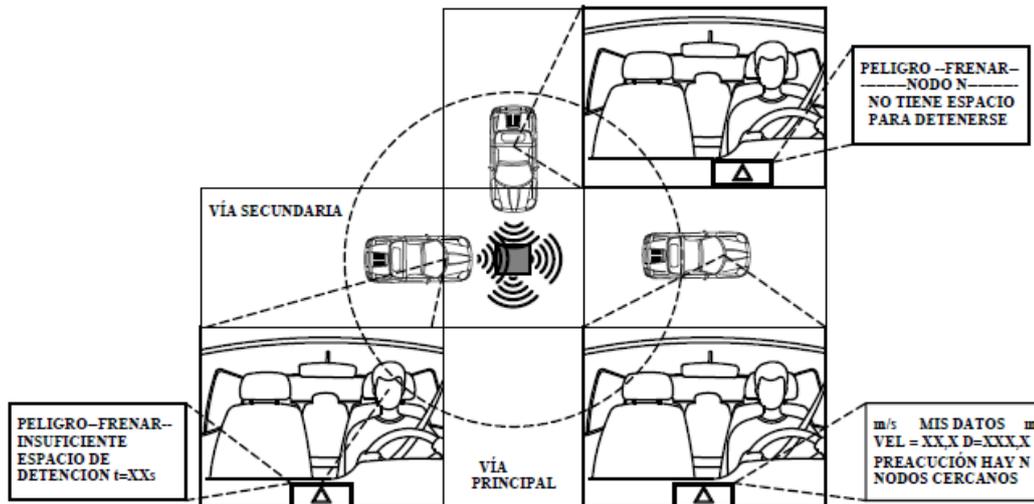


Figura 4-2: Descripción del escenario de aplicación caso 4

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Caso 5. Los nodos móviles se encuentran fuera del alcance de la señal inalámbrica del nodo fijo o dicho nodo está descompuesto o sin energía. En este caso no se pueden definir las alertas al no tener datos de los nodos móviles próximos en la intersección, solo se evalúa la velocidad del nodo que se conduce, se alerta sobre los excesos en los límites de velocidad y se informa que no puede establecerse conexión con el nodo fijo. En la figura 5-2, se describen los mensajes y alertas que se muestran en este caso.

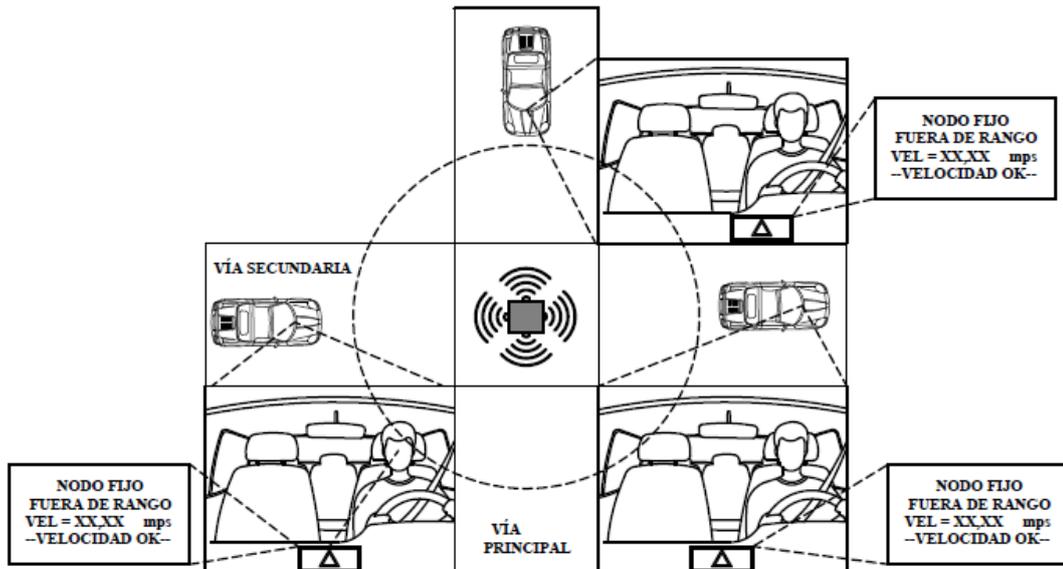


Figura 5-2: Descripción del escenario de aplicación caso 5

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

2.2. Definición de requerimientos

En base a la investigación realizada en el capítulo I y a los conceptos que allí se exponen, junto con la definición del escenario de aplicación y los casos considerados en la sección anterior, se definen los requerimientos de *hardware* y *software* para el desarrollo del nodo móvil y el nodo fijo.

El sistema de alerta temprana está compuesto por dos nodos cuyos requerimientos son los siguientes:

El nodo móvil debe:

- Ser un sistema no invasivo de fácil instalación, el cual, no genera acción alguna sobre los sistemas de tracción, frenado u otro sistema del vehículo.
- Recibir alimentación a través del sistema eléctrico del vehículo, también mediante baterías, e iniciar su funcionamiento en el momento que el usuario requiera.
- Estar ubicado en el interior del vehículo dentro del campo de visión del conductor, sin obstaculizarlo, en un lugar que permita la recepción de señal GPS de al menos 4 satélites.
- El sistema está diseñado para funcionar en vehículos que hayan aprobado la revisión técnica vehicular de la ANT y que circulen por pavimento seco.
- Tener capacidad de respuesta a una velocidad máxima del vehículo de 100 km, lo que corresponde al doble de velocidad permitida en zonas urbanas.

- Adquirir los datos de posición en coordenadas geográficas, latitud y longitud en grados, y velocidad del vehículo en m/seg, mediante un módulo GPS costeable, que tenga un error de posicionamiento horizontal máximo de 2,5m y una precisión de velocidad de 0,1 m/s.
- Transmitir y recibir datos (posición, velocidad, dirección de red) de manera inalámbrica a una distancia máxima de 100m, con una tasa de 250kbps como mínimo, usando un módulo transceptor de radiofrecuencia.
- Procesar los datos suministrados por el nodo fijo para obtener velocidad y distancia de detención, de su vehículo y de los otros presentes dentro del alcance de la señal del nodo fijo, datos que sirven para determinar la alerta temprana usando la tarjeta de desarrollo Arduino.
- Tener un tiempo de procesamiento del algoritmo de un segundo como máximo (adquisición de coordenadas y velocidad, envío/recepción, procesamiento de variables y generación de alerta temprana).
- Mostrar información relevante y oportuna en una pantalla con capacidad para representar caracteres alfanuméricos.
- Si la distancia de detención de los vehículos dentro del alcance del nodo fijo es suficiente el nodo visualiza: la velocidad (0 a 28 m/s), y distancia al nodo fijo (0 a 100m); suyos y del vehículo con mayor velocidad en secundaria, siguiendo el siguiente formato: “V=XX.Xm/s” y “D: XXX.Xm”.
- El sistema informa al conductor del exceso de velocidad de su vehículo y del vehículo que circule en secundaria y esté dentro del alcance de la señal inalámbrica del nodo fijo con la mayor velocidad.
- Muestra el texto de aviso: “VELOCIDAD MUY ALTA” si $V > 16,6667\text{m/s}$, “VELOCIDAD ALTA” si $16,6667\text{m/s} \geq V \geq 13,8889\text{m/s}$, “VELOCIDAD OK” si $V < 13,8889\text{m/s}$.
- Si la distancia de detención calculada es mayor que la distancia al nodo fijo, se muestra el texto “PELIGRO, INSUFICIENTE ESPACIO DE DETENCION”, y emite una alerta auditiva. Lo mismo sucede si existen otros vehículos en los alrededores de la intersección, cambiando el texto de aviso por “NODO N, NO TIENE ESPACIO DE DETENCION”. Donde N es la dirección de red del nodo móvil que produjo la alerta.

En el sistema de alerta temprana el nodo fijo debe cumplir con lo siguiente:

- Estar ubicado al aire libre.
- Recibir alimentación eléctrica mediante baterías con una capacidad para suministrar potencia al menos por 24 horas.
- Tener un sistema para carga de baterías en base a energía solar.
- Almacenar las coordenadas del centro geométrico de la intersección.
- Transmitir y recibir datos de forma inalámbrica a una distancia máxima de 100 metros.

- Estar en la capacidad de procesar datos de un máximo de 4 nodos móviles.
- Procesar la información de los nodos móviles para determinar el nodo con mayor velocidad que circule en secundaria.
- Transmitir una trama de datos de 32 bytes (header, payload y CRC) como máximo, mediante un mensaje multicast que contenga los datos del nodo móvil que circula en secundaria con mayor valor velocidad y la coordenada de la intersección en intervalos cortos de tiempo.
- Tener un tiempo total de proceso (recepción, procesamiento, direccionamiento y transmisión) de un segundo como máximo.

2.3. Concepción de la arquitectura general del sistema

En la figura 6-2 se observa la concepción de la arquitectura para el sistema de alerta temprana a desarrollar. La misma está constituida por dos nodos, en primer lugar, por el nodo móvil, el cual se encuentra ubicado al interior de los vehículos y está encargado de la adquisición y transmisión de datos, así como también del procesamiento de información y visualización de alertas. El sistema cuenta además con un nodo fijo, el cual cumple el papel de posición de referencia en la intersección y está encargado del direccionamiento de información desde y hacia los nodos móviles. La interacción del nodo fijo con los nodos móviles define una topología de red en estrella. En la figura 6-2 se representa, además, el flujo inalámbrico de información proporcionada por los vehículos que se aproximan y se alejan de una intersección en cruz de vías locales Clase A. Aquí se supone que el alcance de la señal inalámbrica de los nodos móviles y el nodo fijo es de 100m, por lo que están en la capacidad de intercambiar información. Se debe notar que el nodo móvil, ubicado en la parte superior de la figura, provee de manera inalámbrica los datos de velocidad (V) en m/seg, posición (P) en coordenadas geográficas (latitud y longitud en grados) y su dirección de red (Dir), dichos datos están representados por flechas de color negro y confluyen en el nodo fijo, representado en el centro de la figura por medio de un cuadrado de color gris, el cual, inicialmente se encuentra en modo de bajo consumo y es despertado mediante interrupciones externas al recibir información de los nodos móviles, luego, gracias a un algoritmo de búsqueda y ordenamiento, determina cual es el nodo que circula en secundaria con mayor velocidad y seguidamente, se encarga de enviar los datos de dicho nodo móvil junto con las coordenadas de la intersección a todos los nodos móviles de la red. La trama con la información llega a todos los vehículos que se encuentren dentro del alcance de la señal inalámbrica, en base a la cual, los nodos móviles calculan: distancia de detención, distancia de separación con el nodo fijo, del móvil que se conduce y del móvil en secundaria próximo a la intersección. En última instancia los nodos móviles determinan la alerta temprana de característica audiovisual, que se muestra al conductor para que sea él quien decida la acción con la que prevenga un posible siniestro.

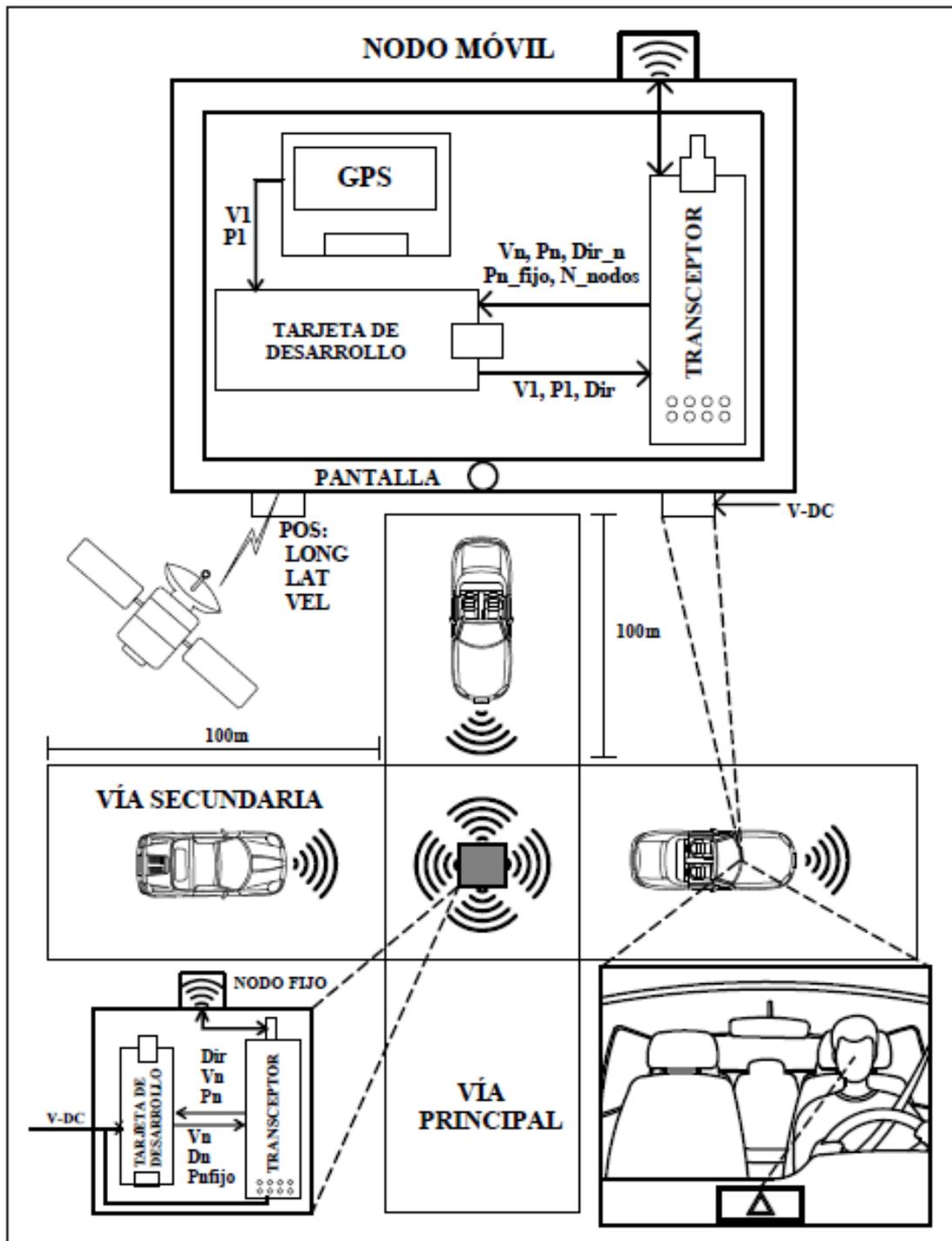


Figura 6-2: Concepción de la arquitectura del sistema de alerta temprana

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

2.4. Bloques del sistema

En esta sección se describe el funcionamiento del nodo móvil y el nodo fijo por medio de diagramas de bloques.

2.4.1. Nodo móvil

En la figura 7-2 se presenta el diagrama de bloques que describe la arquitectura del nodo móvil y en los párrafos siguientes, se detallan los bloques que contiene dicho diagrama.

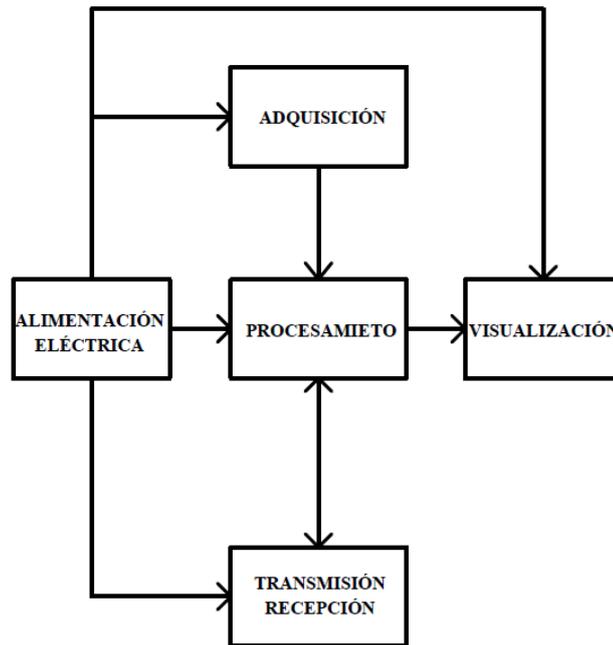


Figura 7-2: Diagrama de bloques del nodo móvil

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

- **Alimentación eléctrica:** Está compuesto por una fuente de voltaje de CC de baterías, la misma que se encarga de suministrar potencia eléctrica a cada uno de los componentes que conforman el sistema de alerta temprana durante el tiempo en el que el sistema está en funcionamiento.
- **Adquisición de datos:** Consiste en un módulo GPS encargado de tomar datos de posición (georreferenciación) y velocidad de los nodos móviles, los datos tomados son enviados mediante comunicación serial hacia la tarjeta de desarrollo para su procesamiento.
- **Procesamiento:** Conformado por una tarjeta de desarrollo, la cual, se encarga de generar una trama con los datos (posición y velocidad) recibidos por comunicación serial del bloque de adquisición de datos. Tiene también la finalidad de colocar una dirección de red a cada nodo

móvil, luego, enviar los datos mediante comunicación serial al transceptor. La tarjeta de desarrollo está programada con un algoritmo cuyo fin es determinar la alerta preventiva en función de la velocidad de los nodos y su distancia de detención comparada con la distancia de separación a la intersección.

- **Transmisión y recepción:** Compuesto por un módulo transceptor el cual recibe información de la tarjeta de desarrollo mediante comunicación serial. Se encarga de enviar esta información mediante radio frecuencia hacia el nodo fijo. El intercambio de información entre los dos nodos fijo y móvil es bidireccional, se realiza dentro del rango de cobertura del módulo de transceptor.
- **Visualización:** Está compuesto por una pantalla y un buzzer, se encarga de visualizar los datos y mostrar la alerta audio visual con la que prevenir al conductor de una posible colisión. Esta alerta es activada de acuerdo con el algoritmo programado en la tarjeta de desarrollo. La comunicación de este módulo con el bloque de procesamiento es mediante comunicación serial.

2.4.2. *Nodo fijo*

En la figura 8-2 se observa el diagrama de bloques que conforma el nodo fijo, a continuación, se detalla cada bloque del nodo mencionado.

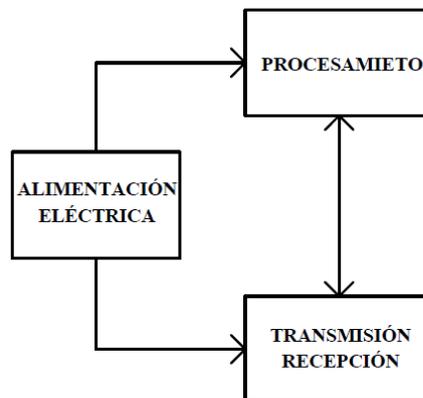


Figura 8-2: Diagrama de bloques del nodo fijo

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

- **Alimentación Eléctrica:** Está constituida por una fuente de voltaje de CC, la misma que se encarga de suministrar potencia eléctrica al bloque de procesamiento y al bloque de transmisión y recepción, la fuente de voltaje está en la capacidad de energizar el tiempo necesario a los componentes que conforman el nodo fijo.

- **Transmisión y recepción:** Consta de un módulo transceptor el cual se encarga de recibir la posición, velocidad y dirección de red del nodo móvil de manera inalámbrica mediante radio frecuencia, esta información es enviada a la tarjeta de desarrollo del nodo fijo mediante comunicación serial para su procesamiento. Este bloque funciona de manera bidireccional ya que está en la capacidad de recibir y enviar información de los nodos móviles que se encuentren en la misma área de cobertura.
- **Procesamiento:** Conformada por una tarjeta de desarrollo, que se encarga de recibir la información del módulo transceptor mediante comunicación serial, una vez recibida la posición, velocidad y dirección de los nodos móviles, la tarjeta de desarrollo mediante un algoritmo se encarga de determinar que nodo de la vía secundaria tiene la mayor velocidad y finalmente genera un mensaje multicast hacia todos los nodos móviles que se encuentren dentro del área de cobertura de la señal inalámbrica.

2.5. Selección y construcción del hardware para el sistema de alerta temprana

Después de analizar los requerimientos y cada caso del escenario de aplicación junto con las alertas a generar, definidos en las secciones anteriores, se seleccionan los componentes adecuados para el desarrollo de hardware del sistema.

2.5.1. Módulo GPS NEO 7M

Las características por las que se selecciona el Módulo GPS NEO 7M son: su tiempo de posicionamiento de 30 segundos en arranque frío y de 28 segundos en arranque caliente, lo que permite tener un posicionamiento tiempos cortos, también, por su precisión en la velocidad (0,1 m/seg), su precisión de posicionamiento horizontal (2,5m), compatibilidad con librerías de Arduino, ya que este módulo proporciona los datos en sentencias NMEA, su tasa de actualización de datos (10Hz), voltaje de operación (5,0V) y baja corriente de consumo (35 mA), características técnicas que se pueden observar en la tabla 6-1 (Ublox, 2014).

2.5.2. Módulo NRF24L01

La selección de este módulo se da por su bajo precio, alcance de transmisión en zona abierta, además posee velocidad de datos seleccionables como se describe en la tabla 7-1, también por su acelerador SPI por hardware, su protocolo de comunicación inalámbrica por radiofrecuencia además permite tener una comunicación bidireccional. Puede llegar a tener picos de consumo de

corriente de hasta 100mA, por lo que se debe alimentar con una fuente independiente de 3,3V(Nordic Semiconductor ASA, 2004).

2.5.3. *Arduino Nano*

Se eligió la placa de Arduino Nano ya que es capaz de reconocer los protocolos de comunicación serial UART, SPI e I2C, lo que permite el intercambio de información con el módulo GPS NEO 7M y con el módulo NRF24L01, garantizando la compatibilidad en la comunicación, además, permite usar sus pines (E/S) de acuerdo con el requerimiento. Otras características fundamentales por la que se selecciona esta tarjeta de desarrollo es su bajo costo, tamaño reducido y la enorme comunidad de desarrollo que existe, la cual brinda bibliotecas eficientes con documentación de calidad. Además, es una tarjeta de desarrollo de software y hardware libre. Más especificaciones técnicas de esta placa se presenta en la tabla 8-1 (Arduino, 2021).

2.6. Esquema de conexiones para el sistema de alerta temprana

Una vez seleccionado los componentes electrónicos que conforman el sistema de alerta temprana se procede a realizar las conexiones tanto para el nodo fijo, como para los nodos móviles. Los diagramas de conexiones de los nodos se diseñaron en Eagle versión 7.6.0, en el cual también se realizaron los diseños para las placas PCB de cada nodo.

2.6.1. *Conexiones del nodo móvil*

En la figura 9-2 se observa el diagrama de conexiones del nodo móvil, el cual está compuesto por: una tarjeta de desarrollo Arduino Nano, el módulo GPS NEO7M, un display LCD 128*64, módulo I2C, el transceptor NRF24L01, un módulo TP4056 y un módulo regulador de voltaje de 5V a 3,3V. Todos los componentes son alimentados con 5V, a excepción del módulo NRF24L01, el cual posee un regulador de voltaje de 5,0 V a 3,3 V.

