



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

**PROTOTIPO DE SISTEMA DE NOTIFICACIÓN DE COLISIONES VEHICULARES
DE BAJO COSTO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LAS TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

Ing. Marco Brian Silva Vázquez

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Raúl Castillo Pérez



Ciudad de México

Noviembre 2019



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de siendo las horas del día del mes de del se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de:

para examinar la tesis titulada:

por el (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	SILVA	Apellido Materno:	VAZQUEZ	Nombre (s):	MARCO BRIAN
-------------------	-------	-------------------	---------	-------------	-------------

Número de registro:

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

Después de la lectura y revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **NO APROBAR** la tesis, en virtud de los motivos siguientes:

- 1.- Presentó la síntesis de resultados en tiempo y forma.
- 2.- El manuscrito sólo necesita de correcciones menores.
- 3.- Respondió adecuadamente a las preguntas.
- 4.- Se cumplieron los objetivos del proyecto de tesis.

Comisión Revisora de Tesis

DR. RAÚL CASTILLO PÉREZ
12922-EE-17 y COLEGIADO

DR. LUIS MANUEL RODRÍGUEZ MÉNDEZ
14046-EE-19 Y COLEGIADO

DR. ELOY RAMÍREZ GARCÍA
14279-EC-19 y COLEGIADO

DR. HÉCTOR OVIEDO GALDEANO
14261-EG-19 Y ASIGNATURA

M. EN C. MIGUEL SANCHEZ MERAZ
13397-EH-18 y COLEGIADO

Presidente del Colegio de Profesores

DR. JOSÉ MARTINEZ TRINIDAD
I. P. N.
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 4 del mes de Diciembre del año 2019, el (la) que suscribe Marco Brian Silva Vazquez alumno (a) del Programa de Maestría en ciencias en ingeniería de telecomunicaciones con número de registro B171177, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Raúl Castillo Pérez y cede los derechos del trabajo intitulado "Prototipo de sistema de notificación de colisiones vehiculares de bajo costo", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección marcosilvavazquez56@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


Marco Brian Silva Vazquez

Nombre y firma

RESUMEN

Las tecnologías en telecomunicaciones en la actualidad ofrecen más servicios que el solo intercambio de información de un punto a otro o una simple llamada. Ahora pueden ser utilizadas, por ejemplo, para crear redes de sensores y monitorearlos desde cualquier punto, en cualquier momento, entre muchas cosas más. En el presente trabajo se mostrará el prototipo de un sistema de mensajes de alerta dirigido a servicios de emergencia y a familiares del usuario en caso de que ocurra un accidente vehicular en donde podría haber heridos.

El prototipo está constituido por un módulo microcontrolador Arduino Uno, un acelerómetro de seis ejes y un módulo cuadribanda-GPS. El sistema podrá detectar un accidente y su gravedad, y enviará un mensaje de alerta con la ubicación donde ocurrió el siniestro, su gravedad y datos del vehículo. El prototipo propuesto es de proporciones lo suficientemente pequeñas como para no tener que hacer modificación alguna a la estructura original del automóvil y de esta manera no intervenir con las condiciones de garantía de autos de modelos recientes que no cuenten con este tipo de sistema, pero lo deseen, además de poder ser implementado en cualquier automóvil sin importar modelo o año.

Cabe aclarar que el prototipo propuesto en este trabajo no es un sistema que prevenga los accidentes. Su función es alertar a los familiares o conocidos y principalmente a los sistemas de emergencia para una rápida acción una vez que el evento ha ocurrido, ya que la mayoría de las muertes ocurren en el transcurso de una hora desde el momento del accidente, usualmente mientras se aguarda a la llegada de los equipos de emergencia. Ésta llamada “hora de oro” juega momentos cruciales para salvar una vida [1].

ABSTRACT

Nowadays the telecommunication technologies offer more than just to exchange information between different points or to make a call. Now, the industry is able to make sensor networks and monitoring them from any anywhere in anytime. In this thesis work, we will show a warn-message prototype system directed to emergency services and the user's relatives in the case that a car crash occurs.