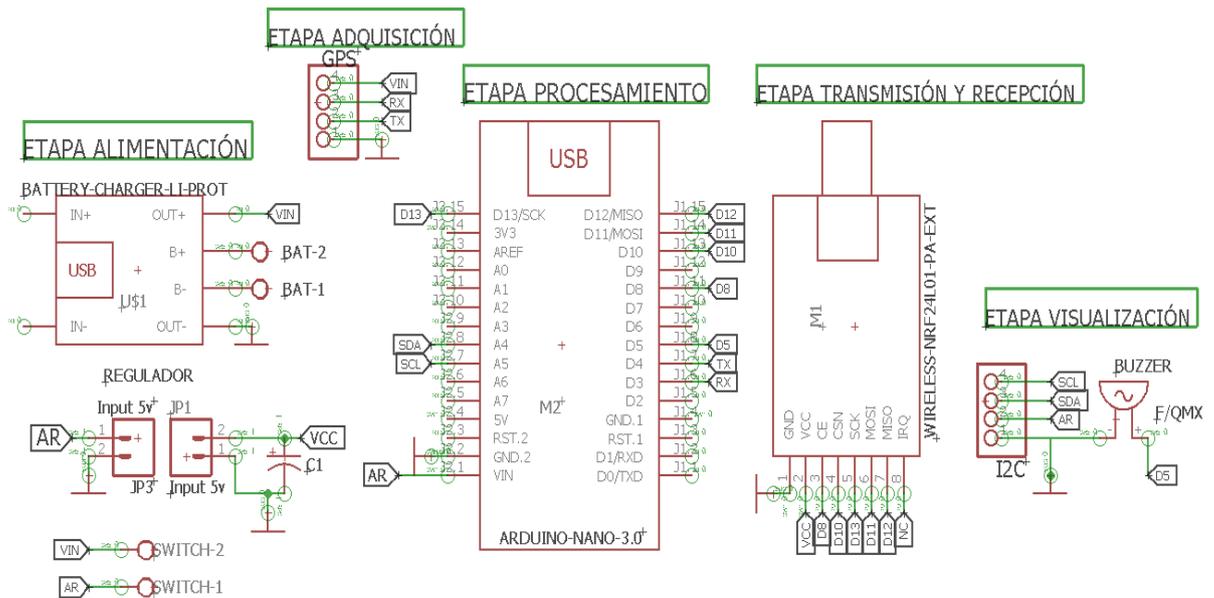


Figura 9-2: Diagrama de conexiones para el nodo móvil

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

- El módulo GPS NEO7M, se comunica mediante comunicación serial UART por software con el Arduino usando los pines 3(RX) y 4(TX).
- El buzzer está conectado al pin digital 5 del Arduino Nano.
- El display LCD (LCM12864R), debe ser conectado a un módulo I2C y las salidas de este último hacia el Arduino Nano en los pines A4 (SDA) y A5 (SCL).
- El módulo NRF24L01, se comunica con el Arduino Nano mediante comunicación serial SPI, este protocolo necesita pines específicos de la tarjeta de desarrollo, los mismos se indican en la tabla 1-2.

Tabla 1-2: Pines de conexión de Arduino Nano con NRF24L01

ARDUINO NANO	NRF24L01
8	CE
10	CSN
13	SCK
11	MOSI
12	MISO

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la figura 10-2 se observa el diseño de una placa adicional para conectar el I2C con la pantalla LCD (LCM12864R), ya que el display posee veinte pines, de los cuales tres no se conectan, mientras que el I2C posee dieciséis pines, así con la implementación de esta placa se puede

conectar el I2C y la pantalla LCD haciendo coincidir el número de pines entre los dos componentes.

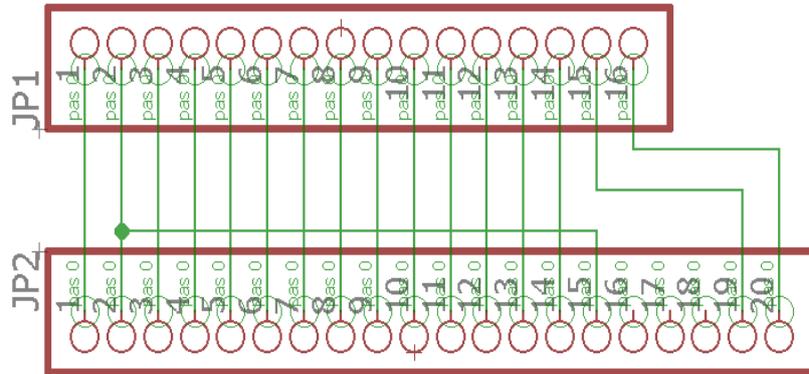


Figura 10-2: Diagrama de conexiones del I2C y pantalla LCD(LCM12864R).

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

2.6.2. Conexiones del nodo fijo

En la figura 11-2 se muestra el diagrama de conexiones para el nodo fijo, el cual está compuesto por un Arduino Nano, un transceptor NRF24L01, un módulo TP4056 y módulo regulador de voltaje 3,3V. Para este nodo se realizan las mismas conexiones descritas en la sección anterior y mostradas en la tabla 1-2, además este nodo hace uso del pin IRQ del NRF24L01 conectado al pin digital 2 de Arduino.

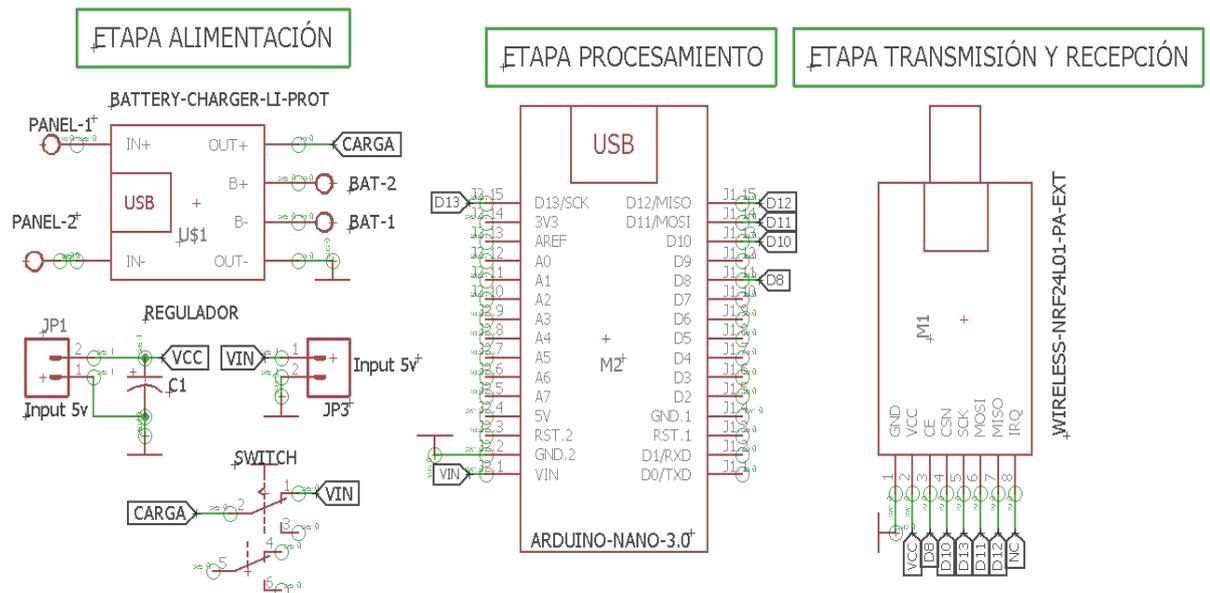


Figura 11-2: Diagrama de conexiones para el nodo fijo

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

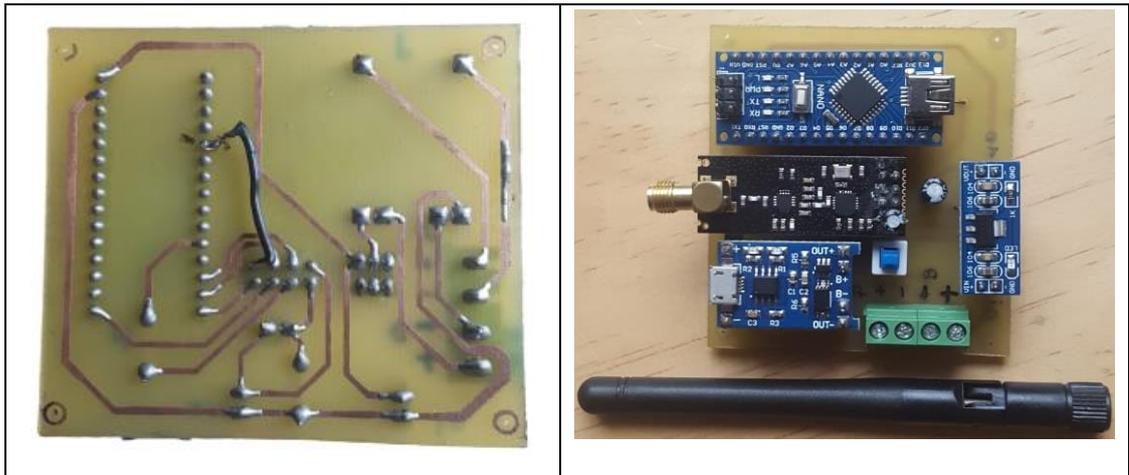


Figura 13-2: Placa PCB terminada para el nodo fijo

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

2.7.2. PCB para los nodos móviles

En la figura 14-2 se observa el diseño de la placa PCB para los nodos móviles. Se indican las dimensiones con la que cuenta la placa para facilitar el diseño de la carcasa. Los elementos con los que cuenta la placa PCB del nodo móvil son: Arduino Nano, módulo NRF24L01, módulo GPS NEO 7M, Modulo I2C, Pantalla LCD (LCM12864R), regulador de voltaje AMS1117 3,3 V, módulo TP4056, botón pulsador switch, borneras 2 vías, condensador DE 10 μ F, buzzer.



Figura 14-2: Diseño de placa PCB para el nodo móvil

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la figura 15-2 se observa la placa PCB terminada para los nodos móviles, el diseño de la placa es impreso en papel fotográfico para posteriormente ser llevado a la baquelita y mediante una plancha ser grabado, después mediante cloruro férrico se procede a corroer la baquelita quedando solo las pistas del diseño para la perforación y soldadura de los componentes, la placa cuenta con espadines hembras esto ayuda a que los elementos electrónicos sean de fácil montaje.

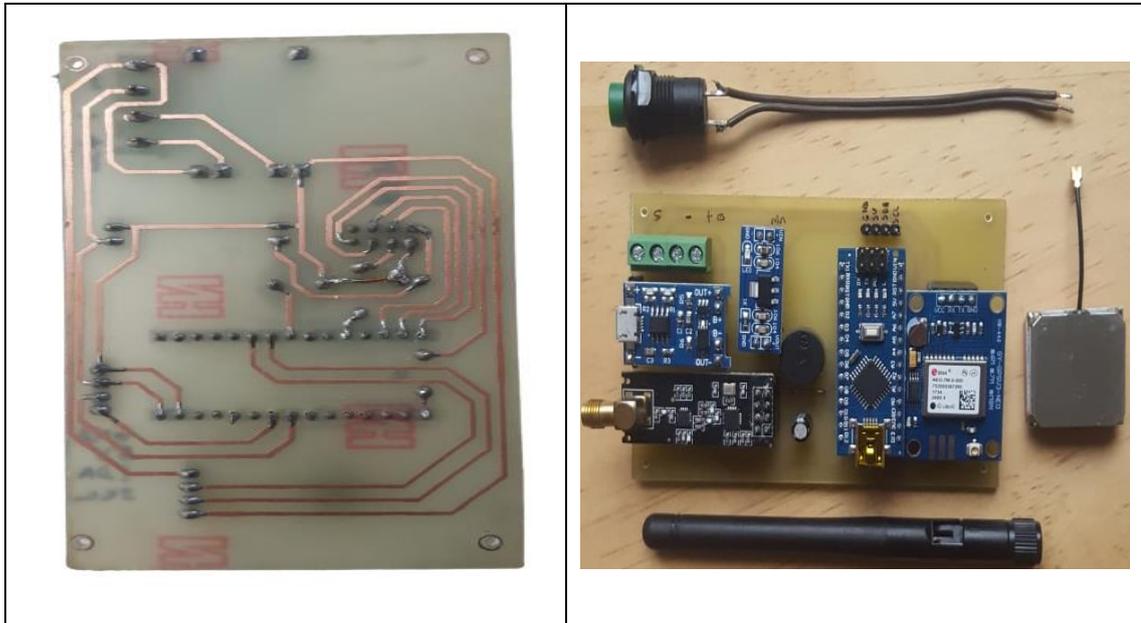


Figura 15-2: Placa PCB terminada para el nodo móvil

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la figura 16-2 se observa el diseño de la placa PCB extra para el acople de la pantalla LCD (LCM12864R) con el módulo I2C para los nodos móviles.

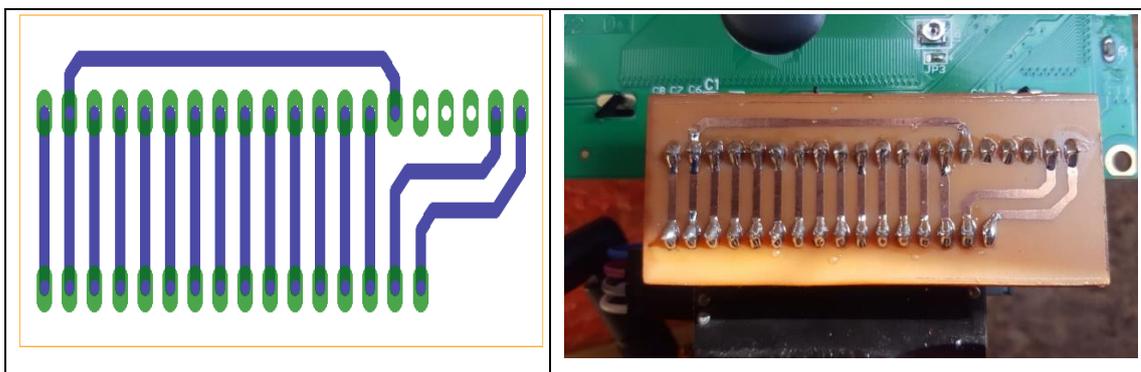


Figura 16-2: Placa PCB para acople entre pantalla LCD y módulo I2C

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

2.8. Diseño de la carcasa

En la figura 17-2, se muestra el modelo 3D de la carcasa para el nodo móvil, la misma, está fabricada en PETG al ser un material que soporta altas temperaturas y posee alta rigidez. El modelo está compuesto por dos partes; un gabinete y una tapa con cuatro salientes para la unión de las piezas, con esto se elimina la necesidad de utilizar tornillos. Posee tres agujeros los mismos que sirven para: el interruptor de encendido y apagado del equipo, un puerto USB para recargar las baterías y otro para la antena del módulo NRF24L01. La carcasa es sujeta en el salpicadero del vehículo mediante 4 ventosas ubicadas en la parte inferior de la misma.



Figura 17-2: Modelo 3D de la carcasa para el nodo móvil.

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la figura 18-2 se presentan la vista frontal y trasera de la carcasa para el nodo móvil, en ella se observan los salientes y orificios que permiten ensamblar y sujetar la placa PCB, la pantalla LCD y las baterías.



Figura 18-2: Vista frontal y trasera del modelo 3D de la carcasa para el nodo móvil

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la figura 19-2 se puede observar el ensamble de la carcasa del nodo móvil, se incluyen en el diseño la placa PCB, la batería y el LCD, para tener una mejor estimación en las medidas del espacio que ocupan los componentes, con esto se optimiza el uso del material, el espacio y las horas de fabricación.

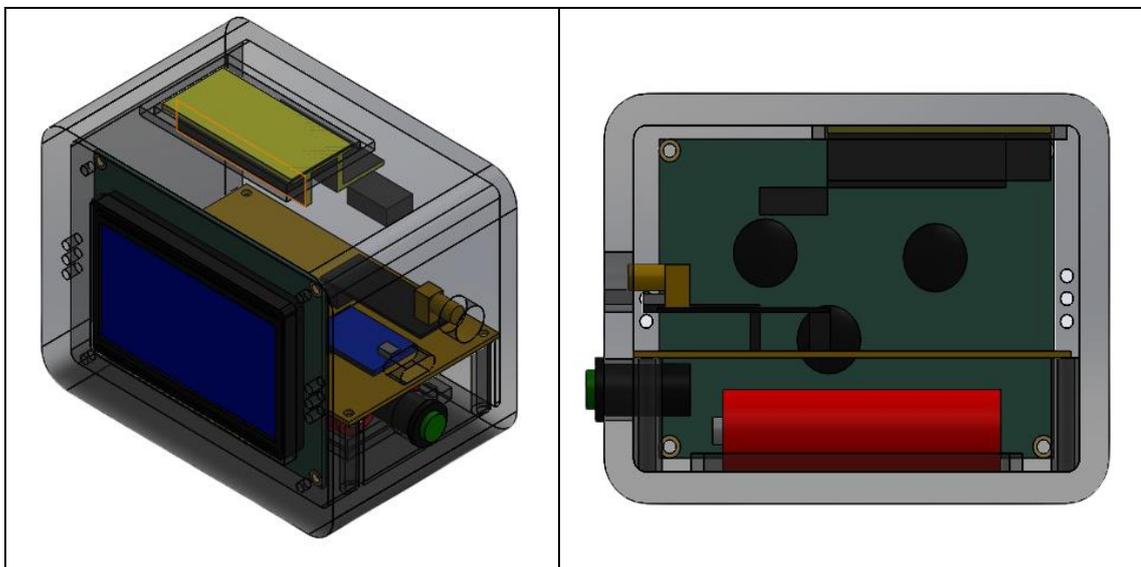


Figura 19-2: Diseño de carcasa para el nodo móvil con placa PCB incluida

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la figura 20-2 se puede observar el diseño de la carcasa del nodo fijo la misma que tiene un orificio por donde sale la antena del módulo NRF24L01, además, posee en su interior cuatro salientes que sirven para sujetar la placa PCB. En la tapa de la carcasa se encuentra un agujero el

mismo que se utiliza para pasar los cables que van conectados al panel solar, este último elemento va sujeto en la parte superior de la carcasa, usando silicona. El material que se usa para la carcasa es PETG por su resistencia y durabilidad, esto debido a que la carcasa debe estar ubicada al aire libre. El ensamble del gabinete y la carcasa es mediante cuatro salientes en la tapa y cuatro orificios en el gabinete.



Figura 20-2: Diseño del modelo 3D de la carcasa para el nodo fijo

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la figura 21-2 se pueden observar las medidas de las carcasas para el nodo móvil y para el nodo fijo. La figura 21-2 a) corresponde al diseño de la carcasa para el nodo móvil y la figura 21-2 b) al nodo fijo, las dimensiones están en milímetros, notándose que las dos carcasas son de tamaño reducido lo que permite ubicar la carcasa del nodo móvil dentro del vehículo y para el nodo fijo ser ubicada en un punto estratégico de la intersección, ambas tienen un espesor de pared de 7mm.

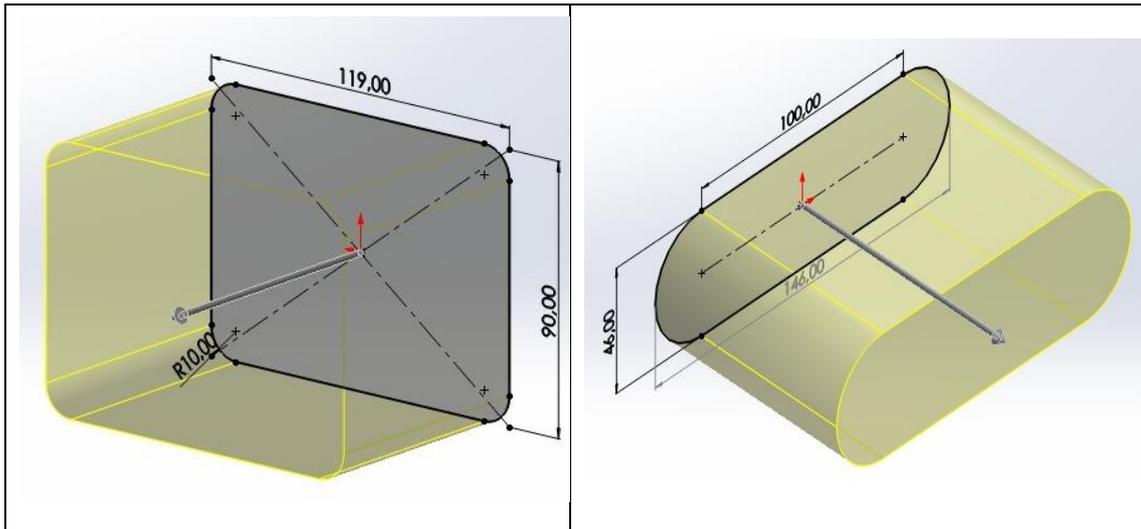


Figura 21-2: a) Dimensiones de la carcasa para el nodo móvil b) Dimensiones nodo fijo

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la figura 22-2 se puede observar la carcasa fabricada para el nodo fijo. Además, se observa la inclusión de la placa PCB y las baterías. En la parte superior se observa el panel solar incrustado usando silicona para impermeabilizar esta parte de la carcasa.



Figura 22-2: Carcasa fabricada para el nodo fijo

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la figura 23-2 se puede observar la carcasa para el nodo móvil impresa en material de filamento PETG. Además, se observa la inclusión de la placa PCB con su respectivo circuito, pantalla LCD y baterías, cabe mencionar que el sistema tiene tres nodos móviles con idénticas dimensiones y diseño de la carcasa.

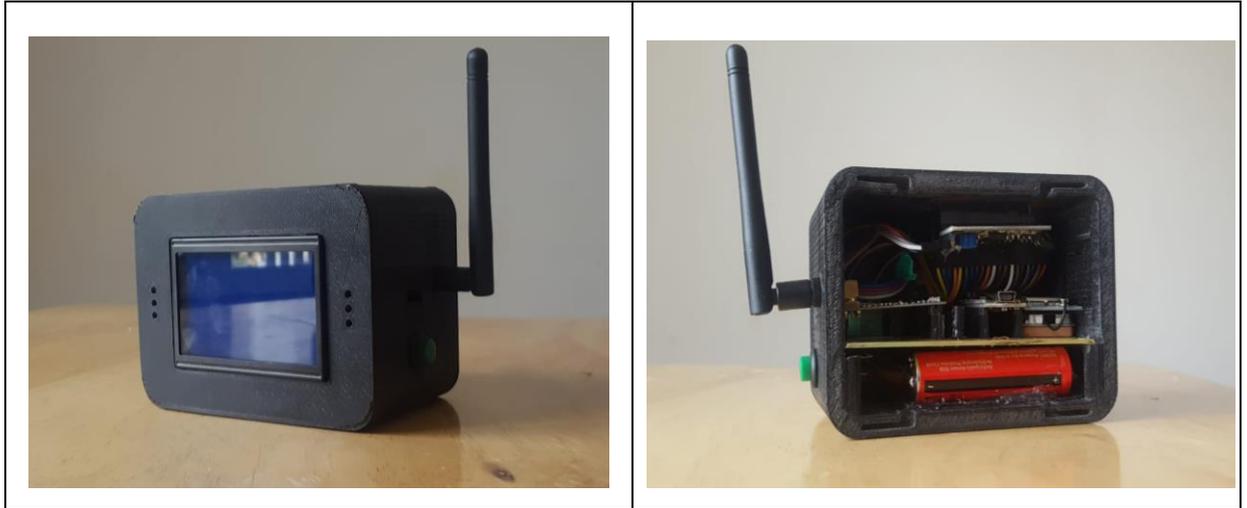


Figura 23-2: Carcasa fabricada para los nodos móviles

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

2.9. Selección del software para el desarrollo del sistema

El software para el sistema de alerta temprana es desarrollado en el IDE de Arduino en conjunto con bibliotecas de uso libre.

2.9.1. *Arduino IDE*

La versión utilizada es 1.8.19. El IDE está compuesto por un editor de código, un compilador, un depurador y una interfaz gráfica, es de uso libre y código abierto. El lenguaje de programación usado es una adaptación de C++, proveniente de AVR-LIBC (Arduino, 2022).

Para el diseño de los algoritmos del nodo fijo, el nodo móvil y la implementación de la red se hace uso de las siguientes bibliotecas:

2.9.2. *Bibliotecas para implementar la WSN*

Las características de las bibliotecas para implementar la red inalámbrica, la topología de red y el protocolo de comunicación inalámbrica se resume a continuación.

RF24.h

Esta biblioteca está diseñada para que el módulo NRF24L01 funcione de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Brinda un conjunto de clases y métodos fáciles de usar para

usuarios principiantes. Es usada para la implementación de la comunicación por radiofrecuencia, la documentación de clases y métodos se encuentra en (doxygen, 2021a).

RF24Network.h

Esta biblioteca implementa una Capa de Red OSI para los módulos de radio NRF24L01, funciona en conjunto con la biblioteca RF24, su propósito es brindar una alternativa a los radios basados en ZigBee. La documentación completa sobre el uso de constructores, clases, métodos, enrutamiento de paquetes, código fuente y otras temáticas de esta biblioteca se encuentran en (doxygen, 2021b).

La capa de red que implementa esta biblioteca permite hasta 781 nodos en un solo canal de radiofrecuencia y posee las siguientes características:

- ACKs de protocolo red, eficientes en las transmisiones de datos.
- Direccionamiento estandarizado y actualizado para una transmisión de radio optima, las direcciones son de 15 bits en formato octal, ellas indican la posición de los nodos en la topología de la red.
- Permite ampliar los periodos de tiempo de espera de forma totalmente automatizada mediante auto reintento/auto reutilización de los payloads.
- La optimización de la biblioteca proporciona mejoras en la fiabilidad, la velocidad y la eficiencia.
- Cada nodo tiene una dirección lógica de red local.
- Reenvío de mensajes.
- Unión ad hoc, un nodo puede unirse a una red sin necesidad de modificar los nodos existentes.
- La capa no permite direccionamiento dinámico.

La red se organiza en una topología tipo árbol con cuatro niveles como se muestra en la figura 24-2. El sistema desarrollado hace uso del nivel 0 para el nodo fijo y del Nivel 1 para los nodos móviles, con un máximo de 5 nodos para este nivel. Al hacer uso únicamente de estos dos niveles, la topología árbol se transforma en estrella.

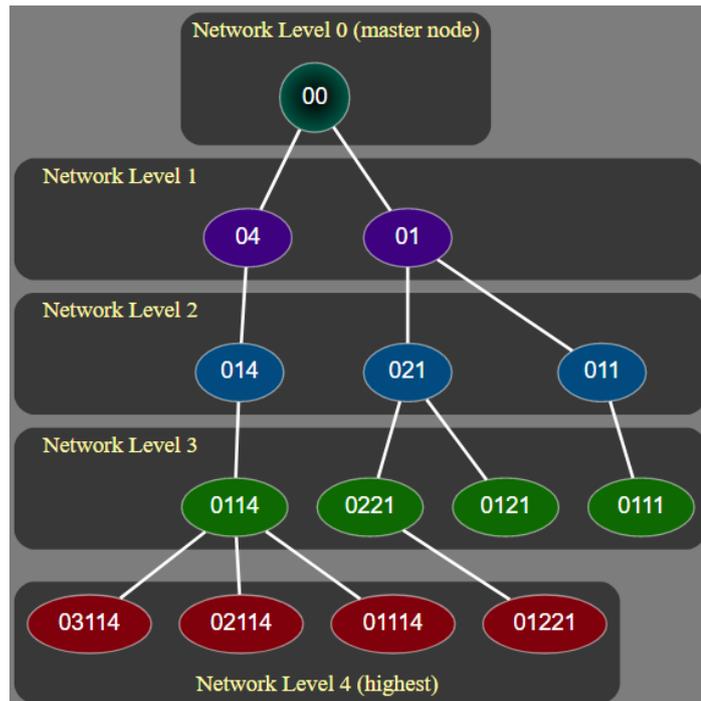


Figura 24-2: Topología de la capa de red implementada
Fuente: doxygen, 2021b

2.9.3. Bibliotecas para el uso del módulo GPS

Las librerías usadas para la adquisición de datos del GPS evitan el trabajo de definir funciones que identifiquen los campos de las sentencias NMEA y otras que transformen dichos datos en números.

TinyGPSPlus.h

Es usada para analizar los datos proporcionados por el módulo GPS en forma de sentencias NMEA. Brinda al usuario métodos compactos y fáciles de usar para obtener la posición, altitud, velocidad, rumbo y otros datos contenidos en los campos de dos sentencias NMEA: \$GPGGA y \$GPRMC, y otras más. En Hart (2022) se detalla el uso de las clases y métodos que implementa esta biblioteca.

SoftwareSerial.h

Esta biblioteca fue desarrollada para permitir la comunicación serie UART en pines digitales de las tarjetas Arduino distintos a los designados para este fin. Utiliza software para replicar la funcionalidad de la comunicación UART y tener múltiples puertos serie con velocidades de hasta 115200 baudios (Arduino, 2022). Esta biblioteca es usada en conjunto con *TinyGPS++.h*

2.9.4. Biblioteca LiquidCrystal_I2C.h

La librería permite controlar las pantallas I2C, la documentación que detalla su uso se encuentra en los sketches de ejemplo que se incluyen con la descarga de la librería.

2.9.5. LowPower.h para ahorro de energía

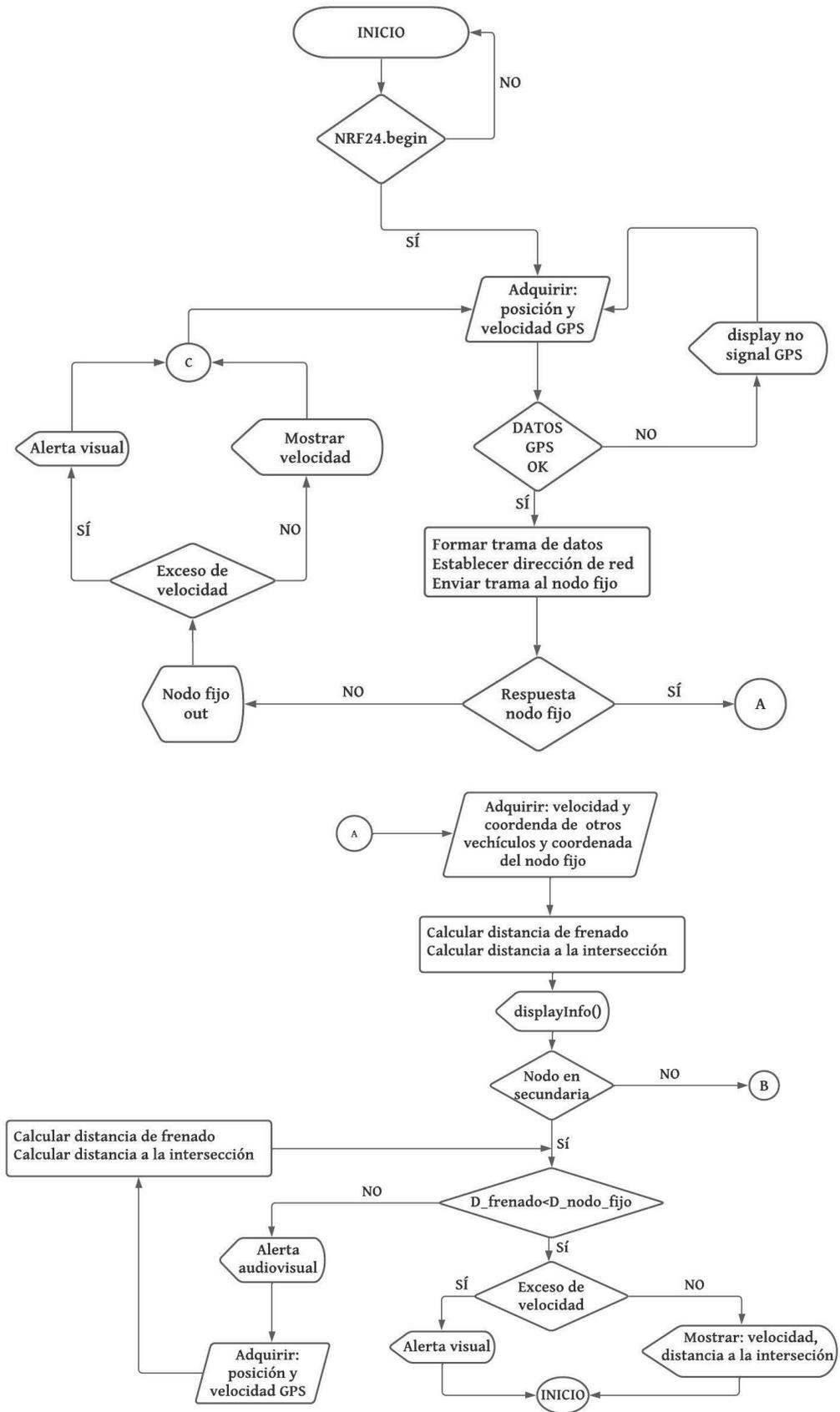
El uso de esta librería es para implementar el modo de bajo consumo de Arduino Nano. El método usado para implementar el modo Sleep es: “*LowPower.powerDown(SLEEP_8S, ADC_OFF, BOD_OFF)*”, el cual es el de menor consumo (0.36mA). Para despertar al Arduino se utiliza una interrupción externa. La documentación de la librería se encuentra en (Rocket Scream, 2022).

2.10. Desarrollo del software para el sistema

En esta sección se presentan los diagramas de flujo que describen el comportamiento de los programas para el nodo fijo y el nodo móvil, los códigos implementados se pueden encontrar en los anexos A y B, correspondientemente.

2.10.1. Algoritmo para el nodo móvil

La figura 25-2 presenta el diagrama de flujo para el algoritmo del nodo móvil y está dividida en tres por cuestión de visualización. Dicho algoritmo está desarrollado para ser implementado en los vehículos que circulan tanto en la vía principal como en la vía secundaria y está encargado de: adquirir datos, generar la trama, transmitir la información del nodo móvil, distinguir si el nodo circula en secundaria y generar las alertas. El proceso inicia con la lectura del módulo GPS, esto con el fin de determinar la posición y velocidad del nodo. Una vez que se conocen estos datos, mediante comunicación serial se envían hacia la tarjeta de desarrollo para generar una trama con ellos junto con su dirección de red, si no se realiza la lectura del módulo GPS se muestra un mensaje de aviso en la pantalla para informar este hecho. Luego se adquieren los datos de velocidad y coordenadas de los otros nodos móviles y las coordenadas del nodo fijo, mediante comunicación inalámbrica con dicho nodo, después la tarjeta de desarrollo calcula la distancia de detención, la distancia del nodo móvil al fijo y con estos datos determina la alerta.



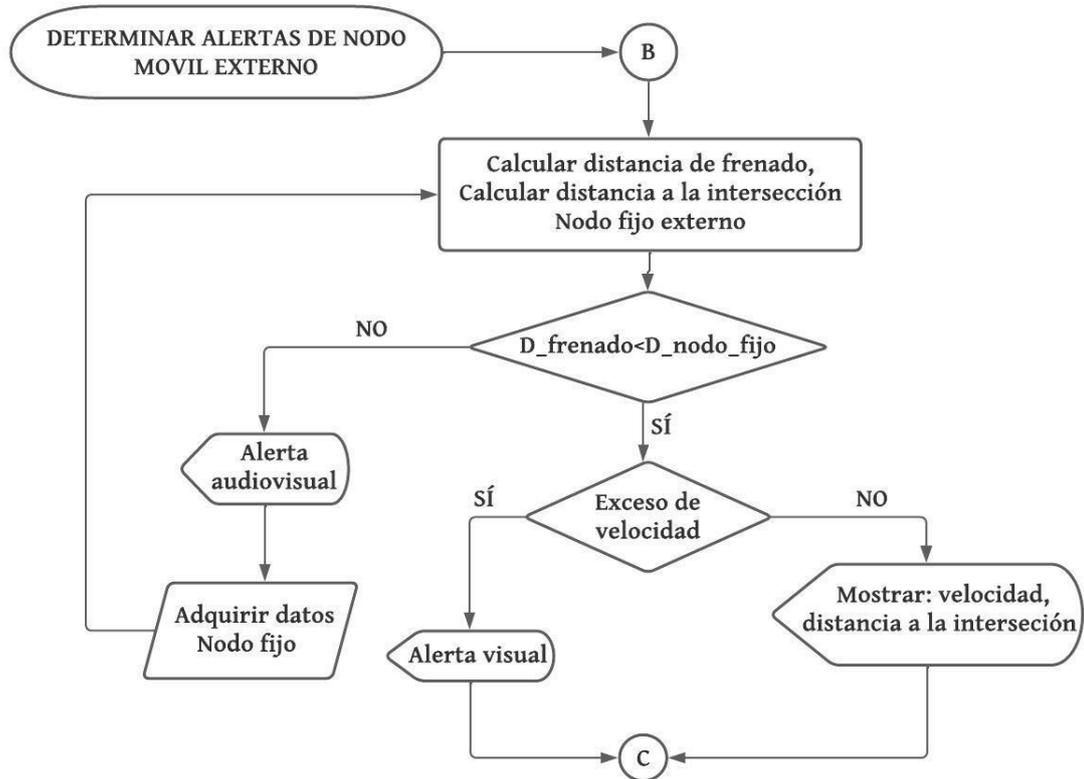


Figura 25-2: Algoritmo para los nodos móviles

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

2.10.2. Algoritmo del nodo fijo

En la figura 26-2 se observa el diagrama de flujo para el algoritmo del nodo fijo. El primer paso es preguntar por la inicialización correcta del transceptor, luego se pregunta si existen mensajes de los nodos móviles, en caso afirmativo, el nodo fijo los adquiere, si no, el nodo fijo entra en modo de bajo consumo y es despertado mediante interrupciones externas producidas cuando se reciban nuevos datos. Una vez adquirido los datos se guardan en un array de estructuras, luego se procede a crear dos vectores, uno que contiene los valores de velocidad de los nodos móviles y una copia de este usada para almacenar los índices. Una vez hecho esto, se llama a la función Quicksort que sirve para ordenar las velocidades de menor a mayor, se identifica después a que nodo pertenece esa velocidad y se procede a empaquetar los datos del nodo con mayor velocidad junto con las coordenadas del nodo fijo, para ser enviados mediante el transceptor hacia todos los nodos móviles de la red. Este proceso es repetitivo debido a que existe presencia de los nodos móviles constantemente.

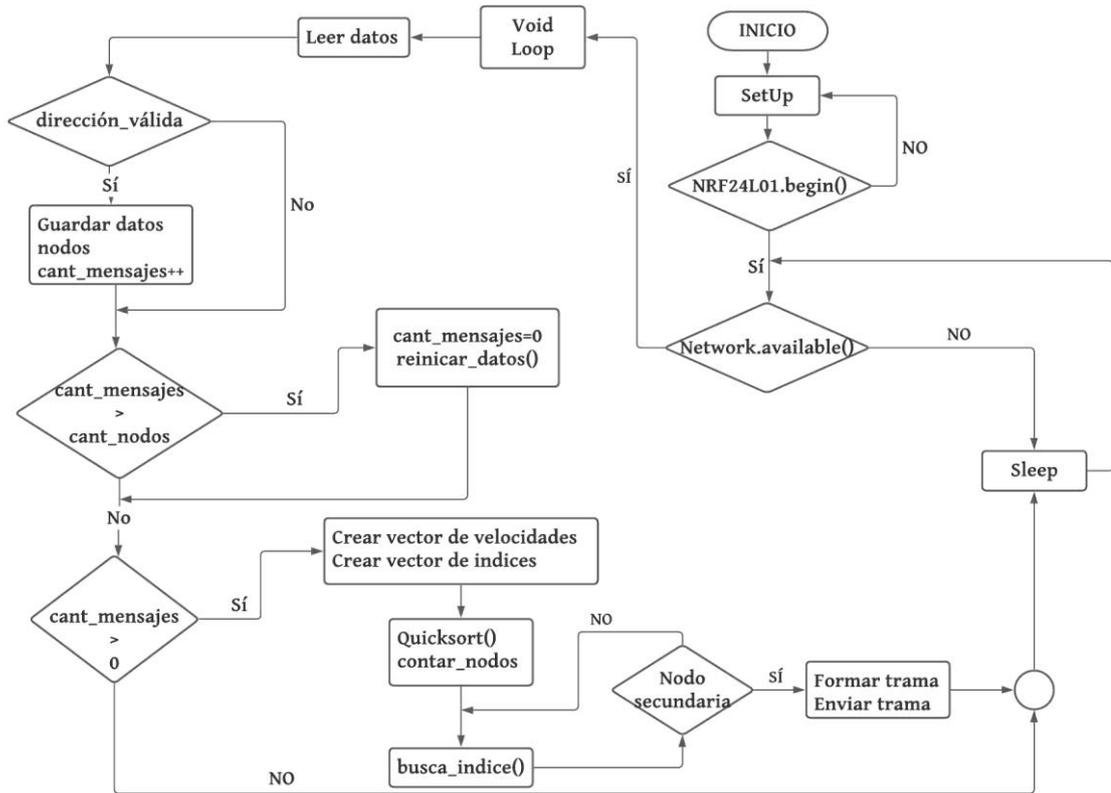


Figura 26-2: Algoritmo para el nodo fijo

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

2.11. Generación de mensajes en la interfaz audiovisual

En esta sección se presentan y se describen los mensajes a mostrar en la pantalla LCD, los mismos que son generados por el algoritmo de los nodos móviles.

2.11.1. Pantallas principales

En la figura 27-2, se presenta el mensaje que se despliega en el LCD cuando no existe señal del GPS o cuando el nodo móvil se inicia por primera vez.



Figura 27-2: Mensaje que se muestra en el nodo móvil cuando no existe señal GPS

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la figura 28-2, se muestra el mensaje que se despliega en el LCD cuando el nodo móvil está dentro del rango del nodo fijo, circula en principal y los nodos que circulan en secundaria cumplen las siguientes condiciones: no exceden el límite de velocidad y su distancia de frenado suficiente. La interfaz muestra la velocidad del nodo en principal y su distancia de separación a la intersección. Aquí se muestran y evalúan los datos de los nodos móviles que circulan en secundaria para determinar las alertas por insuficiente espacio de detención y por exceso de velocidad. Se evalúa también que el nodo en principal no exceda el límite de velocidad.

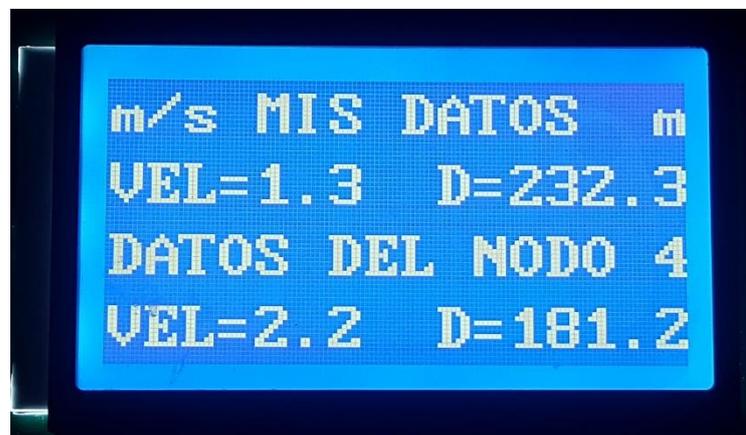


Figura 28-2: Mensaje que se muestra en el nodo que circula en principal cuando no existe riesgo de siniestro

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la figura 29-2 se muestra el mensaje que se despliega en el LCD del nodo móvil en secundaria cuando no existe riesgo de colisión. Aquí se evalúa de manera constante la distancia de detención en función a la velocidad del nodo. Además, se comparte hacia el nodo fijo los datos de velocidad y posición de dicho nodo.

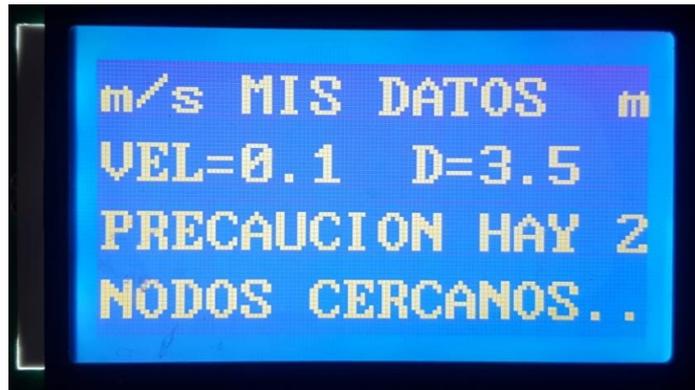


Figura 29-2: Mensaje que se despliega en el LCD cuando el nodo móvil está en secundaria y no existe riesgo de siniestro

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

2.11.2. Alertas por insuficiente espacio de detención

En la figura 30-2 se presenta el mensaje que se genera en el LCD, cuando uno de los nodos móviles que circula en secundaria no tiene espacio de detención. La perspectiva de esta alerta es desde el nodo móvil que circula en principal. Está alerta es la de mayor prioridad y es determinada por el nodo móvil gracias a los datos compartidos por el nodo fijo, la alerta es mostrada al conductor y sugiere frenar para que prevenga o evite un impacto, en este caso el buzzer del sistema se activa.