The prototype consists of an Arduino Uno microcontroller module that it will send a warning message that contains the accident address helped by a MPU-6050 sensor and a SIM-808 module. The prototype proposed it is small enough not to make any modifications to the original structure of the vehicle and of this way not intervene with vehicle guarantee beside all before mentioned, it is able to be installed in any vehicle it does not matter the brand or model.

The prototype proposed in this thesis work does not prevent car crash accidents, but its function is to warn to emergency rescue services for a quick action after the car crash occurred. Most deaths occur in the period between after the accident and until the arrival of emergency equipment. The golden hour is as they call it and that hour it is crucial to saving a life.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, Susana Vazquez: Gracias por apoyarme en cada segundo de mi trayecto profesional y personal, eres la piedra angular de todo o que hago. Gracias por todos esos sacrificios que has hecho y espero te sientas tan orgullosa de mí, como yo lo estoy de ti.

A mi padre, Enrique Rea: Gracias por haberme enseñado a ser disciplinado, ordenado y siempre sincero. Este logro te pertenece también a ti. Sin tu apoyo jamás lo hubiera logrado, gracias por tu dedicación a verme bien y triunfando.

A mi hermano, Iván Silva: Gracias por tu ejemplo al demostrarme que nunca es tarde para reivindicar el camino y demostrar que uno siempre es capaz de demostrarle los demás que están equivocados.

A mis tios, Ana Vazquez y Genaro Picazo: Gracias por tratarme como un hijo siempre y por estar a mi lado en tiempos difíciles, no hay palabras para describir lo agradecido que estoy con ustedes.

A mis primos, Edgar y Oswaldo Picazo: Gracias hermanos, su apoyo es uno de los motores que contribuyeron a este logro, espero ser un ejemplo adecuado al cual puedan seguir.

A Paula D. Concha Gómez: Gracias por estar conmigo a cada comento de este camino, tu fuiste mi ejemplo para hacer esto. Gracias por apoyarme en mis mejores y peores momentos, eres la mejor compañera de vida.

A mi asesor, Doctor Raúl Castillo: Gracias por tener fe en mí cuando nadie creyó que mi idea tuviera sentido o fuera buena, a pesar de eso, demostramos lo contrario. Gracias por el apoyo como asesor y como persona, este es un logro de ambos.

A mi asesora durante la estancia de investigación, Doctora Octavia Dobre: Gracias por su amabilidad y por darme la oportunidad de vivir la experiencia de trabajar con usted y por el soporte que me ha dado para llevar este trabajo tan lejos.

A mis amigos Juan Carlón, Said Torres, Raúl Ramirez, Brian Ramirez, Oscar Porras: Gracias por estar ahí para mi cuando tenía que hablar con alguien o necesitaba algún consejo. Los amigos son la familia que uno escoge y estoy seguro de haber escogido bien.

Al Instituto Politécnico Nacional: Gracias por darme una profesión que amo y me apasiona, gracias por cambiar mi forma de percibir la vida, gracias por darme a la mujer de mis sueños y a mis mejores amigos, gracias por darme la oportunidad de conocer gente increíble dentro de tus instalaciones y finalmente gracias por darme la etapa más hermosa de mi vida, espero haber sido un digno representante de mi institución y mi México durante la estancia de investigación y seguiré trabajando en poner “La tecnica al servicio de la patria”.

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
GLOSARIO	xiii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	2
1.2 Problemas a resolver	3
1.3. Justificación	3
1.4 Alcance	3
1.5 Hipótesis.....	4
1.6 Objetivos	4
1.7 Metodología	4
CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE	7
2.1 SOSmart.....	7
2.2 OnStar SOS.	7
2.3 Redes VANET (Vehicular Ad Hoc Network)	8
2.4 Smart Cities	10
2.5 Trabajos de investigación relevantes.....	11
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO.....	14
3.1 Unidad de medición inercial.....	14
3.2 Acelerómetro	15