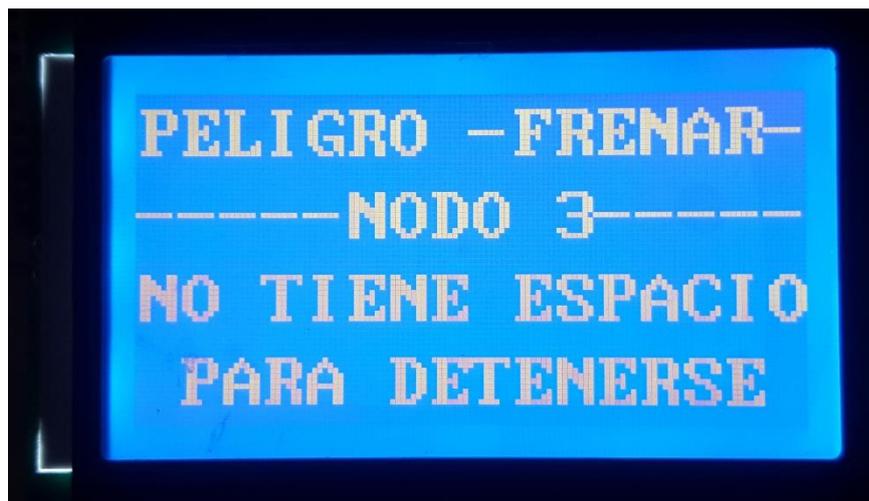


Figura 30-2: Alerta audiovisual para el móvil en principal cuando el móvil en secundaria no tiene espacio de detención

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la figura 31-2 se observa el diseño de la alerta audiovisual cuando el nodo móvil en secundaria no tiene espacio de detención, esta perspectiva es desde el nodo móvil mencionado. En la pantalla se muestra un mensaje sugiriendo frenar, además muestra el tiempo estimado para llegar a la intersección, en este caso la alerta es de alta prioridad, por lo que se activa el buzzer.

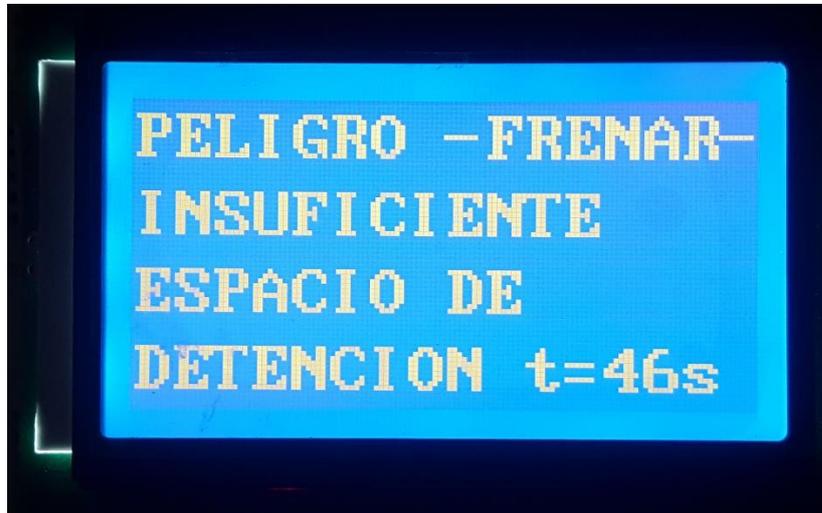


Figura 31-2: Alerta del nodo móvil en secundaria que no tiene espacio de detención

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

2.11.3. Alertas por exceso de velocidad

En la figura 32-2, se muestra el mensaje que se despliega en el LCD cuando el nodo móvil circula en principal o en secundaria y está fuera de rango del nodo fijo. La interfaz muestra la velocidad, aquí se evalúa el rango de velocidad y se alerta sobre los excesos. Se muestra también un mensaje donde especifica que el nodo fijo esta fuera de rango.



Figura 32-2: Mensaje que se despliega en el LCD cuando el nodo móvil no está en el rango del nodo fijo y no circula a exceso de velocidad

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la figura 33-2 se observa el diseño de la alerta audiovisual cuando el nodo móvil que se está conduciendo está dentro del rango del nodo fijo, circula en principal o en secundaria y sobrepasa los límites de velocidad. En la pantalla muestra un mensaje donde se indica que la velocidad es muy alta, además se muestra la distancia para llegar a la intersección.

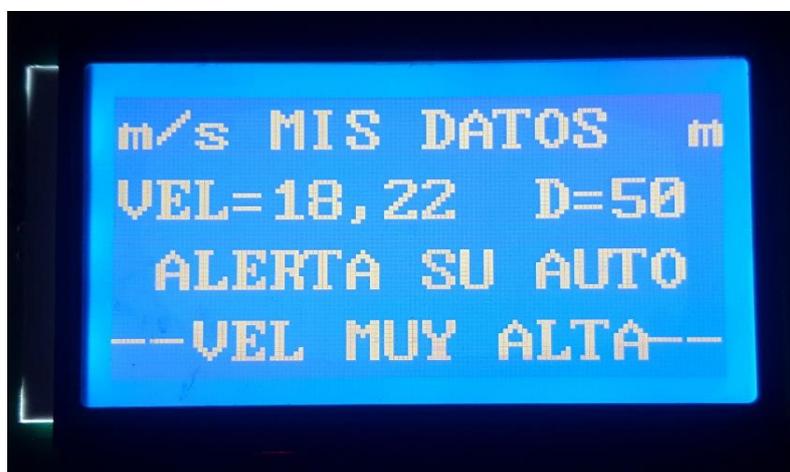


Figura 33-2: Mensaje que se despliega cuando se dispara la alerta por exceso de velocidad estando el móvil dentro del rango del nodo fijo

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la figura 34-2 se presenta el diseño de la interfaz audio visual, cuando uno de los nodos móviles en la secundaria ha excedido el límite de velocidad y el nodo móvil que se está conduciendo se encuentra en principal y dentro del límite de velocidad. Esta alerta es determinada por el nodo móvil gracias a los datos compartidos por el nodo fijo.



Figura 34-2: Mensaje que se despliega el nodo móvil en principal cuando el nodo móvil en secundaria excede el límite de velocidad

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

CAPÍTULO III

3. PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de 5 pruebas mediante las cuales se evalúa el funcionamiento del sistema desarrollado en los siguientes aspectos: estabilidad en la adquisición de datos y en el cálculo de distancias, calidad de la comunicación entre el nodo fijo y los nodos móviles, tiempos de ejecución de los algoritmos, emisión de alertas y en lo que respecta al consumo de corriente de los nodos. En la parte final se presenta un resumen de los costos para la construcción del sistema junto con las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

3.1. Caracterización del hardware y las comunicaciones

La finalidad de estas pruebas fue evaluar la variabilidad de los datos recolectados por el módulo GPS NEO 7M y de igual manera, en el cálculo de la distancia de separación del automóvil a la intersección. Además, su fin fue definir el error absoluto de las variables mencionadas, comparando las distancias calculadas por el nodo móvil con las establecidas por una cinta métrica. Por otra parte, en las medidas de velocidad la comparación se realizó con el tacómetro del automóvil. Finalmente, con estas pruebas se definió el alcance máximo de la señal inalámbrica de radiofrecuencia generada por el módulo NRF24L01 a diferentes velocidades de transmisión.

3.1.1. Validación en la adquisición de datos y en el cálculo de variables

En esta sección, se validó la estabilidad en la adquisición de: latitud, longitud, velocidad y en el cálculo de la distancia del nodo móvil a la intersección, además, se estimó el error absoluto en dichos parámetros. Para ello, se recolectaron datos durante 30 minutos, los cuales fueron proporcionados por el nodo móvil a la vez que fueron enviados al PC donde se almacenaron en una hoja de cálculo de Excel. Los datos para la prueba de variabilidad fueron tomados con cielo despejado, obteniendo un HDOP (*Horizontal Dilution of Precision*, por sus siglas en inglés) promedio de 1,34 con 9 satélites en conexión, también en promedio, lo que indica una buena precisión en la lectura de datos. El análisis de la estabilidad se realizó mediante los indicadores estadísticos: media aritmética (\bar{X}), desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación CV. Como escenario para la realización de las pruebas se eligió una intersección urbana con las características de la intersección descrita en la sección 2.1.

Para evaluar la estabilidad en la adquisición de los datos de longitud, latitud y en el cálculo de la distancia, se realizó una marca en el piso con una distancia de separación a la intersección de 10m sobre la que se situó el vehículo, después, con el automóvil estático, se tomaron las medidas hechas por el nodo móvil y se enviaron al PC. Para determinar el error absoluto en el cálculo de la distancia se tomó como referencia la media de 10m realizada con la cinta métrica.

Para evaluar la estabilidad de los datos de velocidad se tomaron lecturas del módulo GPS con el automóvil estático, como equipo patrón para esta variable se eligió el tacómetro del automóvil.

En el gráfico 1-3 se observa la variabilidad en las lecturas de velocidad del GPS con el automóvil estático. Se puede notar que la lectura es inestable, lo cual es confirmado por el valor de su coeficiente de variación, el mismo que es de 82%, sin embargo, al observar el valor de la desviación estándar, el mismo que es de 0,21 (m/s), se puede aseverar que, si bien la variabilidad es alta, esta se produce en el primer y segundo decimal de las lecturas de velocidad, por lo que la estimación en la velocidad no se ve afectada en gran medida. Los indicadores de variabilidad para las lecturas de velocidad del GPS se detallan en la tabla 1-3.

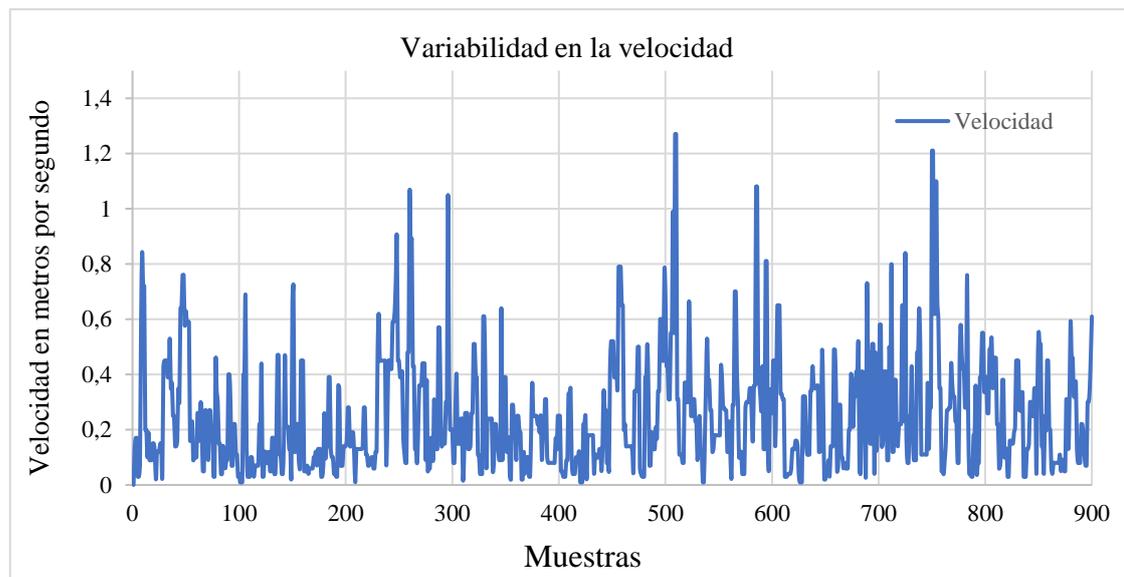


Gráfico 1-3: Variabilidad en las lecturas de velocidad proporcionadas por el GPS

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Tabla 1-3: Indicadores estadísticos de variabilidad para la velocidad

\bar{X} (m/s)	0,15
σ (m/s)	0,21
CV*100 %	82%

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la tabla 2-3, se muestra el valor del error absoluto máximo cometido en las lecturas de velocidad, el cual es de 1,27 m/s, es una medida que no puede ser pasada por alto, sin embargo, al observar este valor dentro de la tabla de datos de la prueba, se puede notar que durante esta lectura el módulo presenta un valor de HDOP de 2,14 con 5 satélites en conexión, lo que significa que es un dato poco preciso al ser adquirido por el módulo NEO 7M cuando existe una señal GPS de baja calidad. Por otra parte, el error promedio de lecturas de velocidad es de 0,15 m/s lo cual es positivo ya que la precisión de velocidad del módulo NEO 7M establecida por el fabricante es de 0,1 m/s.

Tabla 2-3: Error absoluto de la velocidad

\bar{X}	0,15 m/s
<i>Min</i>	0,01 m/s
<i>Max</i>	1,27 m/s

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En el gráfico 2-3, se observa la evolución de las lecturas de latitud del módulo GPS. Gráficamente se nota que dicho parámetro presenta una alta variabilidad y que su tendencia es oscilar sobre el valor de la consigna (latitud de la intersección). Por otra parte, el CV mostrado en la tabla 3-3 establece que la variabilidad de las lecturas de latitud es del 0,001414%, dicho valor es pequeño, aunque resulta contraproducente, pues afecta de manera directa en el cálculo de la distancia, además el valor de la desviación estándar indica que la variación se produce en el quinto y sexto decimal del valor que define a la latitud.

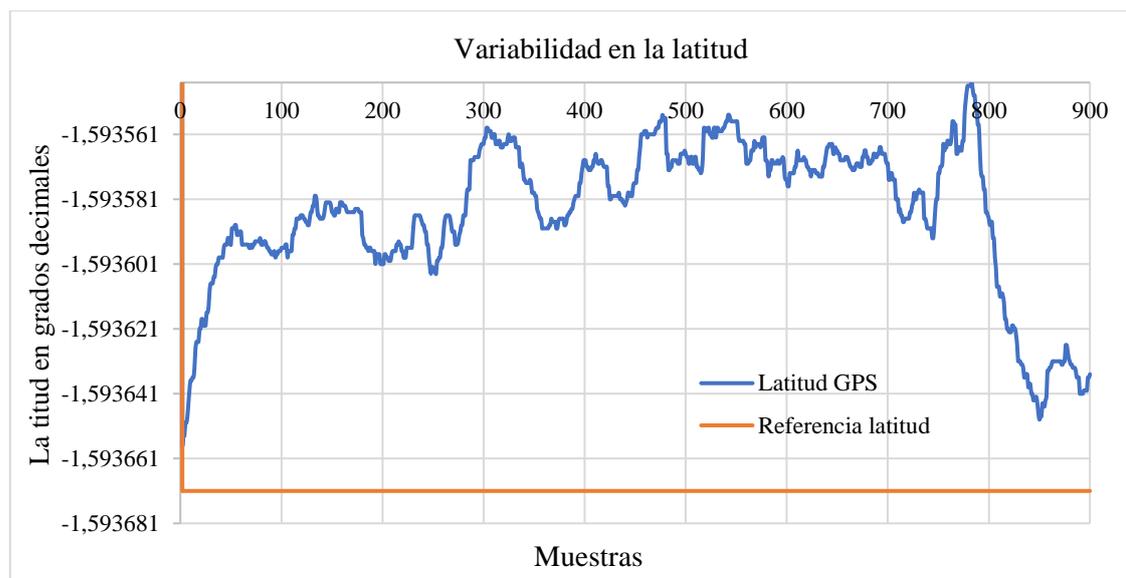


Gráfico 2-3: Variabilidad en las lecturas de latitud del GPS

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Tabla 3-3: Indicadores estadísticos de variabilidad para la latitud

Indicadores para la latitud del GPS (grados decimales)	
\bar{X}	-1,593585
σ	0,000023
CV*100 %	0,001414%

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En el gráfico 3-3 se observa la evolución de las lecturas de longitud del GPS. Para este parámetro, gráficamente se nota que la variabilidad es significativa y durante el tiempo de duración de la prueba se observa que este parámetro tiende a oscilar alrededor de la consigna (longitud de la intersección). Lo mencionado anteriormente se refleja en el CV mostrado en la tabla 4-3, cuyo valor es 0,000041% y los cambios en la adquisición se producen en el quinto y sexto decimal del valor que define la longitud, como lo indica la desviación estándar de los datos. Al igual que en la adquisición de la latitud, la variabilidad que presenta la longitud es contraproducente, pues afecta de manera directa al cálculo de la distancia.

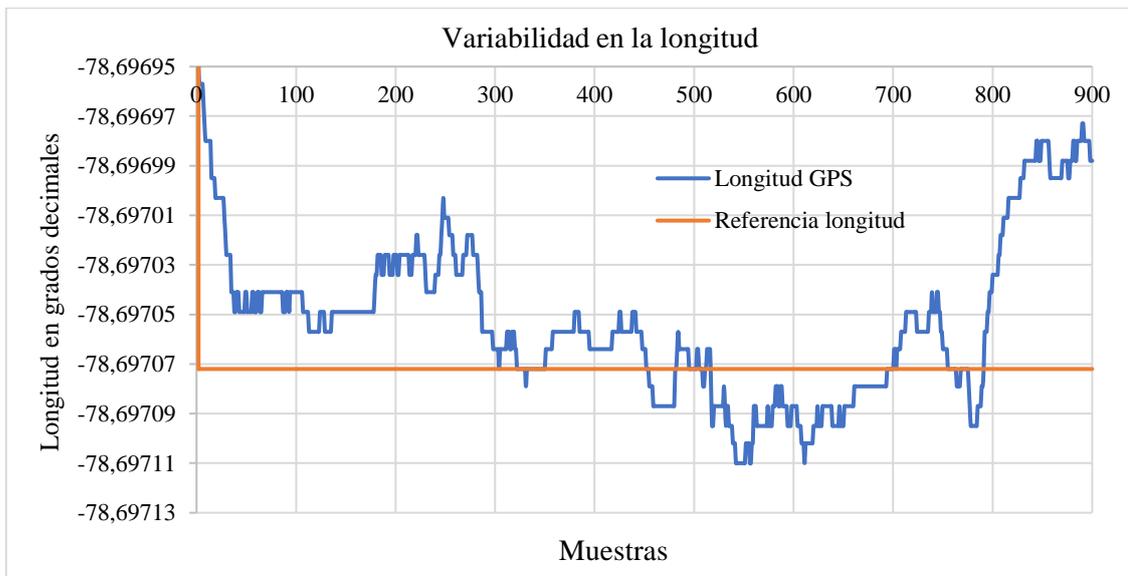


Gráfico 3-3: Variabilidad en las lecturas de longitud del GPS

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Tabla 4-3: Indicadores estadísticos de variabilidad para la longitud

Indicadores para la Longitud (grados)	
\bar{X}	-78,697047
σ	0,000032
CV*100 %	0,000041%

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Continuando con la caracterización del módulo GPS NEO 7M, en el gráfico 4-3, se observa la variabilidad en el cálculo de la distancia, cuyo valor es 11%, demostrando así, que la variabilidad

en las lecturas de latitud y longitud afectan de manera directa a la estabilidad del cálculo de la distancia. En la tabla 5-3 se define además que la distancia promedio medida es de 10,67m con una desviación estándar de 1,19m, lo cual es positivo pues indica que durante la realización de la prueba el error promedio cometido está dentro del valor establecido por el fabricante del módulo NEO 7M, el cual es de 2,5m.

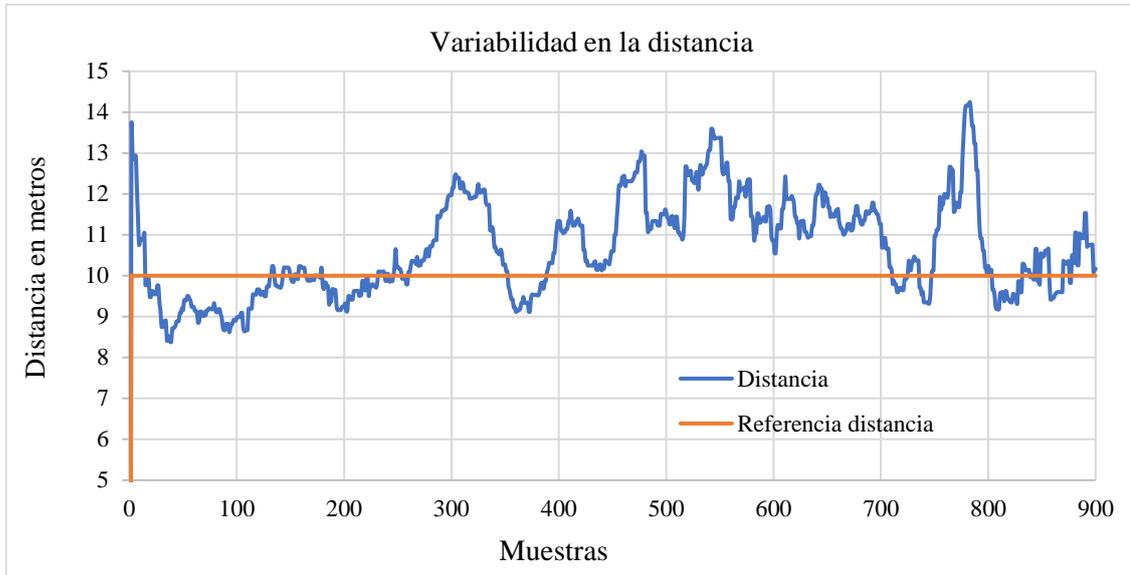


Gráfico 4-3: Variabilidad en el cálculo de la distancia del móvil a la intersección

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Tabla 5-3: Indicadores estadísticos de variabilidad para la distancia

\bar{X}	10,67 m
σ	1,19 m
CV*100 %	11%

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Para finalizar la caracterización del módulo NEO 7M en la tabla 6-3, se muestran valores que definen el error absoluto para el cálculo de la distancia del auto (nodo móvil) a la intersección. En la tabla mencionada, se puede notar que el error absoluto máximo es de 4,24m y el error promedio es de 1,07m. Si bien el error máximo es mayor al valor establecido por el fabricante del módulo (2,5m) la medida es aceptable, pues en promedio el error cometido en el cálculo de la distancia es de 1,07m, además la moda en el error absoluto es de 0,40m, es decir que, durante la mayor parte de duración de la prueba, el error cometido es menor al establecido por el fabricante. Aquí es importante mencionar que en promedio el HDOP fue de 1,34 con 9 satélites en conexión, es decir, que el cálculo de la distancia y por ende la adquisición de velocidad, latitud y longitud son confiables y precisos cuando la señal del GPS es excelente.

Tabla 6-3: Error absoluto en el cálculo de la distancia a la intersección

\bar{X}	1,07 m
<i>Min</i>	0,00 m
<i>Moda</i>	0,40 m
<i>Max</i>	4,24 m

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

3.1.2. Alcance de la señal inalámbrica y velocidad de transmisión

A partir de esta prueba se definieron intervalos de distancia en los alrededores de la intersección, donde la señal inalámbrica es: excelente, buena, mala y nula en base al porcentaje de intermitencia en la comunicación entre el nodo fijo y el nodo móvil. Las pruebas fueron realizadas con las siguientes velocidades de transmisión: 250kbps, 1Mbps y 2Mbps.

Para empezar, se configuró en todos los nodos móviles y en el nodo fijo la velocidad de transmisión en 250kbps, 1Mbps y 2Mbps en todos los casos el canal de radiofrecuencia fue 2,490 GHz. Luego se realizó lo siguiente: se desplazó de manera constante el nodo móvil alejándose de la intersección hasta que se perdió la señal del nodo fijo por completo, después se desplaza el nodo móvil en sentido contrario (acercándose a la intersección). Durante el trayecto de ida y vuelta se enviaron constantemente a la PC la distancia calculada por el nodo móvil luego de recibir la respuesta del nodo fijo.