3.3 Giroscopio	16
3.4 Microcontroladores, Sensores y Shields	17
3.4.1 Arduino UNO	17
3.4.2 Sensor MPU-6050.....	18
3.4.3 SIM808	19
3.5 GPS	20
3.5.1 Elementos que conforman el sistema GPS	21
3.5.2 Funcionamiento	22
3.6 GSM	23
3.6.1 GPRS	24
3.6.2 Arquitectura GSM.....	24
3.6.3 Funcionamiento	27
CAPÍTULO IV. PRUEBAS, EVALUACIÓN Y RESULTADOS.....	30
4.1 Seguridad Vehicular	30
4.1.1 Seguridad activa	30
4.1.2 Seguridad pasiva	31
4.2 Organizaciones encargadas de la prevención y mejora continua de los sistemas de seguridad vehicular.....	31
4.3 Pruebas realizadas en la industria.....	32
4.4 Pruebas de dispositivos.....	34
4.4.1 Funcionamiento Arduino UNO.....	35
4.4.2 Funcionamiento MPU-6050	38
4.4.3 Funcionamiento SIM808	50
4.5 Efectos lasivos al cuerpo humano durante un accidente vehicular.....	58
4.5.1 Pruebas ejecutadas para la simulación.....	59
4.6 Arquitectura y funcionamiento de la propuesta.....	61

4.6.1 Arquitectura lógica del funcionamiento del prototipo	61
4.6.2 Arquitectura física del funcionamiento del sistema propuesto.....	64
4.7 Simulación y pruebas del dispositivo	65
4.7.1 Simulación y pruebas choque frontal.....	66
4.7.2 Simulación y pruebas choque lateral	73
4.7.3 Simulación y pruebas de casos especiales	74
CONCLUSIONES	81
TRABAJO A FUTURO	84
ANEXO 1	85
ANEXO 2	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Situación de propagación de alerta operando en una red VANET.

Figura 2. Componentes de una Smart City [13].

Figura 3. Arquitectura propuesta por e-NOTIFY [1].

Figura 4. Composición interna de uno de los ejes de un IMU.

Figura 5. Representación física de un microcontrolador Arduino UNO.

Figura 6. Ejes correspondientes al acelerómetro y giroscopio.

Figura 7. Representación física del sensor MPU-6050.

Figura 8. Representación gráfica del shield SIM808.

Figura 9. Elementos de la arquitectura GPS.

Figura 10. Superposición de esferas virtuales generadas por distintos satélites [29].

Figura 11. Elementos de la arquitectura GSM.

Figura 12. Prueba frontal estandarizada por NCAP [43].

Figura 13. Prueba lateral estandarizada por NCAP [43].

Figura 14. Prueba Impacto lateral contra mástil estandarizada por NCAP [43].

Figura 15. Circuito Blink [44].

Figura 16. Conexión Arduino UNO mediante USB.

Figura 17. Indicador de éxito en la compilación del código del IDE Arduino.

Figura 18. Indicador de error en código del IDE Arduino.

Figura 19. Cronometraje del reloj interno del Arduino con el circuito Blink.

Figura 20. Circuito Blink con alimentación externa.

Figura 21. Conexión del Arduino UNO con el sensor MPU-6050.

Figura 22. Lecturas del código MPU6050_lecturas

Figura 23. Posición normal del sensor MPU6050.

Figura 24. Posición del sensor MPU 6050 para medir la aceleración en el eje X.

Figura 25. Lecturas del acelerómetro correspondiente a la posición de la Figura 24.

Figura 26. Posición del sensor MPU 6050 para medir la aceleración en el eje y.

Figura 27. Lecturas del acelerómetro correspondiente a la posición de la Figura 26.

Figura 28. Prueba de rotación del sensor MPU-6050 para el yaw.

Figura 29. Lectura con el sensor rotado a 90° para la prueba del ángulo yaw.

Figura 30. Lectura con el sensor rotado a 180° para la prueba del ángulo yaw.

Figura 31. Lectura con el sensor rotado a 540° para la prueba del ángulo yaw.

Figura 32. Prueba de rotación del sensor MPU-6050 para el pitch.

Figura 33. Lectura con el sensor rotado a 45° para la prueba del ángulo pitch.

Figura 34. Lectura con el sensor rotado a 90° para la prueba del ángulo pitch.

Figura 35. Prueba de rotación del sensor MPU-6050 para el roll.

Figura 36. Lectura con el sensor rotado a 45° para la prueba del ángulo roll.

Figura 37. Lectura con el sensor rotado a 90° para la prueba del ángulo roll.