En el gráfico 5-3, se observa el resultado de la prueba para determinar el alcance máximo de la señal inalámbrica a una velocidad de transmisión de 250 kbps. En él se puede observar que la recepción de la señal inalámbrica fue intermitente durante todo el trayecto del móvil, definiendo así, los siguientes intervalos: excelente de 0 a 50m, buena entre 51m y 130m, la calidad fue mala a partir de los 131m hasta los 190m y, a partir de este punto, la señal inalámbrica se perdió por completo. Estos rangos se establecen a partir del cálculo del porcentaje de intermitencias en dichos intervalos, los cuales se detallan en la tabla 7-3.

Tabla 7-3: Rangos de recepción de la señal a una tasa de transmisión de 250 Kbps

Intervalo de recepción (m)	Intermitencias (%)	Tramas recibidas (%)
0-50 m	17,65	82,35
51-130 m	20,31	79,69
131-190 m	55,88	44,12

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

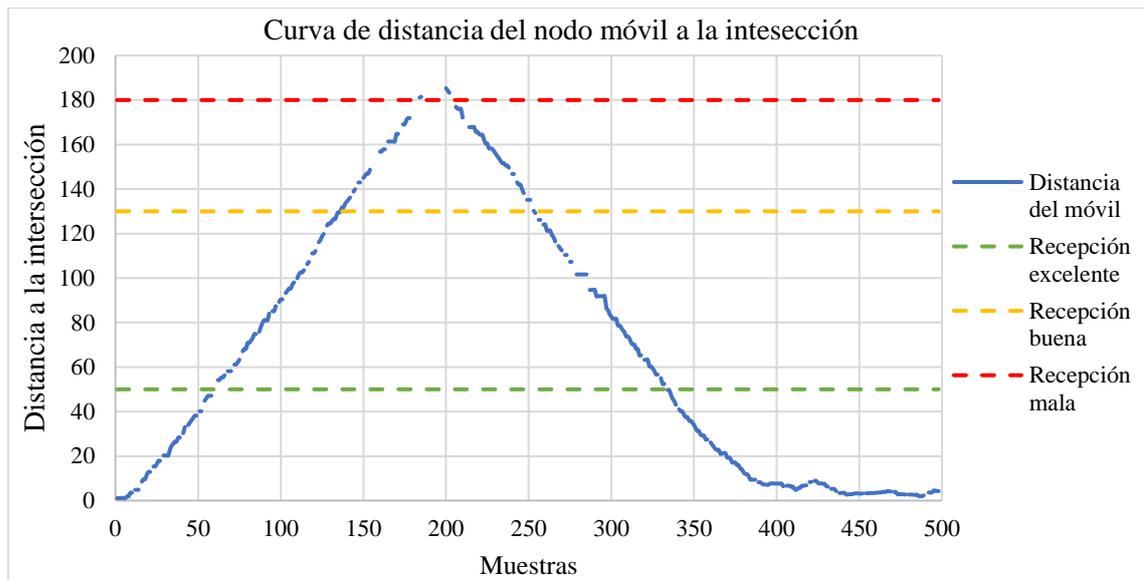


Gráfico 5-3: Definición de rangos de recepción de la señal inalámbrica a 250kbps

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En el gráfico 6-3, se observa el resultado de la prueba para determinar el alcance máximo de la señal inalámbrica a una velocidad de transmisión 1Mbps. En él se puede observar que la recepción de la señal inalámbrica fue excelente en el intervalo de 0 a 110m, buena entre 111m y 170m, la calidad fue mala a partir de los 171m hasta los 187m y, a partir de este punto, la señal inalámbrica se perdió por completo. Estos rangos se establecen a partir del cálculo del porcentaje de intermitencias en dichos intervalos, los cuales se detallan en la tabla 8-3.

Tabla 8-3: Rangos de recepción de la señal a una tasa de transmisión de 1Mbps

Intervalo de recepción (m)	Intermitencias (%)	Tramas recibidas (%)
0-110 m	0,00	100,00
111-170 m	3,45	96,55
171-187 m	76,92	23,08

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

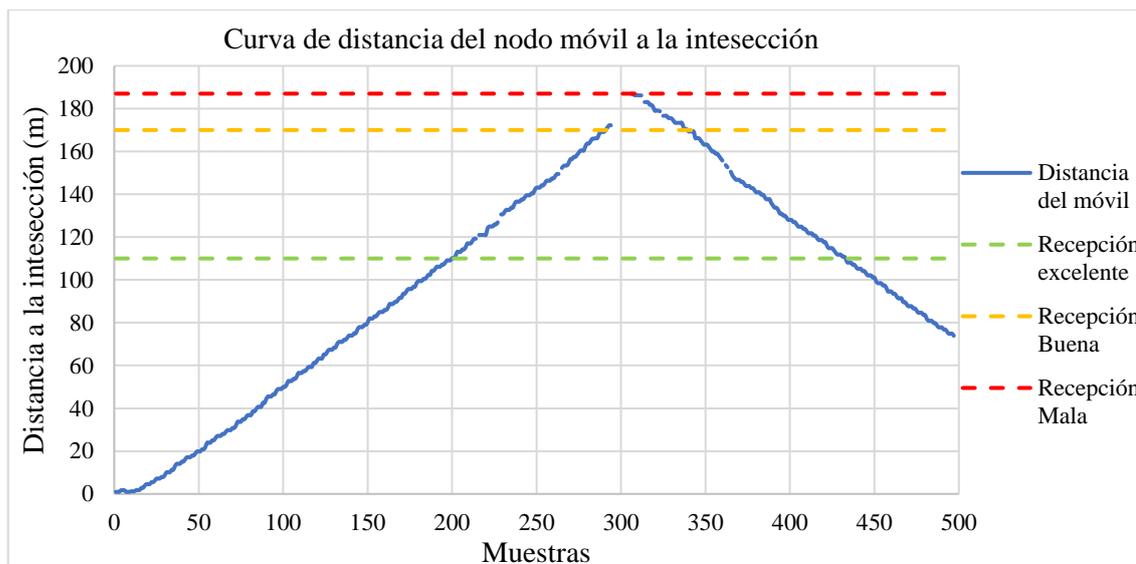


Gráfico 6-3: Definición de rangos de recepción de la señal inalámbrica a 1Mbps

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En el gráfico 7-3, se observa el resultado de la prueba para determinar el alcance máximo de la señal inalámbrica a una velocidad de transmisión de 2Mbps. En él se puede observar que la recepción de la señal inalámbrica fue excelente en el intervalo de 0 a 95m, buena entre 96m y 130m, la calidad fue mala a partir de los 131m hasta los 149m, distancia en la cual la señal se perdió por completo. Estos rangos se establecen a partir del cálculo del porcentaje de intermitencias en dichos intervalos, los cuales se detallan en la tabla 9-3.

Tabla 9-3: Rangos de recepción de la señal a una tasa de transmisión de 2Mbps

Intervalo de recepción (m)	Intermitencias (%)	Tramas recibidas (%)
0-95 m	0,00	100,00
96-130 m	6,90	93,10
131-149 m	88,24	11,76

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

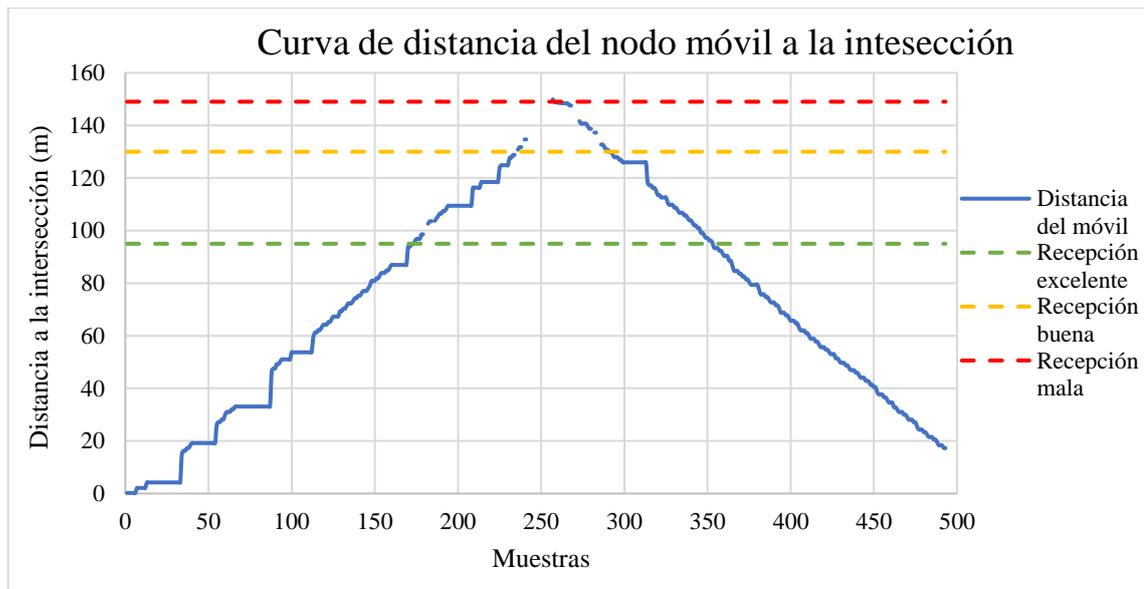


Gráfico 7-3: Definición de rangos de recepción de la señal inalámbrica a 2 Mbps

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En base a las pruebas realizadas en esta sección se descarta el uso de 250 kbps como velocidad de transmisión del sistema, pues es su porcentaje de intermitencia es el más alto en el intervalo de distancia de 0-100m. En cuanto a la velocidad de transmisión de 2Mbps su alcance está 5m por debajo de los requerimientos establecidos para el sistema, por lo que no se recomienda su uso en este sistema, sin embargo, a esta tasa de transmisión, la señal de radiofrecuencia presenta la menor intermitencia en el rango de 0-95m. En base a esto, se establece la velocidad de transmisión a la que opera el equipo en 1Mbps, al ser la tasa de transmisión que cumple con los requerimientos de alcance del sistema (0-100m) con la menor intermitencia en la señal inalámbrica.

3.2. Tiempos de ejecución de los algoritmos del sistema

La finalidad de esta prueba fue determinar el tiempo de ejecución del algoritmo programado en los nodos móviles y en el nodo fijo funcionando en conjunto, así como también definir la calidad en la comunicación entre el nodo fijo y los nodos móviles a partir del porcentaje de tramas no recibidas por parte de dichos nodos. Para ello se cargaron las coordenadas de la intersección al nodo fijo, luego se establecieron la cantidad de nodos móviles en un total de tres vehículos, es decir que, el algoritmo del nodo fijo procesó datos de tres vehículos, además, se configuró la velocidad de transmisión en 1Mbps y se eligió el canal 90 de la banda ISM. Luego se puso en funcionamiento los nodos móviles, todos con una distancia de separación del nodo fijo de 50m y con velocidad cero.

Para el análisis del tiempo de ejecución del algoritmo de los nodos móviles, los datos fueron enviados al puerto serie del PC una instrucción después de: recibir datos del nodo fijo, calcular los parámetros, enviar sus datos al nodo fijo y determinar la alerta. Si no se recibe una respuesta del nodo fijo los campos en el archivo de Excel aparecen vacíos.

Los datos del nodo fijo fueron enviados al PC una instrucción después de que dicho nodo genera el mensaje multicast. Si no se pueden enviar datos los campos en el archivo de Excel aparecen vacíos.

Los datos fueron analizados en un intervalo de un minuto tanto para el algoritmo del nodo móvil como del nodo fijo.

En la tabla 10-3, se observan los tiempos de ejecución del algoritmo para los nodos móviles cuando el vehículo circulaba en vía secundaria. El tiempo de ejecución promedio fue de 567ms y su tiempo máximo de ejecución fue de 1,017s, lo que indica que el diseño del algoritmo cumplió con los requerimientos de tiempo de ejecución definido en el capítulo 2.

Tabla 10-3: Tiempos de ejecución del algoritmo cuando el nodo móvil está secundaria

t máximo (s)	t mínimo (s)	t promedio (s)
1,017	0,054	0,567

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la tabla 11-3 se evalúa la calidad de la comunicación cuando el vehículo circula en vía secundaria, a partir del cálculo del porcentaje de tramas que no fueron recibidas por parte del nodo móvil desde el nodo fijo. En dicha tabla se establece que bajo las condiciones en las que se realizó esta prueba, el porcentaje de conexión exitosa para el nodo móvil en vía secundaria fue del 84.62% y el porcentaje de intermitencia fue del 15.38%.

Tabla 11-3: Calidad de la comunicación entre el nodo fijo y móvil en secundaria

Tramas perdidas	Tramas enviadas
16	88
Porcentaje de intermitencia	Porcentaje de éxito
15,38%	84,62%

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la tabla 12-3 se detallan los tiempos de ejecución del algoritmo para los nodos móviles, cuando el vehículo circula en vía principal. Allí se evidencia que el tiempo de ejecución promedio del algoritmo fue de 579ms y su tiempo máximo de ejecución fue de 1,017s. Dichos valores indican,

al igual que en el análisis anterior, que se cumplió con los requerimientos en los tiempos de ejecución del algoritmo para los nodos móviles.

Tabla 12-3: Tiempos de ejecución del algoritmo del nodo móvil en principal

t máximo (s)	t mínimo (s)	t promedio (s)
1,017	0,075	0,579

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la tabla 13-3 se muestran datos sobre la calidad de la comunicación entre el nodo fijo y el nodo móvil que circula en principal. Allí se indica que el porcentaje de comunicación exitosa fue del 93,20%, frente a un 6,80% de tramas que no fueron recibidas.

Tabla 13-3: Calidad de la comunicación entre el nodo fijo y el nodo móvil en principal

Tramas perdidas	Tramas enviadas
7	96
Porcentaje de intermitencia	Porcentaje de éxito
6,80%	93,20%

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la tabla 14-3 se muestran los tiempos de ejecución del algoritmo del nodo fijo, cuando existe la presencia de tres nodos móviles, uno en principal y dos en secundaria, ambos estáticos y con una distancia de separación a la intersección de 50m. En la mencionada tabla, se observa que el tiempo de ejecución máximo fue de 697ms y el tiempo promedio de ejecución del algoritmo fue de 200ms cumpliendo con los requerimientos en el tiempo de ejecución, al igual que el algoritmo para los nodos móviles.

Tabla 14-3: Tiempos de ejecución del algoritmo para el nodo fijo

t máximo (s)	t mínimo (s)	t promedio (s)
0,697	0,007	0,200

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la tabla 15-3 se muestran datos sobre la calidad de la comunicación del nodo fijo con los nodos móviles presentes en la intersección. Se observa que el porcentaje de tramas recibidas y enviadas con éxito es del 96,67%, frente a un 0,33%, que indica que el nodo fijo no fue capaz de enviar los datos.

Tabla 15-3: Calidad de la comunicación entre el nodo fijo y los móviles de la red

Tramas no generadas	Tramas enviadas
1	298
Porcentaje de intermitencia	Porcentaje de éxito
0,33%	96,67%

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

3.3. Funcionamiento del sistema

El objetivo de estas pruebas fue determinar si el sistema produce las alertas audiovisuales por exceso de velocidad y por insuficiente espacio de detención bajo condiciones de riesgo consideradas en los casos descritos en la sección 2.1.

3.3.1. Alertas de velocidad

En el gráfico 8-3, se observa el resultado de la prueba para determinar las alertas de velocidad definidas en el caso 5 de aplicación. En esta sección se detalla el resultado de tomar muestras durante un viaje en autopista, esto con el fin de tomar datos a velocidades en valores umbrales. Durante todo el trayecto se envían la velocidad proporcionada por el módulo GPS y la alerta que se determina en función a la misma. En el mencionado gráfico se puede notar que la señal GPS es intermitente, a pesar de ello, el nodo móvil es capaz de reconocer los cambios de velocidad para emitir las siguientes alertas: si el vehículo está en el rango $V < 13,8889$ m/s se emite la alerta de “Velocidad Ok”, si el vehículo está en el rango de velocidad de $V \geq 13,8899$ m/s y $V \leq 16,6667$ m/s se emite la alerta de “Velocidad ALTA” y si el vehículo está en el rango de velocidad de $V > 16,6667$ m/s se emite la alerta de “Velocidad MUY ALTA”.

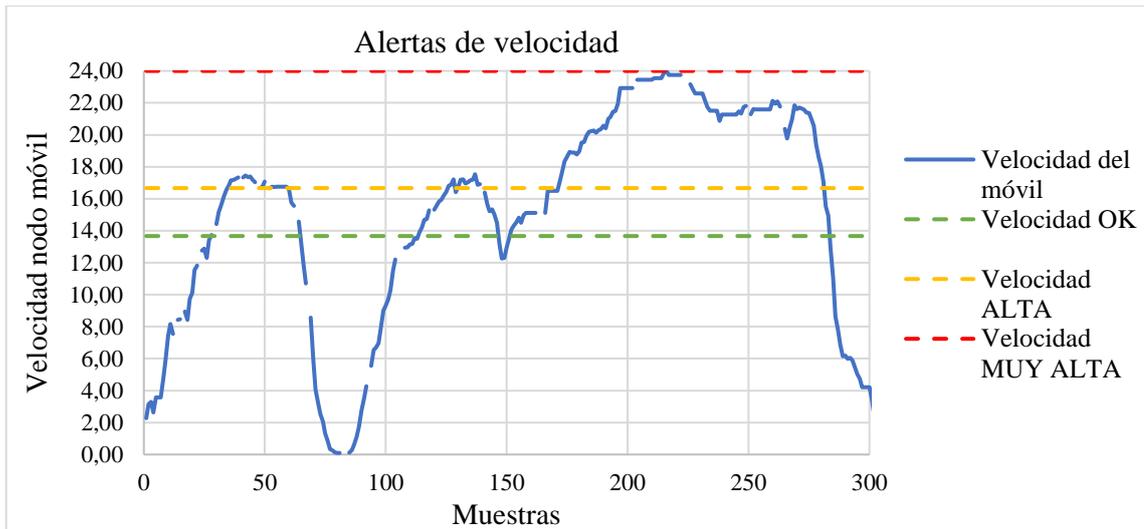


Gráfico 8-3: Alertas de velocidad emitidas por el nodo móvil

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la tabla 16-3 se muestran datos sobre las lecturas de velocidad menores a 13,8899 m/s (50km/h) donde se dieron 138 lecturas y la cantidad de alertas de velocidad “OK” fue 138, lo cual, determina que existió la misma cantidad de lecturas y alertas, por tanto, se establece que el porcentaje de error en la emisión de alertas es del 0,00 %, y el porcentaje de éxito es el 100 %.

Tabla 16-3: Análisis de emisión para alerta de velocidad OK

Lecturas de velocidad menores de 13,8889 m/s	Cantidad de alertas de velocidad
138	138
Porcentaje de error en generar la alerta	Porcentaje de éxito en alertas
0,00 %	100,00 %

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la tabla 17-3 se muestran datos sobre las lecturas de velocidad entre $V \geq 13,8899$ m/s y $V \leq 16,6667$ m/s (50 km/h y 60 km/h), donde se dieron 68 lecturas de velocidad y la cantidad de alertas fue 68, lo cual determina que existió la misma cantidad de lecturas y alertas, se observa que el porcentaje de error en generar las alertas es del 0,00 %, y el porcentaje de éxito es el 100%, comprobando que se emitieron correctamente las alertas de velocidad ALTA.

Tabla 17-3: Análisis de emisión alerta de velocidad ALTA

Lecturas de velocidad $V \geq 13,8889$ m/s y $V \leq 16,6667$ m/s	Cantidad de alertas velocidad
68	68
Porcentaje de error en generar la alerta	Porcentaje de éxito en alertas
0,00 %	100,00 %

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la tabla 18-3 se muestran datos sobre las lecturas de velocidad $V > 16,6667$ m/s (60 km/h) donde se dieron 139 lecturas de velocidad y la cantidad de alertas de velocidad fueron 139 lo cual determina que existió la misma cantidad de lecturas y alertas. Se observa que el porcentaje de error en generar alertas es del 0,00 %, y el porcentaje de éxito es del 100 %, comprobando que se emitieron correctamente las alertas de velocidad MUY ALTA.

Tabla 18-3: Análisis de emisión para alerta de velocidad MUY ALTA

Lecturas mayores a 16,6667 m/s	Cantidad de alertas velocidad
139	139
Porcentaje de error en generar la alerta	Porcentaje de éxito en alertas
0,00	100,00

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

3.3.2. *Alertas por insuficiente espacio de frenado*

En esta sección se presentan los resultados de las pruebas, con las que se evaluó el funcionamiento del sistema en lo que respecta a la emisión de alertas por insuficiente espacio de frenado en los casos mencionados en la sección 2.1, para todos ellos, se contó con tres vehículos dos en secundaria y uno en principal.

Como primera parte de esta prueba se definió si el nodo móvil es capaz de estimar una distancia de detención menor que la distancia de separación a la intersección que calcula, pues con esta condición se asegura que el automóvil está en la capacidad de frenar sin provocar un siniestro. Para ello se hizo circular un nodo móvil en secundaria con una velocidad de 14,7 m/s, el cual no se detuvo al llegar a la intersección, ni disminuyó su velocidad cuando se acercó a la misma. Durante el trayecto se enviaron a la PC los siguientes datos: HDOP, distancia medida a la intersección, distancia de detención calculada, velocidad del móvil, y el estado de la alerta. Este experimento se repitió en 3 ocasiones.

En el gráfico 9-3 se observa la evolución de la distancia del móvil a la intersección (curva azul) y de la distancia de detención calculada (curva naranja), por lo que la alerta por insuficiente espacio de frenado se generó cuando la curva naranja fue mayor o igual que la curva azul. Se observa que las curvas se cortan en dos puntos; el primero de ellos corresponde al momento en el que el móvil se acercó a la intersección y la cruzó sin detenerse, el otro punto, corresponde al momento en el que el nodo móvil se alejó de la intersección, por lo que la alerta por insuficiente espacio de detención se mostró durante el intervalo definido por estos dos puntos. De ellos, el que resulta de interés para el análisis es el primero, cuando el móvil se acercó a la intersección. En este punto, la velocidad del nodo móvil fue de 14,7 m/s (52Km/h), la distancia de detención que calculó el nodo móvil fue de 53,1m y la distancia a la intersección que fue medida por dicho nodo tuvo un valor de 51,88m, estos datos fueron adquiridos con un HDOP de 0,94 y 11 satélites en conexión, lo cual indica una alta precisión en la adquisición de los datos, sin embargo, no se cumple con la condición de seguridad, pues el móvil necesita 1,22m extra para detenerse sin colisionar, sin embargo, este valor es optimista pues la alerta por insuficiente espacio de frenado fue generada invitando al conductor a tomar acción con anticipación.