Figura 38. Lecturas correspondientes a la temperatura ambiente con el MPU-6050.

Figura 39. Prueba del sensor de temperatura con fuente de calor externa.

Figura 40. Lecturas correspondientes a la prueba de la Figura 39.

Figura 41. Lecturas correspondientes al enfriamiento del sensor MPU-6050.

Figura 42. Antenas del módulo SIM808.

Figura 43. Instalación del módulo SIM808 sobre el Arduino

Figura 44. Instalación de tarjeta SIM en módulo SIM808.

Figura 45. Módulo SIM808, operando con batería externa.

Figura 46. Coordenadas obtenidas por el módulo SIM808.

Figura 47. Visualización de las coordenadas obtenidas a través de Google Maps.

Figura 48. Respuesta obtenida del módulo SIM808 después de ejecutar la prueba de envío de un SMS.

Figura 49. Respuesta obtenida en el teléfono del receptor.

Figura 50. Alerta de memoria flash rebasada.

Figura 51. Memoria flash después de las modificaciones sugeridas por el fabricante.

Figura 52. Esquema de funcionamiento para el serial debugger.

Figura 53. Prueba para obtención de IP.

Figura 54. Conexión exitosa del prototipo a una página web.

Figura 55. Prueba de envío de mensaje TCP.

Figura 56. Lecturas correspondientes al automóvil en posición del primer criterio especial.

Figura 57. Lecturas correspondientes al automóvil en posición del segundo criterio especial.

Figura 58. Arquitectura básica de los componentes del prototipo.

Figura 59. Arquitectura física del comportamiento del sistema.

Figura 60. Ejes definidos para el prototipo.

Figura 61. (Δ aceleración) en impacto frontal.

Figura 62. Vista preliminar de la prueba de impacto frontal con el prototipo montado en un auto a escala.

Figura 63. Vehículo-prototipo el momento del impacto.

Figura 64. Resultados de la prueba de impacto frontal.

Figura 65. Análisis de la señal de la prueba de impacto frontal.

Figura 66. Mensaje recibido por el receptor después de la prueba de impacto frontal y comprobación de coordenadas.

Figura 67. Respuesta correspondiente a la segunda etapa de pruebas.

Figura 68. Respuesta gráfica correspondiente a la segunda etapa de pruebas.

Figura 69. Respuesta correspondiente a la tercera etapa de pruebas.

Figura 70. Respuesta gráfica correspondiente a la tercera etapa de pruebas.

Figura 71. Esquema de la prueba de impacto lateral.

Figura 72. Posición del vehículo-prototipo para la prueba de primer caso especial.

Figura 73. Lecturas correspondientes a las pruebas de primer caso especial.

Figura 74. Respuesta gráfica correspondiente a la prueba de caso especial 1.

Figura 75. Mensaje recibido por el receptor después de la prueba de impacto frontal y comprobación de coordenadas.

Figura 76. Posición del vehículo-prototipo para la prueba de segundo caso especial.

Figura 77. Lecturas correspondientes a las pruebas de segundo caso especial.

Figura 78. Respuesta gráfica correspondiente a la prueba de caso especial 2.

Figura 79. Cobertura de AT&T en la CDMX para LTE.

Figura 80. Cobertura de AT&T en la CDMX para UMTS.

Figura 81. Cobertura de AT&T en Jalisco para LTE.

Figura 82. Cobertura de AT&T en Jalisco para UMTS.

Figura 83. Cobertura de AT&T en Nuevo León para LTE.

Figura 84. Cobertura de AT&T en Nuevo León para UMTS.

Figura 85. Cobertura de AT&T en Estado de México para LTE.

Figura 86. Cobertura de AT&T en Estado de México para UMTS.

Figura 87. Cobertura de AT&T en Oaxaca para LTE.

Figura 88. Cobertura de AT&T en Oaxaca para UMTS.

Figura 89. Cobertura de Telcel en la CDMX para LTE.

Figura 90. Cobertura de Telcel en la CDMX para UMTS datos.

Figura 91. Cobertura de Telcel en la CDMX para GSM.

Figura 92. Cobertura de Telcel en Jalisco para LTE.