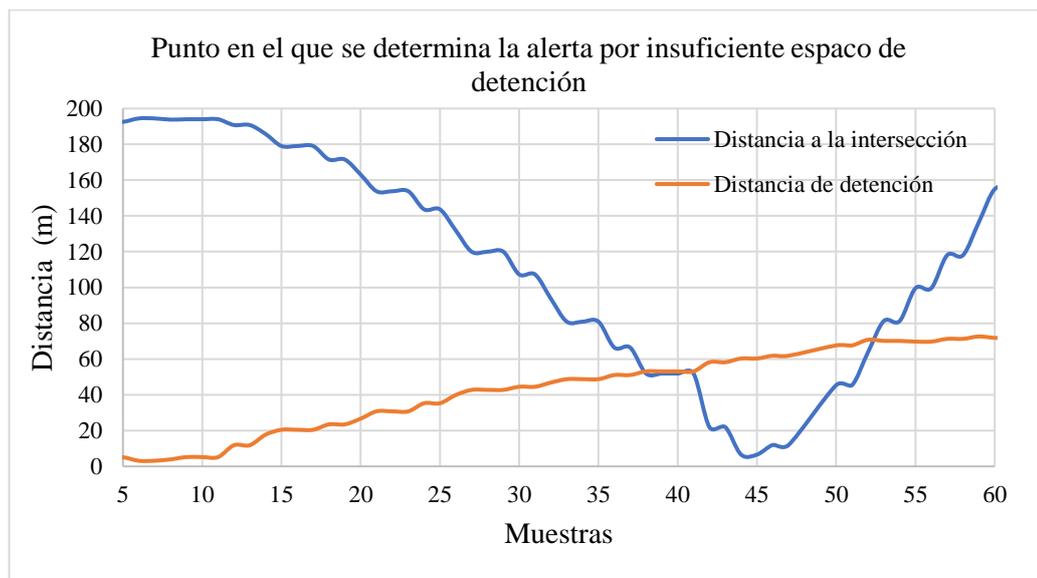


Gráfico 9-3: Punto en el que se determina la alerta por insuficiente espacio de frenado

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la tabla 19-3 se indican los resultados de los experimentos para esta prueba. Se evidencia que la estimación de la distancia de detención y distancia medida a la intersección tienen una relación directa con el valor de HDOP y del número de satélites en conexión, pues con un valor de HDOP inferior a 1 y con un número de satélites en conexión mayor a 8 el error cometido en la estimación de la distancia de detención y la distancia de separación a la intersección se minimiza. Por otra parte, con un valor de HDOP superior a 1,22 y 5 satélites en conexión el error cometido en el

cálculo de las variables es considerable. Los valores negativos en la columna de error en la tabla 19-3 indican los metros extras necesarios para que el vehículo se detenga sin colisionar.

En base a los resultados de esta prueba se puede afirmar que el sistema estima la alerta de manera aceptable cuando la señal del módulo NEO 7M es de buena calidad ($HDOP < 1$ y más de 8 satélites en conexión).

Tabla 19-3: Estimación del punto de generación de alerta por insuficiente espacio de detención

	HDOP	Satélites	Distancia a la intersección	Distancia de detención	Velocidad	Error
Experimento 1	1,22	5	25,13m	30,14m	9,38 m/s	-5,01 m
Experimento 2	1,16	8	48,81m	50,23m	14,1 m/s	-1,42 m
Experimento 3	0,94	11	51,88m	53,1m	14,68 m/s	-1,22 m

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas realizadas para caracterizar el funcionamiento del sistema de alerta en las condiciones de siniestralidad definidas en los casos de la sección 2.1.

Resultados para el caso 1. Esta prueba se realizó con tres vehículos, dos de ellos en vía secundaria (nodo 4 y nodo 2) y uno en principal (nodo 1). El comportamiento en los nodos fue el esperado, pues en todos ellos, se mostraron los mensajes configurados al no existir riesgo de siniestro, esta condición se observa y se valida en los gráficos 10-3 y 11-3, pues en ellos se nota que la curva de distancia de detención (naranja) para los nodos en secundaria nunca fue mayor que la curva de distancia a la intersección (azul). Los mensajes que se mostraron al nodo en principal fueron los datos de velocidad y distancia de separación a la intersección de los móviles en secundaria y, a estos últimos, se les informó de la presencia de los otros móviles. En esta prueba se evidenció que la variabilidad en los datos de velocidad de los nodos móviles en secundaria dificulta la visibilidad de la información en el nodo móvil que circula en principal, ya que los datos que se muestran en este nodo cambian en función al nodo que circula con mayor velocidad en vía secundaria.

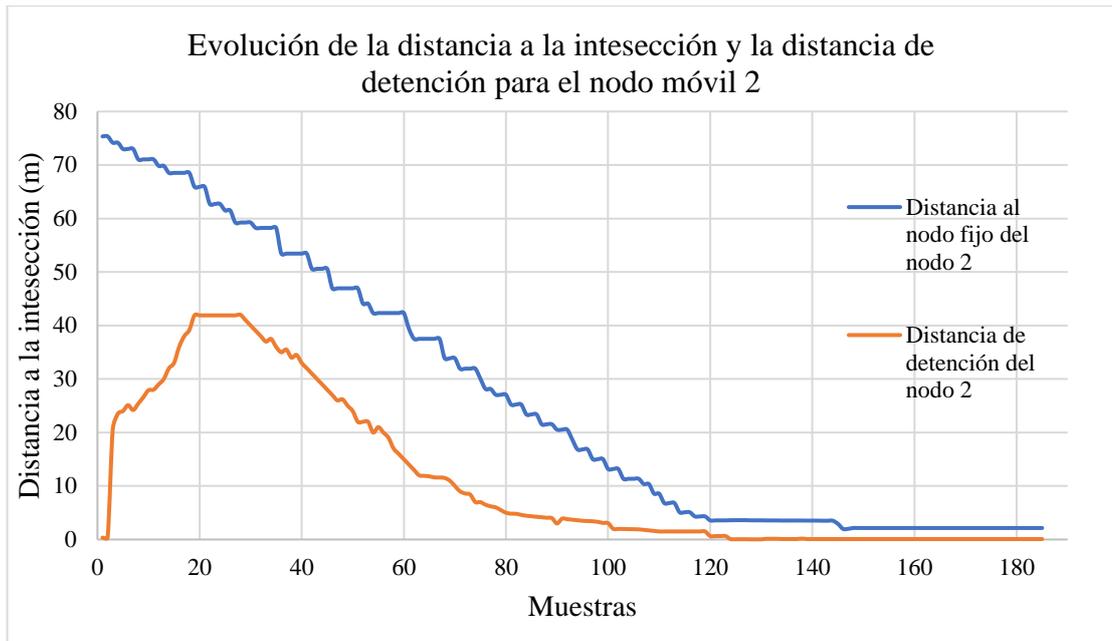


Gráfico 10-3: Evolución de la distancia a la intersección y la distancia de detención para el nodo móvil 2

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

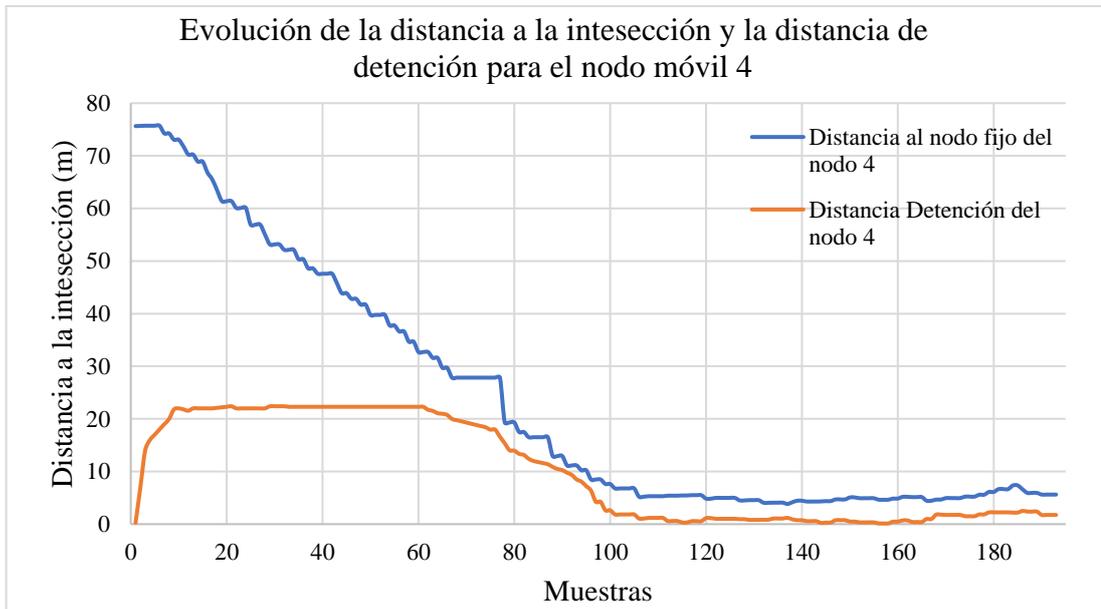


Gráfico 11-3: Evolución de la distancia a la intersección y la distancia de detención para el nodo móvil 4

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Resultado para el caso 2. El escenario planteado es similar al caso anterior, con la particularidad de que, en esta prueba, uno de los móviles en secundaria no se detuvo al momento de llegar a la intersección. La velocidad de dicho móvil fue de 13,5m/s (48,6km/h), la distancia de detención

que calcula el sistema para esta velocidad fue de 39,23m y la distancia medida a la intersección fue de 34,4m; bajo estas condiciones la alerta se produjo en todos los nodos móviles, es decir, al vehículo en principal se le indicó la dirección del nodo que produjo la alerta y se le sugirió frenar, por otra parte, al nodo en secundaria que tiene la intención de cruzar la intersección sin detenerse se le pidió frenar y se le mostró el tiempo estimado de llegada a la intersección y al otro móvil en secundaria se le informó de la presencia de los otros vehículos, por lo que las alertas se generaron exitosamente. Aunque es importante mencionar que el error cometido por el sistema es de 4,83m para esta prueba, es decir, que para garantizar la seguridad en el frenado fue necesario esa cantidad extra de espacio. En la tabla se muestran los resultados al realizar este experimento a distintas velocidades.

Tabla 20-3: Punto en el que se genera la alerta para el caso 2 con 3 móviles en red y error en la estimación

Nodo que produce la alerta	Satélites	HDOP	Velocidad (m/s)	Distancia de detención (m)	Distancia a la intersección (m)	Error (m)
4	11	0,9	4,03	11,31	10,29	-1,02
2	7	1,99	5,09	14,71	7,35	-7,36
4	10	1,27	7,4	17,93	15,59	-2,34
2	10	1,05	4,29	12,11	7,3	-4,81
4	11	1,14	13,5	39,23	34,4	-4,83

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

Resultado para el caso 3. Para esta prueba la distancia de separación a la intersección con la que partió el vehículo fue de 180m, alcanzando durante el trayecto una velocidad máxima de 19,1 m/s (68.76 kmp/h). En este caso las alertas por velocidad dentro del móvil en secundaria se mostraron con éxito, por otra parte, las alertas dentro del vehículo en principal generada por los excesos de velocidad del nodo en secundaria presentaron retardos, pero se generaron con éxito.

Resultado para el caso 4. Para el caso 4 la prueba se realizó con un vehículo ubicado a 200m de distancia de la intersección, es decir, fuera del rango de la señal inalámbrica. Dentro del vehículo se instalaron dos nodos móviles, uno configurado como nodo móvil en secundaria y otro como nodo móvil en principal. Luego se movilizó el vehículo a 8m/s (30km/h), haciendo que la distancia medida por los nodos móviles disminuya, a la vez se tomaron muestras usadas para el análisis de los datos. Este procedimiento se realizó también para las siguientes velocidades: 11m/s (40km) y 17 m/s (60km).

Los resultados de la prueba para el caso 4 de aplicación, fue exitoso únicamente para la velocidad de 8m/s (30km/h), pues para los casos en los que la velocidad fue mayor, los nodos móviles no fueron capaces de conectarse con el nodo fijo durante el trayecto en el que móvil se acercaba a la intersección. Es importante mencionar que la distancia a la que el nodo móvil estableció conexión con el nodo fijo a circulando a una velocidad de 8m/s fue de 125m.

En el gráfico 12-3 se observan los trayectos definidos por las mediciones del nodo móvil en secundaria, el nodo móvil en principal y la recta que describe la forma ideal de la disminución de la distancia. Se observa que, a pesar de las condiciones impuestas para la prueba, la medición de distancia de los nodos móviles difirió una de la otra. Por otra parte, ambas curvas no se alejan de la recta, por lo que se puede aseverar, que las mediciones de distancia son variables pero no difieren del valor de referencia.

Para este caso se generó la alerta audiovisual tanto para el móvil en secundaria como el móvil en principal de manera simultánea a una distancia de separación a la intersección de 19,84m y se determinó una distancia de detención de 26,53m. En base a estos dos datos se establece que el sistema en este escenario no es capaz de suministrar la alerta con el suficiente espacio de frenado, pues se necesitan 6,69m extras para que el móvil en secundaria se detenga sin riesgo de colisión. Sin embargo, cabe mencionar que este es un caso extremo, en el que ninguno de los dos conductores toma acción.

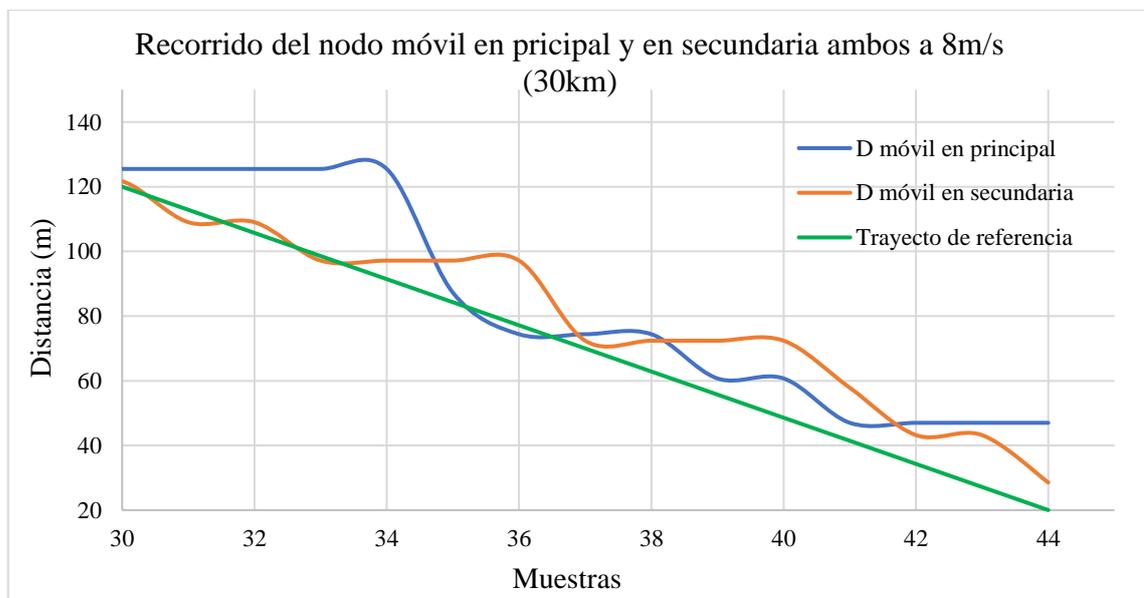


Gráfico 12-3: Recorrido del nodo móvil en principal y en secundaria ambos a 8 m/s (30km/h)

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

3.4. Consumo de potencia

A partir de estas pruebas se definió el consumo de corriente que tuvieron los nodos móviles del sistema cuando reciben, procesan y transmiten datos. De igual manera se definió el consumo de corriente del nodo fijo en el modo de bajo consumo y cuando es despertado por los nodos móviles. El equipo utilizado para las mediciones fue la pinza amperimétrica KPS-PA430 MINI cuya precisión es $\pm 2\%$ con una resolución de 0,01A en la escala de medición de 40A.

3.4.1. Consumo del nodo fijo

En la tabla 21-3 se muestra información que resume el consumo de corriente del nodo fijo reflejado en un total de 20 muestras tomadas durante un minuto. Allí se observa que el consumo máximo de corriente fue de 150mA y como consumo promedio se tuvo una corriente de 114mA. En base a estos datos se estima que la batería del nodo fijo tiene una autonomía máxima de 25h en modo de bajo consumo.

Tabla 21-3: Datos sobre el consumo de corriente del nodo fijo en modo sleep

Consumo promedio (A)	Consumo máximo (A)	Consumo mínimo (A)
0,114	0,150	0,06

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

En la tabla 22-3 se muestra información que resume el consumo de corriente del nodo fijo transmitiendo de manera continua. Allí se observa que el consumo máximo de corriente fue de 180mA y como consumo promedio se tuvo una corriente de 140mA. En base a estos datos se estima que la batería del nodo fijo cuando trasmite información de forma continua tiene una autonomía máxima de 20h.

Tabla 22-3: Datos sobre el consumo de corriente del nodo fijo transmitiendo

Consumo promedio (A)	Consumo máximo (A)	Consumo mínimo (A)
0,140	0,180	0,11

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

3.4.2. Consumo del nodo móvil

En la tabla 23-3 se muestra información que resume el consumo de corriente del nodo móvil reflejado en un total de 20 muestras tomadas durante un minuto. Allí se observa que el consumo máximo de corriente fue de 290mA y como consumo promedio se midió una corriente de 252mA. En base a estos datos se estima que la batería del nodo móvil tiene una autonomía máxima de 13h y una autonomía promedio de 15h.

Tabla 23-3: Datos sobre el consumo de corriente del nodo móvil

Análisis de consumo de corriente del nodo móvil		
Consumo promedio (A)	Consumo máximo (A)	Consumo mínimo (A)
0,252	0,290	0,22

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

3.5. Resumen de costos del sistema

En la tabla 24-3 se muestra el análisis económico de los componentes que conforman el sistema, en donde se detallan sus componentes, la cantidad y sus respectivos precios unitarios. El sistema está compuesto por un nodo fijo y tres nodos móviles. Los nodos móviles tienen los mismos módulos y carcasa. La tabla 24-3 desglosa los componentes utilizados en el nodo fijo, los nodos móviles y componentes adicionales, se observa que el costo de construcción del nodo fijo es de 67\$ y del nodo móvil es de 92\$. Además, se detalla que el costo total de los materiales utilizados para este trabajo fue de 373,25\$.

Tabla 24-3: Análisis de costos para el sistema

Componente	Cantidad (u)	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
Componentes nodo fijo			
Módulo NFR24L01	1	10,00	10,00
Arduino Nano	1	7,00	7,00
Módulo TP4056	1	2,50	2,50
Módulo regulador voltaje AMS1117 3,3V	1	1,50	1,50
Baterías recargables Litio 3,7 V	2	9,49	19,00
Panel solar celda 5 V 220 mA 1,1 W	1	8,00	8,00
Impresión 3D carcasa	11 h	1,75	19,25
TOTAL			67,25
Componentes nodos móviles			
Módulo NFR24L01	3	10,00	30,00
Arduino Nano	3	7,00	21,00
Módulo GPS NEO 7M	3	23,0	69,00
Pantalla LCD (LCM12864R)	3	14,0	42,00
Módulo I2C para pantalla LCD	3	3,51	10,53
Módulo TP4056	3	2,50	7,50
Módulo regulador voltaje AMS1117 3,3V	3	1,50	4,50
Baterías recargables Litio 3,7 V	3	9,49	28,47
Impresión 3D carcasa	36 h	1,75	63,00
TOTAL			276
Componentes adicionales			
Accesorios	Varios	30,00	30,00
COSTO TOTAL DEL SISTEMA			373,25

Realizado por: Caisaguano, C.; García A. 2021

CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de alerta temprana para prevenir la siniestralidad vehicular en intersecciones urbanas, basado en una WSN con topología estrella, compuesto por un nodo fijo y nodos móviles, que comparten información inalámbricamente por radiofrecuencia.

El sistema es capaz de generar alertas audiovisuales en función a la velocidad, distancia de separación a la intersección y vía de circulación de los vehículos, con un alcance de la señal inalámbrica máximo de 170m, a una tasa de transmisión de 1Mbps.

El tiempo de respuesta del sistema desarrollado es de 1,017s como máximo y de 579ms como tiempo promedio, cumpliendo así con los requerimientos definidos para el mismo.

Los nodos móviles no son capaces de establecer conexión con el nodo fijo cuando los transceptores no tienen línea de vista y/o el vehículo entra a la red circulando a una velocidad mayor a 30km/h, a dicha velocidad la distancia a la que se establece conexión entre el nodo fijo y los nodos móviles es de 125m.

El sistema es capaz de generar la alerta audiovisual por insuficiente espacio de frenando en los casos de aplicación, el error que presenta el sistema en la estimación de la alerta para las velocidades consideradas en las pruebas, son de 1,07m en el mejor de los casos, 4,83m en un caso desfavorable y por 6,69m en el peor de los escenarios, este error indica que el vehículo llega a necesitar tal cantidad de espacio extra para frenar con completa seguridad.

El módulo GPS NEO 7M, es un dispositivo de bajo costo que presenta poca variabilidad en la adquisición de datos de longitud y latitud, sin embargo, dicha variabilidad en el funcionamiento del nodo móvil es significativa, pues causa que el cálculo de la distancia tenga un error absoluto máximo variable. Otro factor que afecta en gran medida a la precisión en la adquisición de datos de posición y por ende al cálculo de la distancia, es el número de satélites en conexión y el valor de HDOP, definiendo en base a estos dos parámetros que los datos son confiables cuando sus valores son mayores que 6 y menor que 1 correspondientemente.

En cuanto a la adquisición de velocidad, el módulo NEO 7M presenta una variabilidad elevada, pues su coeficiente de variación es del 82%, sin embargo, la variabilidad de dicho parámetro se produce en el segundo decimal, por lo que la estimación de la velocidad no se ve afectada por este hecho. Lo cual se evidencia en los resultados de las pruebas de alertas de velocidad, ya que,

en ellas se determinó un 100% de éxito al momento de evaluar y mostrar la alerta generada por exceso de velocidad.

El módulo NRF24L01, es un dispositivo de muy bajo costo que junto a las bibliotecas *NRF24.h* y *NRF24Network.h*, permiten implementar una WSN con hasta 738 nodos en conexión (en teoría), sin embargo, son dispositivos muy sensibles al ruido eléctrico, esto evidenciado en la intermitencia de la señal de radiofrecuencia, sobre todo a una tasa de transmisión de 250kbps. El alcance máximo de la señal de radiofrecuencia de dicho módulo a una tasa de transmisión de 250kbps es de 190m, de 187m a 1Mbps y de 149m a 2Mbps, alcances muy distantes de los 1000m establecidos por el fabricante. Otra desventaja del módulo transceptor es que no es capaz de establecer conexión con su homólogo cuando el dispositivo sobre el que está instalado se mueve con una velocidad mayor a 30km/h.

La autonomía del nodo fijo es de 25h y es recargado durante el día por un panel solar. Por otra parte, la autonomía del nodo móvil de 13h y puede ser recargado mediante un conector micro USB.

RECOMENDACIONES

Se recomienda incrementar el tiempo y la cantidad de pruebas del sistema desarrollado con la finalidad de definir de manera más exacta sus características.

Incrementar el hardware en los nodos del sistema para permitir una comunicación GSM y el ingreso/almacenamiento de información relevante para el personal de la salud junto con la implementación de un servidor con encriptación que permita compartir datos hospitalarios de los ocupantes de los vehículos con una central de emergencia, para disminuir el tiempo de atención prehospitalaria y hacer que esta sea personalizada.

Implementar un servidor con encriptación que permita llevar un registro histórico de datos sobre siniestralidad vehicular en las intersecciones y el estado del tráfico en las mismas.

Diseñar algoritmos de control predictivo o de control robusto que permitan anticipar siniestros cuya respuesta actúe directamente sobre el sistema de frenos de los vehículos.

BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA NACIONAL DE REGULACIÓN Y CONTROL DEL TRANSPORTE TERRESTRE, T. y S.V. *Reglamento a ley de transporte terrestre tránsito y seguridad vial* [en línea]. Quito-Ecuador, 2012. [Consulta: 4 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/03/Decreto-Ejecutivo-No.-1196-de-11-06-2012-REGLAMENTO-A-LA-LEY-DE-TRANSPORTE-TERRESTRE-TRANSITO-Y-SEGURIDAD-VIA.pdf>

AGENCIA NACIONAL DE TRÁNSITO. *Reporte Nacional de Siniestros de Tránsito.* [en línea]. Quito-Ecuador, 2021. [Consulta: Consulta: 1 noviembre 2021]. Disponible en: https://www.ant.gob.ec/?page_id=2670

ALIEXPRESS. *Módulo GPS de BN 880 con Flash HMC5883, brújula y antena activa GPS para Arduino, Raspberry Pi, avión Pixhawk, Control de vuelo APM Partes y accesorios.* [en línea]. 2010. [Consulta: 6 noviembre 2021]. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/i/32899627183.html>.

AMAZON. *Longruner Pantalla táctil capacitiva de 7 pulgadas TFT LCD módulo HDMI 1024 x 600 para Raspberry Pi 3 2 modelo B y RPI 1 B+ A BB negro PC varios sistemas: Electrónica.* [en línea]. 2015. [Consulta: 13 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.amazon.com/-/es/Longruner-Pantalla-capacitiva-pulgadas-Raspberry/dp/B071X8H5FB>.

ANT DIRECCIÓN DE COMUNICACIÓN SOCIAL. *Agencia Nacional de Tránsito* [en línea]. 2021. [Consulta: 1 noviembre 2021]. Disponible en: ant.gob.ec/?p=4584.

ARDUINO. *Arduino Nano* [en línea]. 2021. [Consulta: 10 febrero 2022]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>.

ARDUINO. *Arduino* [en línea]. 2022. [Consulta: 19 diciembre 2021]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/>.

ARDUINO, *Arduino Nano — Arduino Official Store.* [en línea]. 2021. [Consulta: 10 febrero 2022]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>.

ARTURO. UNIT Electronics Componentes Eléctricos. [en línea]. 2020 [Consulta: 12 noviembre 2021]. Disponible en: <https://uelectronics.com/cual-tarjeta-de-desarrollo-elegir/>.

BERARDO, M.G.; & IRURETA, V.A. *Influencia de la correcta evaluación del tiempo de percepción y reacción* [en línea]. 2021. [Consulta: 25 diciembre 2021]. Disponible en: http://www.institutoivia.com/cisev-ponencias/spicologicos_fisiologicos_fp/maria_berardo.pdf

BRAVO GRANDA, BYRON ANDRÉS.; & BELMUDA BELMUDA, LUIS ALBERTO. Diseño de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo del tránsito vehicular y la contaminación CO2 dentro de un sector urbano [en línea] (trabajo de titulación). Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Ingeniería Electrónica. (Cuenca - Ecuador). 2017. p.3. [Consulta: 2021-11-06]. Disponible en: <http://biblioteca.esPOCH.edu.ec/Tutoriales/Norma%20ISO%20690.pdf>

CONNECTIVITY STANDARS ALLIANCE. *Zigbee* [en línea]. 2021. [Consulta: 6 noviembre 2021]. Disponible en: <https://zigbeealliance.org/es/solution/Zigbee/>.

DEL CARMEN SILVA LOPEZ, L.S. Diseño y construcción de una WSN bajo IEEE 802.15.4 para seguridad y monitoreo de variables [en línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias-Colombia. 2007. pp. 30-37. [Consulta: 27 octubre 2021]. Disponible en: <https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0039474.pdf>

DESCUBRE ARDUINO. *Módulo GPS e Interfaz con Arduino UNO*. [en línea]. 2004. [Consulta: 6 noviembre 2021]. Disponible en: <https://descubrearduino.com/modulo-gps/>.

DOXYGEN. *Optimized High Speed Driver for nRF24L01(+) 2.4GHz Wireless Transceiver* [en línea]. 2021a. [Consulta: 5 enero 2021]. Disponible en: <https://nrf24.github.io/RF24/>

DOXYGEN. *Optimized RF24 Network Layer for NRF24L01 radios* [en línea]. 2021b. [Consulta: 1 enero 2021]. Disponible en: <https://nrf24.github.io/RF24Network/>

ECURED. *Baterías de Li-Po - EcuRed*. [en línea]. 2021. [Consulta: 13 noviembre 2021]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Bater%C3%ADas_de_Li-Po.

FUNDACIÓN CEA COMISARIADO EUROPEO DEL AUTOMÓVIL. *¿Qué es el eCall?* [en línea]. 2021. [Consulta: 26 octubre 2021]. Disponible en: <https://www.seguridad-vial.net/vehiculo/seguridad-pasiva/120-que-es-el-ecall>

GAD MUNICIPAL DE RIOBAMBA. *Libro IV de las normas de arquitectura y construcción* [en línea]. Riobamba-Ecuador, 2021. [Consulta: 24 octubre 2021]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/410599194/LIBRO-IV-DE-LAS-NORMAS-DE-ARQUITECTURA-URBANISMO-Y-CONSTRUCCION-FINAL-docx>

GARCÍA, A.; et al. “Utilización de la comunicación por radiofrecuencia para la detección de vehículos en movimiento: revisión del estado del arte”. KnE Engineering / 6th Engineering, Science and Technology Conference [en línea], 2018, (Panamá), pp. 821-831. [Consulta: 15 de diciembre 2021]. DOI: [10.18502/keg.v3i1.1503](https://doi.org/10.18502/keg.v3i1.1503). Disponible: <https://knepublishing.com/index.php/KnE-Engineering/article/view/1503/3572>

HART, M. *TinyGPS++*, *Full-featured GPS/NMEA Parser for Arduino* [en línea]. 2022. [Consulta: 28 diciembre 2021]. Disponible en: <http://arduiniana.org/libraries/tinygpsplus/>.

LOS SANTOS ARANSAY, A. *Aplicación de las Redes de Sensores en el entorno vehicular* [en línea]. 2009. [Consulta: 4 septiembre 2021]. Disponible en: <http://www.albertolsa.com/wp-content/uploads/2010/04/rsi-aplicacion-de-las-redes-de-sensores-en-el-entorno-vehicular-alberto-los-santos.pdf>.

NEWCHIC. *Claite Bocina de sirena con cable de 120dB 9V para alarma de sistema de seguridad GSM - NewChic.* [en línea]. 2014. [Consulta: 21 enero 2022]. Disponible en: <https://es.newchic.com/claite-home-safety-5530/p-921353.html>.

NORDIC SEMICONDUCTOR ASA. Single chip 2.4 GHz Transceiver. *Evaluation*, 1(2), pp. 1–39. 2004. [Consulta: 21 enero 2021]. Disponible en: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Plus Preliminary Product Specification v1 0.pdf>

MCI ELECTRONIC. Digi Xbee3 Zigbee 3.0 PRO XBee.c- Comunicación para Tus Proyectos. *Ingeniería MCI* [en línea]. 2021. [Consulta: 12 noviembre 2021]. Disponible en: <https://xbee.cl/digi-xbee3-zigbee-3-0-pro/>.

MIRANDA REYES, JUAN CARLOS., & PADILLA BARAHONA, WALTER MAURICIO. Implementación de una WSN basado en 6LoWPAN para mejorar el sistema de seguridad vehicular preventivo [En línea] (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Escuela de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes. (Riobamba -Ecuador).2016. pp. 80-90. [Consulta: 2021-11-07] Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/6372/3/98T00107.pdf>

MUNDO MOTOR. *Toma De Mechero: Como Funciona, Uso, Averías, Como Repararlo y Más.* [en línea]. 2021 [Consulta: 13 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.mundodelmotor.net/toma-de-mechero/>.

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. *Estado de la seguridad vial en la Región de las Américas* [en línea]. 2019. Whashington. [Consulta: 30 septiembre 2021]. Disponible en: https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/51100/9789275320877_spa.pdf?sequence=5&isAllowed=y.

PAZMIÑO ORTIZ, LEANDRO ANTONIO., & SANCHEZ GOMEZ, Ricardo Adriano. Diseño y construcción de un prototipo inalámbrico RF para el monitoreo de la seguridad residencial de forma remota empleando la internet [en línea] (Trabajo de titulación). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. (Quito - Ecuador). 2006. p. 19. [Consulta:2021-11-07]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec>

PORRAS, E. *Tecnología GSM* [en línea]. 2012. [Consulta: 5 noviembre 2021]. Disponible en: <https://eve-ingsistemas-u.blogspot.com/2012/04/el-sistema-global-para.html>.

PROSIGNAL. Part Number Table. [en línea],1(1). pp. 16. 2012. [Consulta: 21 enero 2022] Disponible en: <http://www.farnell.com/datasheets/2171929.pdf>.

QINGYUN, BEIJING. Beijing Qingyun Aviation Instrument Co., Ltd., No. 43, North Third Ring West Road, Haidian, Beijing, 2005-1. pp. 3-4. 2009. [Consulta: 21 enero 2022]. Disponible en: <http://www.qingyun-it.com>.

RATINGS, A.M. TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8 PACKAGE / ORDER INFORMATION Complete Charge Cycle. pp. 1–3. 2021 [Consulta: 21 enero 2021]. Disponible en: <https://www.mikrocontroller.net/attachment/273612/TP4056.pdf>

RIFANSYAH. Datasheet I2C 1602 Serial LCD Module. *Eprint.Polsri.Ac.Id*, pp. 3. 2017. [Consulta: 21 enero 2022]. Disponible en: http://eprints.polsri.ac.id/4642/9/18_DATASHEET%20LCD.pdf

ROCKET SCREAM. *Lightweight low power Arduino library* [blog]. 2022. [Consulta: 17 febrero 2022]. Disponible en: <https://www.rocketcream.com/blog/2011/07/04/lightweight-low-power-arduino-library/>

RODRIGUEZ. *Raspberry Pi: todo lo necesario para iniciarse como maker desde cero*. [en línea]. 2018. [Consulta: 12 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.xataka.com/makers/cero-maker-todo-necesario-para-empezar-raspberry-pi>.

ROSADO MUÑOZ, ALFREDO. "Redes de comunicación: Topología y enlaces". *Sistemas Industriales Distribuidos* [en línea], 2003, (España) 1(1), p. 21. [Consulta: 2021-11-06] SID.ETSE. Disponible en: https://www.uv.es/rosado/courses/sid/Capitulo2_rev0.pdf

SYSTEMS, A.M. Advanced Monolithic Systems RoHS compliant [en línea]. no. 925. 2021 [Consulta: 21 enero 2021]. Disponible en: www.advanced-monolithic.com.

TEKNIKER MEMBER OF BASQUE RESEARCH & TECHNOLOGY ALLIANCE. *Redes de sensores*[blog]. España:2021. [Consulta: 2021-06-11]. Disponible en: <https://www.tekniker.es/es/redes-de-sensores>

TRACKSS FOUNDATION. *TRACKSS* [en línea]. 2018. [Consulta: 25 septiembre 2021]. Disponible en: <http://www.trackss.net>.

TRIPP BARBARA, CAROLINA, & AGUILAR IGARTUA, MÓNICA. "Red híbrida vehicular y de sensores: estado del arte". *Revista de Investigación en Tecnologías de la Investigación* [en línea], 2013, (España) 1(1), pp. 2-4. [Consulta: 2022-11-06]. ISSN 2387-0893. Disponible en: <https://mx.linkedin.com>

UBLOX. NEO-7 - Data Sheet Document. [en línea], pp. 1–26. 2014. [Consulta: 21 enero 2021]. Disponible en: https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-7_DataSheet_%28UBX-13003830%29.pdf.

ULTRAFIRE. Batería Ultrafire Recargable BRC18650 de 3.7v 3.000mA Roja protegida. [en línea]. 2020 [Consulta: 20 enero 2022]. Disponible en: <https://ultrafire.es/18650-17670-17500/27-bateria-de-litio-recargable-18650-de-37v-3000ma-roja-protegida-8944602310124.html>.

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE VALENCIA. *¿Qué es GSM y cómo funciona?* [en línea]. 2018. [Consulta: 5 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.universidadviu.com/es/actualidad/nuestros-expertos/que-es-gsm-y-como-funciona>.

VILLA MAURA, C.A.; et al. “Factores que inciden en la siniestralidad vial en el Ecuador”. *mktDescubre* [en línea], 2019, (Ecuador), pp. 121-129. [Consulta: 12 octubre 2021]. ISSN 2602-8522. Disponible en: http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13760/1/mkt_n14_12.pdf

Z-WAVE ALLIANCE. *Learn about Z-Wave* [en línea]. 2021. [Consulta: 6 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.z-wave.com/learn>.

ANEXOS

ANEXO A: Código del nodo fijo

```

                                Nodo fijo
*
* Creado: Sábado diciembre 25 2021
* Procesador: ATmega328p
* Compilador: Arduino
* Modificado: Fecha 01-Febrero-2022 Hora: 16:35

                                /*Librerías*/

#include <SPI.h>
#include <RF24.h>
#include <RF24Network.h>
#include "LowPower.h"

                                /*Nuevas instancias, constructores*/

RF24 radio(8, 10);
|
RF24Network network(radio);

                                /*Direcciones de red de los nodos, se usa en los headers*/

const uint16_t dir_nodo_fijo = 00;
const uint16_t dir_nodo_movil_1 = 01;
const uint16_t dir_nodo_movil_2 = 02;
const uint16_t dir_nodo_movil_3 = 03;
const uint16_t dir_nodo_movil_4 = 04;
const uint16_t dir_nodo_movil_5 = 05;

                                /*Variables globales*/

const uint8_t cant_nodos = 4;
uint8_t cant_mensajes = 0;
double velocidades_ordenadas[cant_nodos];
double copia_velocidades[cant_nodos];

//Coordenadas del nodo fijo
const double nodo_fijo_latitud = -1.593428;
const double nodo_fijo_longitud = -78.697044;

struct payload_t {
    uint16_t nodo_direccion;
    double latitud;
    double longitud;
    double velocidad;
};
payload_t datos_nodos;
payload_t datos_nodos_trama[2];
payload_t datos_nodos_recibidos[cant_nodos];
```

```

//Banderas
bool b = false;
int indice_a_enviar = cant_nodos;
uint16_t dir_nodo_secundaria = 0;

const uint8_t IRQ_NRF24 = 2;
volatile uint8_t num_mensajes = 0;

void setup(void) {
    /*Set up NRF24L01 y capa de red*/
    Serial.begin(115200);
    if (!radio.begin()) {
        while (1) {

        }
    }

    radio.setChannel(90);
    radio.setDataRate(1);

    network.begin(dir_nodo_fijo);

    radio.maskIRQ(1,1,0);
    pinMode(IRQ_NRF24, INPUT_PULLUP);

    datos_nodos_trama[0].nodo_direccion = dir_nodo_fijo;
    datos_nodos_trama[0].latitud = nodo_fijo_latitud;
    datos_nodos_trama[0].longitud = nodo_fijo_longitud;
    datos_nodos_trama[0].velocidad = 0;
}

void loop(void) {
    /*Implementación del modo de bajo consumo 0.36mA*/

    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(IRQ_NRF24), ISR_mensaje_recibido, FALLING);
    LowPower.powerDown(SLEEP_FOREVER, ADC_OFF, BOD_ON);
    detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(IRQ_NRF24));

    Serial.print("ModoSleep OFF, mensaje recibido ");
    Serial.println(num_mensajes);

    network.update();

    while (network.available())
    {
        network.update();
        RF24NetworkHeader header;
        network.read(header, &datos_nodos, sizeof(datos_nodos));

        uint16_t direccion_nodo_identificada = identificar_nodo(datos_nodos.nodo_direccion);

        if(!(direccion_nodo_identificada == 0)){

```

```

    guarda_datos_nodos(direccion_nodo_identificada);
    cant_mensajes++;
    if(cant_mensajes > cant_nodos){
        cant_mensajes = 0;
        reinicia_datos();
    }
}

if(cant_mensajes > 0){

    for(int i = 0; i < cant_nodos; i++){
        velocidades_ordenadas[i] = {datos_nodos_recibidos[i].velocidad};
    }

    copia_arreglo(velocidades_ordenadas);

    quicksort(velocidades_ordenadas, 0, cant_nodos-1);

    int iterador = 1;
    bool bandera = false;
    while(bandera == false && iterador <= cant_nodos){

        double vel_mayor = velocidades_ordenadas[cant_nodos-iterador];

        int indice_encontrado = busca_indice(vel_mayor, copia_velocidades);

        if(datos_nodos_recibidos[indice_encontrado].nodo_direccion % 2 == 0){
            bandera = true;
            indice_a_enviar = indice_encontrado;

            dir_nodo_secundaria = datos_nodos_recibidos[indice_encontrado].nodo_direccion;
        }
        else{
            iterador++;
            dir_nodo_secundaria = 0;
        }
    }
    if(!(dir_nodo_secundaria == 0)){
        datos_nodos_trama[1]={datos_nodos_recibidos[indice_a_enviar].nodo_direccion,
            datos_nodos_recibidos[indice_a_enviar].latitud,
            datos_nodos_recibidos[indice_a_enviar].longitud,
            datos_nodos_recibidos[indice_a_enviar].velocidad};
    }
    else{
        datos_nodos_trama[1]={0,
            0,
            0,
            0};
        network.update();
    }
}

```

```

        datos_nodos_trama[0].velocidad = cuenta_nodos();

        network.update();
        header = dir_nodo_fijo;
        bool ok = network.multicast(header, &datos_nodos_trama, sizeof(datos_nodos_trama),1);
        Serial.println(datos_nodos_trama[1].velocidad,2);
    }
}
network.update();
}

/*Funciones*/

void quicksort(double arreglo[], int indice_bajo, int indice_alto){

    if(indice_bajo >= indice_alto){
        return;
    }

    double pivote = arreglo[indice_alto];

    int puntero_izquierda = indice_bajo;
    int puntero_derecha = indice_alto;

    while(puntero_izquierda < puntero_derecha){

        while(arreglo[puntero_izquierda] <= pivote && puntero_izquierda < puntero_derecha){
            puntero_izquierda++;
        }

        while(arreglo[puntero_derecha] >= pivote && puntero_izquierda < puntero_derecha){
            puntero_derecha--;
        }

        intercambia(arreglo, puntero_izquierda, puntero_derecha);

    }

    intercambia(arreglo, puntero_izquierda, indice_alto);

    quicksort(arreglo, indice_bajo, puntero_izquierda-1);
    quicksort(arreglo, puntero_izquierda+1, indice_alto);
}

void intercambia(double arreglo[] ,int indice1,int indice2){
    double temporal = arreglo[indice1];
    arreglo[indice1] = {arreglo[indice2]};
    arreglo[indice2] = {temporal};
}

void copia_arreglo(double arreglo[]){
    for(int i = 0; i < cant_nodos; i++){
        copia_velocidades[i] = {arreglo[i]};
    }
}

```

```

int busca_indice(double num_buscar, double arreglo_con_indices_ok[]){
    int i = 0;
    for(i; i < cant_nodos; i++){
        if(num_buscar == arreglo_con_indices_ok[i])
            break;
    }
    return i;
}

uint16_t identificar_nodo(uint16_t direccion_recibida){
    uint16_t direccion_identificada;
    switch (direccion_recibida){
        case 1:
            direccion_identificada = 01;
            break;

        case 2:
            direccion_identificada = 02;
            break;

        case 3:
            direccion_identificada = 03;
            break;

        case 4:
            direccion_identificada = 04;
            break;

        case 5:
            direccion_identificada = 05;
            break;

        default:
            direccion_identificada = 0;
    }
    return direccion_identificada;
}

void guarda_datos_nodos(uint16_t direccion_nodo){
    datos_nodos_recibidos[direccion_nodo-1]={datos_nodos.nodo_direccion,
                                             datos_nodos.latitud,
                                             datos_nodos.longitud,
                                             datos_nodos.velocidad};
}

void reinicia_datos(){
    for (int i=0; i < cant_nodos; i++){
        datos_nodos_recibidos[i].nodo_direccion = 0;
        datos_nodos_recibidos[i].latitud = 0;
        datos_nodos_recibidos[i].longitud = 0;
        datos_nodos_recibidos[i].velocidad = 0;
    }
    network.update();
}

```

```

uint8_t cuenta_nodos(){
  uint8_t nodos_en_interseccion = 0;
  for(int i = 0; i < cant_nodos; i++){

    if(datos_nodos_recibidos[i].nodo_direccion != 0)
      nodos_en_interseccion++;
  }
  return nodos_en_interseccion;
}

void ISR_mensaje_recibido(){
  num_mensajes++;
}

```

ANEXO B: Código del nodo móvil

```

/**                               Nodo móvil
Creado: Sábado diciembre 25 2021
Procesador: ATmega328p
Compilador: Arduino
Modificado: Fecha 12-Febrero-2022 Hora: 15H:52
Objetivos:

/*Librerias*/

#include <SPI.h>
#include <RF24.h>
#include <RF24Network.h>
#include <Wire.h>
#include <LCD.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <TinyGPSPlus.h>
#include <SoftwareSerial.h>

/*Variables globales*/

static const int RXPin = 4, TXPin = 3;
static const uint32_t GPSBaud = 9600;

double distanciaAlNodoFijo = 100 ;
bool GPS_ok = false, NRF24_ok = false;
const uint8_t cant_nodos = 3;

double d_detencion_movil_new = 100;
double d_detencion_movil_1 = 0;

static const double tiempo_reaccion = 2.5;
static const double constante_frenado = 13.132;

double d_al_nodo_fijo_new = 100;
double velocidad_nodo_new = 0;

```

```

bool vel_muy_alta = false, vel_alta = false;
uint32_t bytes_recibidos = 0;
const uint8_t buzzer = 5;

/*Configuraciones de direcciones de red*/
const uint16_t dir_nodo_movil = 02;
const uint16_t dir_nodo_fijo = 00;

/*Struct para las tramas recibidas y enviadas*/

struct payload_t {
    uint16_t nodo_direccion;
    double latitud;
    double longitud;
    double velocidad;
};
payload_t datosGPS;
payload_t datos_nodos_trama[2];

/*Nuevas instancias, constructores*/

RF24 radio(8, 10);
RF24Network network(radio);

LiquidCrystal_I2C lcd (0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7);

TinyGPSPlus gps;
SoftwareSerial ss(RXPin, TXPin);

void setup(void) {
    Serial.begin(115200);

    if (!radio.begin()) {
        while (1) {
        }
    }
    radio.setChannel(90);
    radio.setDataRate(1);

    network.begin(dir_nodo_movil);

    lcd.setBacklightPin(3, POSITIVE);
    lcd.setBacklight(HIGH);
    lcd.begin(20, 4);
    lcd.clear();

    ss.begin(GPSBaud);
    datosGPS.nodo_direccion = dir_nodo_movil;

    pinMode(buzzer, OUTPUT);
}

void loop() {
    while (ss.available() > 0)
        gps.encode(ss.read());
}