Figura 93. Cobertura de Telcel en Jalisco para UMTS datos.

Figura 94. Cobertura de Telcel en Jalisco para GSM.

Figura 95. Cobertura de Telcel en Nuevo León para LTE.

Figura 96. Cobertura de Telcel en Nuevo León para UMTS datos.

Figura 97. Cobertura de Telcel en Nuevo León para GSM.

Figura 98. Cobertura de Telcel en Estado de México para LTE.

Figura 99. Cobertura de Telcel en Estado de México para UMTS datos.

Figura 100. Cobertura de Telcel en Estado de México para GSM.

Figura 101. Cobertura de Telcel en Oaxaca para LTE.

Figura 102. Cobertura de Telcel en Oaxaca para UMTS datos.

Figura 103. Cobertura de Telcel en Oaxaca para GSM.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Bandas de operación GSM de los principales operadores en México.

Tabla 2. Tabla de intensidad de impacto.

GLOSARIO

App: Corresponde a la abreviación en inglés para referirse a una aplicación móvil.

Backbone: La traducción del idioma inglés sería columna y este término en el argot de las telecomunicaciones se refiere a conexiones troncales de internet.

BS: Es la abreviación en inglés de Base Station o estaciones base.

Comandos AT: Comandos utilizados para que el microcontrolador Arduino pueda realizar acciones específicas desde la computadora al microcontrolador.

EM: Estación Móvil.

Fuerza G: Es una medida física de aceleración. Una unidad de fuerza G equivale a $9.8 \frac{m}{s^2}$.

GNSS: Es la abreviación en inglés de Global Navigation Satellite System o sistema global de navegación por satélite

GPRS: Es la abreviación en inglés General Packet Radio Service o servicio general de paquetes vía radio.

GPS: Es la abreviación en inglés de Global System for Mobile communications o sistema global de comunicaciones móviles

GSM: Es la abreviación en de Global Position System o sistema de posicionamiento global.

HTTP: Es la abreviación en inglés de Hypertext Transfer Protocol o protocolo de transferencia de hipertexto.

IDE: Es la abreviación en inglés de Integred Development Environment o entorno de desarrollo integrado.

IMU: Es la abreviación en inglés de Inertial Measurement Unit o unidad de medición inercial.

IoT: Es la abreviación en inglés de Internet of Things o internet de las cosas.

MMS: Es la abreviación en inglés de Multimedia Messaging System o sistema de mensajería multimedia.

MPU-6050: Es un sensor de seis grados de libertad, que combina un acelerómetro de 3 ejes, un giroscopio de 3 ejes y un sensor de temperatura.

MS: Es la abreviación en inglés de Mobile Station o estación móvil.

MSC: Es la abreviación en inglés de Mobile Switching Center o centro de conmutación móvil.

NCAP: Es la abreviación en inglés de New Car Assessment Programme o programa de evaluación de autos nuevos.

POP3: Es la abreviación en inglés de Post Office Protocol (versión 3) o Protocolo de Oficina de Correo. Este protocolo trabaja en la capa de aplicación del modelo OSI.

Protocolo I2C: Se refiere al protocolo inter integrated circuits y es el protocolo de comunicación serial que utiliza el microcontrolador para comunicarse con el sensor.

PTP: Es la abreviación en inglés de Peer to Peer o de igual a igual.

Shield: Se traduce directamente como *escudo* y en el argot de la electrónica, son placas de circuitos modulares que se montan una encima de otra para agregar funcionalidades extra al microcontrolador principal.

SIM: Es la abreviación en inglés de Subscriber Identity Module o módulo de identificación de abonado.

SIM808: Es un shield GSM/GPRS de cuatro bandas integrado y tecnología de navegación GPS.

Smart City: Se traduce como ciudad inteligente y se refiere al término utilizado para referirse a las ciudades que son tecnológicamente sustentables.

SMS: Es la abreviación en inglés de Short Message Service o servicio de mensajes cortos.

TCP/IP: Es la abreviación en inglés de Transfer Control Protocol/ Internet Protocol o protocolo de transmisión de información/ protocolo de internet.

TCP/UDP: Es la abreviación en inglés de Transfer Control Protocol/ User Datagram Protocol o protocolo de transmisión de información/ Protocolo de datagramas de usuario.

TI: Es la abreviación en inglés de Technology Information o tecnología de la información.

VANET: Es la abreviación en inglés de Vehicular Ad-Hoc Network o redes vehiculares.

WAP: Es la abreviación en inglés de Wireless Application Protocol o protocolo de aplicaciones inalámbricas.

DMP: Es la abreviación en inglés de Digital Motion Processor o procesador digital de movimiento.

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de la información (TI) y las telecomunicaciones han crecido a pasos agigantados en el último siglo partiendo del uso del telégrafo, pasando por los sistemas de telefonía fija y móvil hasta llegar al internet de las cosas. Esto puede verse reflejado en el consumo de internet a nivel mundial en donde en 2001 de 250 millones de usuarios se pasó a 3 000 millones de usuarios para el año 2015 según un estudio realizado por la ITU [2]. Este avance tecnológico ha alcanzado a otros sectores de la sociedad y ha comenzado a fusionarse con otras líneas de investigación para complementar y crear soluciones más prácticas, eficientes y cómodas. Algunos ejemplos de esta fusión son el caso de tecnologías como Smart care (TI aplicada para la prevención y preservación de la salud), Smart retail (TI aplicada al mundo del comercio), Smart home (automatización y monitoreo de los hogares), Smart cities (TI aplicada a las ciudades para hacer más cómoda la vida de los habitantes), entre otras.

De acuerdo con “Pike Research on Smart Cities” el mercado de las ciudades inteligentes está estimado en miles de millones de dólares para el 2020. El objetivo de las Smart cities es agilizar y mejorar diferentes tipos de servicios como el tránsito, los sistemas de recolección de basura, el transporte público y la asistencia de accidentes vehiculares a los habitantes de las ciudades [3].

Los accidentes vehiculares ocupan el lugar número diez en el listado de causas de muerte a nivel mundial según cifras de la OMS (Organización Mundial de la Salud) con alrededor de 1.3 millones de defunciones al año [4]. Los accidentes vehiculares no solo representan pérdidas humanas, sino que los gastos generados por este tipo de accidentes pueden llegar a representar hasta el 3% del PIB en algunos países [5].

Con el motivo de generar alternativas para perfeccionar los servicios de emergencia actuales, en este trabajo se plantea un prototipo basado en un microcontrolador para mejorar el tiempo de respuesta y precisión de los servicios de emergencia en caso de un siniestro, además de notificar a los familiares del usuario del servicio que éste ha sufrido un accidente.

1.2 Problemas a resolver

Los problemas a resolver en este trabajo son los siguientes:

1. Cambiar la forma actual de dar aviso a los servicios de emergencia, mediante un dispositivo que no depende de un operador humano para funcionar.
2. Cambiar la forma en que se notifique acerca de un accidente automovilístico en autopistas libres de peaje que no cuenten con sistema de monitoreo.
3. Respalda a los sistemas actuales de autopistas. Actualmente las autopistas de cuota cuentan con sistemas de monitoreo de video vigilancia para reportar siniestros. El problema viene cuando el percance se produce en un punto en el cual la cámara no tiene ni ángulo, ni rango de visión.
4. Mejorar el tiempo actual de respuesta de los servicios de emergencia, ya que el retraso actual depende en gran medida del factor humano. Esto se puede volver un problema cuando la "hora de oro" está de por medio.
5. Reducir a largo plazo la tasa de mortalidad causada por accidentes automovilísticos.

1.3. Justificación

Solo algunos modelos de automóviles a partir del 2017 cuentan con sistema de asistencia tripulada el cual puede ayudar a los usuarios de distintas maneras en caso de que se presente un percance. Lo anterior implica que solo en México existen más de 39 millones de automóviles (número de vehículos de motor registrados en circulación excepto motocicletas según INEGI hasta el año 2016 [6]) que no cuentan con ningún tipo de servicio que pueda ayudar a prestar auxilio e incluso salvar la vida de los tripulantes en caso de emergencias.