```

```

/*Adquisición de datos del GPS*/
GPS_ok = adquirir_datos_GPS();

/*Proceso para envío de datos del GPS*/
smartdelay(130);
network.update();
if (GPS_ok) {
    RF24NetworkHeader header(dir_nodo_fijo);
    NRF24_ok = network.write(header, &datosGPS, sizeof(datosGPS));
    network.update();
}
else {
    GPS_ok = false;
    displayNoSignal();
}

/*Proceso de recepción de datos del nodo fijo*/

network.update();

while (network.available())
{
    RF24NetworkHeader header;
    network.update();
    bytes_recibidos = network.read(header, &datos_nodos_trama, sizeof(datos_nodos_trama));
}

/*Proceso para determinar la alerta*/

if (GPS_ok && bytes_recibidos > 0)
{
    /*Determinar alerta del nodo que se conduce*/
    d_detencion_movil_1 = calculo_distancia_detencion(datosGPS.velocidad);
    if (!(datos_nodos_trama[0].latitud == 0) && !(datos_nodos_trama[0].longitud == 0)) {
        calculo_distancia_al_nodo_fijo();
    }
    displayInfo();
    if (datosGPS.nodo_direccion % 2 == 0) {

        if (datos_nodos_trama[0].velocidad > 0) {

            lcd.setCursor(-12, 3);
            lcd.print(F("PRECAUCION HAY "));
            lcd.print(datos_nodos_trama[0].velocidad, 0);
            lcd.setCursor(4, 3);
            lcd.print(F("NODOS CERCANOS.."));
        }

        if (d_detencion_movil_1 > distanciaAlNodoFijo) {
            Serial.println("Se determina la alerta");
            while (d_detencion_movil_1 > distanciaAlNodoFijo && datosGPS.velocidad > 1) {

                lcd.setCursor(0, 0);
                lcd.print(F("PELIGRO -FRENAR-"));
                lcd.setCursor(-4, 2);
                lcd.print(F(" INSUFICIENTE "));
                lcd.setCursor(-12, 3);
                lcd.print(F(" ESPACIO DE "));
            }
        }
    }
}

```

```

lcd.setCursor(4, 3);
lcd.print(F("DETENCION T="));
digitalWrite(buzzer, HIGH);

smartdelay(250);
while (ss.available() > 0)
gps.encode(ss.read());

if (gps.location.isValid() && gps.speed.isValid()){

  datosGPS.latitud = gps.location.lat();
  datosGPS.longitud = gps.location.lng();
  datosGPS.velocidad = gps.speed.mps();
}

d_detencion_movil_1 = ((pow(datosGPS.velocidad, 2)/constante_frenado) + tiempo_reaccion * datosGPS.velocidad);

distanciaAlNodoFijo = TinyGPSPlus::distanceBetween(datosGPS.latitud,
  datosGPS.longitud,
  datos_nodos_trama[0].latitud,
  datos_nodos_trama[0].longitud);

  double tiempo_llegada = distanciaAlNodoFijo / datosGPS.velocidad;
  lcd.print(tiempo_llegada, 0);
  lcd.print(F("s"));

  RF24NetworkHeader header(dir_nodo_fijo);
  network.write(header, &datosGPS, sizeof(datosGPS));
  network.update();
}
digitalWrite(buzzer, LOW);
}
else{
  Serial.println("FRENADO OK");
}

alerta_velocidad(datosGPS.velocidad);

if (vel_muy_alta == true) {

  lcd.setCursor(-12, 3);
  lcd.print(F("ALERTIA"));
  lcd.setCursor(4, 3);
  lcd.println(F("VEL MUY ALTA"));
  vel_muy_alta = false;
}
else if (vel_alta == true) {

  lcd.setCursor(-12, 3);
  lcd.print(F("ALERTIA"));
  lcd.setCursor(4, 3);
  lcd.println(F("VEL ALTA-"));
  vel_alta = false;
}
}

```

```

else {

    if (!(datos_nodos_trama[1].nodo_direccion == dir_nodo_movil) && !(datos_nodos_trama[1].nodo_direccion == 0)) {
        lcd.setCursor(-12, 3);
        lcd.print(F("DATOS DEL NODO "));
        lcd.print(datos_nodos_trama[1].nodo_direccion);

        lcd.setCursor(4, 3);
        lcd.print(F("VEL="));
        lcd.print(datos_nodos_trama[1].velocidad, 1);
        lcd.print(F("  D="));
        lcd.print(d_al_nodo_fijo_new, 2);
    }
    else if (datos_nodos_trama[0].velocidad == 1) {
        lcd.setCursor(-12, 3); //Tercera linea
        lcd.print(F("NO EXISTEN NODOS"));
        lcd.setCursor(4, 3); //Cuarta linea
        lcd.print(F("----PROXIMOS----"));
    }
}

/*Paso a comprobar si el nodo que se comunicó tiene espacio de frenado*/

if (!(datos_nodos_trama[1].nodo_direccion == dir_nodo_movil) && !(datos_nodos_trama[1].nodo_direccion == 0)) {

    if (!(datos_nodos_trama[0].latitud == 0 && datos_nodos_trama[0].longitud == 0)) {
        d_al_nodo_fijo_new = TinyGPSPlus::distanceBetween(datos_nodos_trama[1].latitud,
            datos_nodos_trama[1].longitud,
            datos_nodos_trama[0].latitud,
            datos_nodos_trama[0].longitud);
    }
    d_detencion_movil_new = calculo_distancia_detencion(datos_nodos_trama[1].velocidad);

    if (d_detencion_movil_new > d_al_nodo_fijo_new) {

        while (d_detencion_movil_new > d_al_nodo_fijo_new && datos_nodos_trama[1].velocidad > 1) {

            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print(F("PELIGRO -FRENAR-"));

            lcd.setCursor(-4, 2);
            lcd.print(F("----NODO "));
            lcd.print(datos_nodos_trama[1].nodo_direccion);
            lcd.print(F("----"));

            lcd.setCursor(-12, 3);
            lcd.print(F("NO TIENE ESPACIO"));

            lcd.setCursor(4, 3);
            lcd.print(F(" PARA DETENERSE"));

            digitalWrite(buzzer, HIGH);

            network.update();
            RF24NetworkHeader header;
            network.read(header, &datos_nodos_trama, sizeof(datos_nodos_trama));

            if (!(datos_nodos_trama[0].latitud == 0 && datos_nodos_trama[0].longitud == 0)) {
                d_al_nodo_fijo_new = TinyGPSPlus::distanceBetween(datos_nodos_trama[1].latitud,
                    datos_nodos_trama[1].longitud,
                    datos_nodos_trama[0].latitud,
                    datos_nodos_trama[0].longitud);
            }
        }
    }
}

```



```

    }
    else if (vel_alta == true) {
        lcd.setCursor(4, 3);
        lcd.println(F("--VELOCIDAD ALTA--"));
        vel_alta = false;
    }
    else {
        lcd.setCursor(4, 3);
        lcd.println(F("--VELOCIDAD OK--"));
    }
}
else if (GPS_ok == false) {

    displayNoSignal();
}
network.update();
while (ss.available() > 0)
    gps.encode(ss.read());
}

/*Funciones*/

static void smartdelay(unsigned long ms)
{
    unsigned long start = millis();
    do
    {
        while (ss.available())
            gps.encode(ss.read());
    } while (millis() - start < ms);
}

void displayInfo() {
    //En el LCD
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(F("m/s MIS DATOS  m"));

    lcd.setCursor(-4, 2);
    lcd.print(F("VEL="));
    lcd.print(datosGPS.velocidad, 1);
    lcd.print(F("  D="));
    lcd.print(distanciaAlNodoFijo, 2);
}

void displayNoSignal() {
    //En el LCD
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(F("ESPERANDO....."));
    lcd.setCursor(-4, 2);
    lcd.print(F("SATELITES GPS..."));
    lcd.setCursor(-12, 3);
    lcd.print(F("LAT=X.X"));
    lcd.print(F("  LNG=X.X"));
}

```

```

    lcd.setCursor(4, 3);
    lcd.print(F("VEL=X.X"));
    lcd.print(F(" SATS=XX"));

    GPS_ok = false;
}

void calculo_distancia_al_nodo_fijo() {

    distanciaAlNodoFijo = TinyGPSPlus::distanceBetween(datosGPS.latitud,
        datosGPS.longitud,
        datos_nodos_trama[0].latitud,
        datos_nodos_trama[0].longitud);

    network.update();
    GPS_ok = false;
    NRF24_ok = false;
    bytes_recibidos = 0;
}

double calculo_distancia_detencion (double velocidad) {
    double d_detencion_metros = ((pow(velocidad, 2))/constante_frenado) + tiempo_reaccion * velocidad;
    return d_detencion_metros;
}

void alerta_velocidad(double velocidad) {

    if (velocidad > 16.6667)
    {
        vel_muy_alta = true;
    }
    else if (velocidad > 13.8889 && velocidad < 16.6667)
    {
        vel_alta = true;
    }
}

bool adquirir_datos_GPS() {

    bool ok = false;
    while (ss.available() > 0)
        gps.encode(ss.read());

    if (gps.location.isValid() && gps.speed.isValid() )
    {
        datosGPS.latitud = gps.location.lat();
        datosGPS.longitud = gps.location.lng();
        datosGPS.velocidad = gps.speed.mps();
        ok = true;
    }
    else

```

```

{
  datosGPS.latitud = 0;
  datosGPS.longitud = 0;
  datosGPS.velocidad = 0;
  ok = false;
}
return ok;
}

```

ANEXO C: Hoja de datos módulo NEO 7M


NEO-7 - Data Sheet

1 Functional description

1.1 Overview

The NEO-7 series of standalone GNSS modules benefit from the exceptional performance of the u-blox 7 GNSS (GPS, GLONASS, QZSS and SBAS) engine. The NEO-7 series delivers high sensitivity and minimal acquisition times in the industry-proven NEO form factor.

The NEO-7 series provides maximum sensitivity while maintaining low system power. The NEO-7M is optimized for cost sensitive applications, while NEO-7N provides best performance and easy RF integration. The NEO form factor allows easy migration from previous NEO generations. Sophisticated RF-architecture and interference suppression ensure maximum performance even in GNSS-hostile environments.

The NEO-7 series combines a high level of integration capability with flexible connectivity options in a miniature package. This makes it perfectly suited for industrial applications with strict size and cost requirements. The I²C compatible DDC interface provides connectivity and enables synergies with u-blox SARA, LEON and LISA cellular modules.

u-blox 7 modules use GNSS chips qualified according to AEC-Q100 and are manufactured in ISO/TS 16949 certified sites. Qualification tests are performed as stipulated in the ISO16750 standard: "Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment".

1.2 Product features

Model	Type	Supply	Interfaces	Features	Grade
	GPS / QZSS GLONASS Galileo BeiDou Timing Dead Reckoning Precise Point Positioning Raw Data	1.65 V – 3.6 V 2.7 V – 3.0 V Lowest power (DDC)	I ² C UART USB SPI DDC (iC compliant)	Programmable (Flash) Data logging Additional SAW Additional LNA RTC crystal Internal oscillator Active antenna / LNA, supply Active antenna / LNA, control Antenna short circuit detection / protection pin Antenna open circuit detection pin Frequency output	Standard Professional Automotive
NEO-7N	* *	* *	* * * *	* * * * * T O *	
NEO-7M	* *	* *	* * * *	* C O	

O = Optional, not activated per default or requires external components C = Crystal / T = TCXO

1.3 GNSS performance

1.3.1 GPS performance

Parameter	Specification		
Receiver type	56 Channels GPS L1C/A SBAS L1C/A QZSS L1C/A Galileo E1B/C ¹		
Time-To-First-Fix ²		NEO-7N	NEO-7M
	Cold Start	29 s	30 s
	Warm Start	28 s	28 s
	Hot Start	1 s	1 s
	Aided Starts ³	5 s	5 s
Sensitivity ⁴		NEO-7N	NEO-7M
	Tracking & Navigation	-162 dBm	-161 dBm
	Reacquisition	-160 dBm	-160 dBm
	Cold Start	-148 dBm	-147 dBm
	Warm Start	-148 dBm	-148 dBm
	Hot Start	-156 dBm	-155 dBm
Horizontal position accuracy ⁵	Autonomous	2.5 m	
	SBAS	2.0 m	
Accuracy of time pulse signal	RMS	30 ns	
	99%	60 ns	
Frequency of time pulse signal		0.25 Hz ... 10 MHz (configurable)	
Max navigation update rate		10 Hz	
Velocity accuracy ⁶		0.1 m/s	
Heading accuracy ⁶		0.5 degrees	
Operational limits ⁷	Dynamics	≤ 4 g	
	Altitude	50,000 m	
	Velocity	500 m/s	

Table 1: GPS performance

¹ Ready to support Galileo E1B/C when available (NEO-7N)

Single chip 2.4 GHz Transceiver nRF24L01

FEATURES

- True single chip GFSK transceiver
- Complete OSI Link Layer in hardware
- Enhanced ShockBurst™
- Auto ACK & retransmit
- Address and CRC computation
- On the air data rate 1 or 2Mbps
- Digital interface (SPI) speed 0-8 Mbps
- 125 RF channel operation
- Short switching time enable frequency hopping
- Fully RF compatible with nRF24XX
- 5V tolerant signal input pads
- 20-pin package (QFN20 4x4mm)
- Uses ultra low cost +/- 60 ppm crystal
- Uses low cost chip inductors and 2-layer PCB
- Power supply range: 1.9 to 3.6 V

APPLICATIONS

- Wireless mouse, keyboard, joystick
- Keyless entry
- Wireless data communication
- Alarm and security systems
- Home automation
- Surveillance
- Automotive
- Telemetry
- Intelligent sports equipment
- Industrial sensors
- Toys

GENERAL DESCRIPTION

nRF24L01 is a single chip radio transceiver for the world wide 2.4 - 2.5 GHz ISM band. The transceiver consists of a fully integrated frequency synthesizer, a power amplifier, a crystal oscillator, a demodulator, modulator and Enhanced ShockBurst™ protocol engine. Output power, frequency channels, and protocol setup are easily programmable through a SPI interface. Current consumption is very low, only 9.0mA at an output power of -6dBm and 12.3mA in RX mode. Built-in Power Down and Standby modes makes power saving easily realizable.

QUICK REFERENCE DATA

Parameter	Value	Unit
Minimum supply voltage	1.9	V
Maximum output power	0	dBm
Maximum data rate	2000	kbps
Supply current in TX mode @ 0dBm output power	11.3	mA
Supply current in RX mode @ 2000 kbps	12.3	mA
Temperature range	-40 to +85	°C
Sensitivity @ 1000 kbps	-85	dBm
Supply current in Power Down mode	900	nA

Table 1 nRF24L01 quick reference data



Type Number	Description	Version
nRF24L01	20 pin QFN 4x4, RoHS & SS-00259 compliant	D
nRF24L01 IC	Bare Die	D
nRF24L01-EVKIT	Evaluation kit (2 test PCB, 2 configuration PCB, SW)	1.0

Table 2 nRF24L01 ordering information

BLOCK DIAGRAM

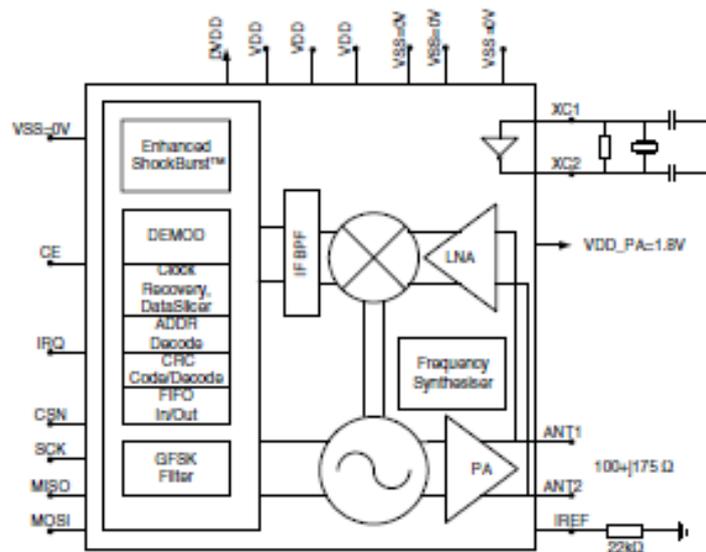


Figure 1 nRF24L01 with external components.



PIN FUNCTIONS

Pin	Name	Pin function	Description
1	CE	Digital Input	Chip Enable Activates RX or TX mode
2	CSN	Digital Input	SPI Chip Select
3	SCK	Digital Input	SPI Clock
4	MOSI	Digital Input	SPI Slave Data Input
5	MISO	Digital Output	SPI Slave Data Output, with tri-state option
6	IRQ	Digital Output	Maskable Interrupt pin
7	VDD	Power	Power Supply (+3V DC)
8	VSS	Power	Ground (0V)
9	XC2	Analog Output	Crystal Pin 2
10	XC1	Analog Input	Crystal Pin 1
11	VDD_PA	Power Output	Power Supply (+1.8V) to Power Amplifier
12	ANT1	RF	Antenna Interface 1
13	ANT2	RF	Antenna Interface 2
14	VSS	Power	Ground (0V)
15	VDD	Power	Power Supply (+3V DC)
16	IRREF	Analog Input	Reference current
17	VSS	Power	Ground (0V)
18	VDD	Power	Power Supply (+3V DC)
19	DVDD	Power Output	Positive Digital Supply output for de-coupling purposes
20	VSS	Power	Ground (0V)

Table 3 nRF24L01 pin function

PIN ASSIGNMENT

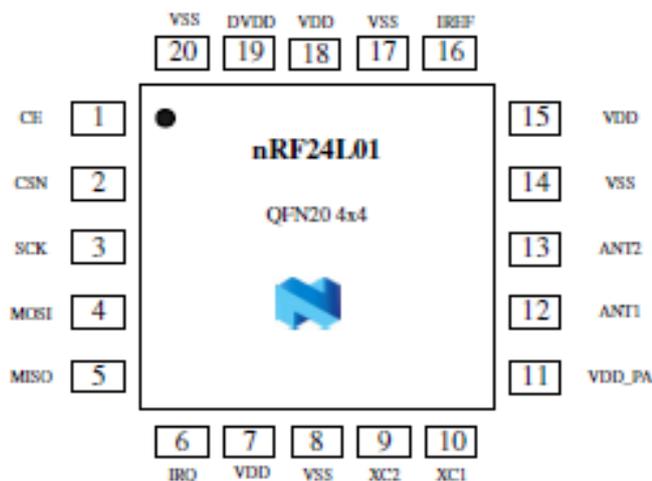


Figure 2 nRF24L01 pin assignment (top view) for a QFN20 4x4 package.

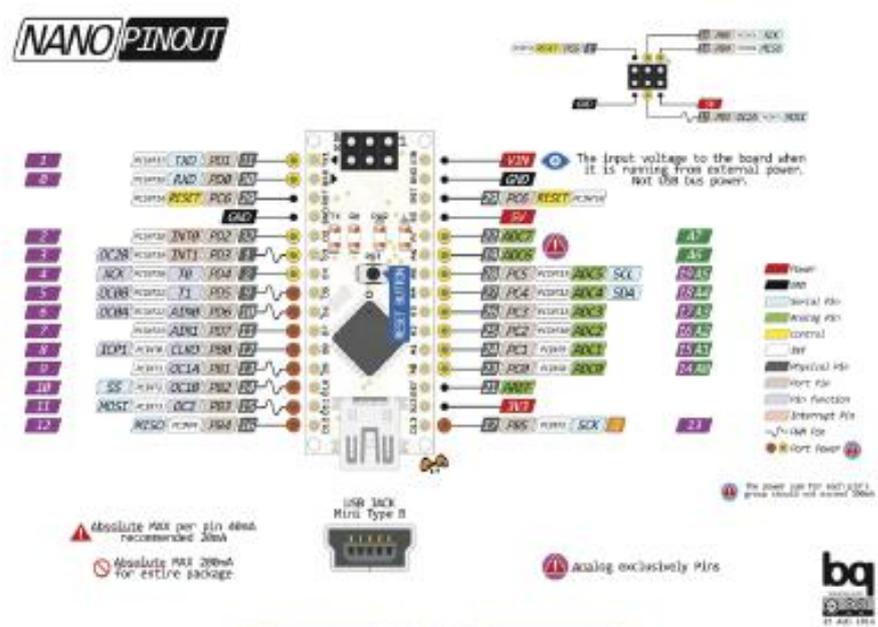
ANEXO E: Hoja de Datos Arduino Nano

LAMPIRAN

Datasheet Arduino Nano



NANO PINOUT



Arduino Nano Pin Configuration

Pin Category	Pin Name	Details
Power	Vin, 3.3V, 5V, GND	<p>Vin: Input voltage to Arduino when using an external power (2V).</p> <p>5V: Regulated power supply used to power microcontroller components on the board.</p> <p>3.3V: 3.3V supply generated by on-board voltage regulator. current draw is 50mA.</p> <p>GND: Ground pins.</p>

Reset	Reset	Resets the microcontroller.
Analog Pins	A0 – A7	Used to measure analog voltage in the range of 0-5V
Input/Output Pins	Digital Pins D0 - D13	Can be used as input or output pins. 0V (low) and 5V (high)
Serial	Rx, Tx	Used to receive and transmit TTL serial data.
External Interrupts	2, 3	To trigger an interrupt.
PWM	3, 5, 6, 9, 11	Provides 8-bit PWM output.
SPI	10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO) and 13 (SCK)	Used for SPI communication.
Inbuilt LED	13	To turn on the inbuilt LED.
IIC	A4 (SDA), A5 (SCA)	Used for TWI communication.
AREF	AREF	To provide reference voltage for input voltage.

Arduino Nano Technical Specifications

Microcontroller	ATmega328P – 8 bit AVR family microcontroller
Operating Voltage	5V
Recommended Input Voltage for Vin pin	7-12V
Analog Input Pins	6 (A0 – A5)
Digital I/O Pins	14 (Out of which 6 provide PWM output)
DC Current on I/O Pins	40 mA

DC Current on 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (2 KB is used for Bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frequency (Clock Speed)	16 MHz
Communication	IIC, SPI, USART



epoch

**Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje**

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 11 / 07 / 2022

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: EDGAR ADRIÁN GARCÍA LEMA CRISTIAN ARIEL CAISAGUANO MOREANO
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
Carrera: ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
Título a optar: INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
f. Analista de Biblioteca responsable: Lcdo. Holger Ramos, MSc.

1298-DBRAI-UPT-2022