1.4 Alcance

El prototipo será capaz de procesar y filtrar las señales provenientes del acelerómetro, giroscopio y sensor de temperatura. De esta manera y con mediciones confiables, el prototipo enviará un mensaje con información personal del usuario y el vehículo y ubicación aproximada de dónde ocurrió el siniestro a algún número de un familiar predeterminado y un mensaje a un servidor web dedicado de manera casi paralela.

1.5 Hipótesis

El prototipo propuesto será capaz de ser instalado en cualquier vehículo y detectar accidentes automovilísticos, en donde el prototipo podrá detectar parámetros que le indican que un accidente podría haber ocurrido. El prototipo mandará un mensaje SMS y una trama HTTP que indicarán a los familiares del usuario y servicios de emergencia que ocurrió un accidente. El contenido del mensaje de alerta será información personal del usuario accidentado, datos básicos del accidente y coordenadas del accidente.

1.6 Objetivos

Objetivo General: Crear un prototipo que alerte de manera rápida y precisa a los familiares y servicios de emergencia correspondientes cuando un usuario sufra un accidente vehicular, ya sea por un choque o volcadura.

Objetivos Específicos:

- Obtener las señales provenientes de los sensores, acondicionarlas y verificar su confiabilidad.
- Realizar pruebas de señalización de telefonía móvil en México y Canadá.
- Realizar pruebas de funcionamiento con el GPS en México y Canadá.
- Generar la codificación necesaria para que el microcontrolador adquiera las señales, las procese e identifique un accidente, así como su severidad.
- Realizar pruebas de envío de información del accidente a través de un mensaje de texto a un teléfono celular y a un servidor web.
- Realizar una maqueta y simular pruebas a escala.

1.7 Metodología

La metodología establecida para este trabajo es experimental y analítica. Consta de una etapa de recolección de datos por medio de un sensor MPU-6050 ubicado en la sección central del automóvil. Posteriormente se extraen indicadores a partir de las señales adquiridas, se aplican métodos de procesamiento digital de señales para diferenciar las variaciones en los ejes del acelerómetro y giroscopio además de una lectura correspondiente a la temperatura. Una vez obtenida esta

información será procesada de manera constante por el microcontrolador Arduino UNO estando configurado para detectar anomalías en las lecturas del sensor. Si ocurren variaciones abruptas de magnitudes determinadas se interpretarán como un choque o volcadura y se enviará la información de dónde y quién sufrió el accidente a dos puntos de manera simultánea. Uno es un paquete de datos enviado a un servidor dedicado a accidentes automovilísticos y el otro es un mensaje SMS de emergencia enviado a un número celular predeterminado asignado previamente por el usuario.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE

En el siguiente estado del arte se presentan tanto sistemas que operan en la actualidad y tienen como objetivo común el mismo que se pretende alcanzar con el prototipo presentado en este trabajo, como los trabajos de investigación más apegados a lo que se propone en este proyecto.

2.1 SOSmart

El sistema SOSmart es una aplicación de celular que se encuentra disponible para los sistemas operativos Android e iOS. Esta aplicación utiliza el acelerómetro y el GPS del teléfono celular en el cual fue instalada y mediante un algoritmo basado en información de una base de datos de choques reales esta app es capaz de detectar posibles accidentes automovilísticos e informar a contactos preestablecidos sobre la ubicación aproximada del accidente.

El funcionamiento de la aplicación básicamente consiste en detectar variaciones abruptas en las lecturas del acelerómetro y, una vez que esto sucede, mediante el GPS manda la ubicación a contactos preestablecidos de emergencia con dos limitantes importantes. Por una parte los contactos deben contar con la aplicación instalada y servicio de internet, y por otro lado, las lecturas del acelerómetro serán tan confiables y variables como la calidad del dispositivo en el cual esté instalada la aplicación [7].

2.2 OnStar SOS

La tecnología OnStar ofrece un servicio de seguridad, monitoreo y protección vehicular. Entre sus principales características se encuentran la respuesta automática contra accidentes, asistencia por robo de vehículo, asesoría telefónica y asistencia técnica.

La manera en que opera la “respuesta automática contra accidentes” es utilizando los sensores del automóvil. Si los sensores del automóvil son activados por una colisión, un operador de OnStar se comunicará con el usuario y de no confirmar el choque, el asesor de OnStar se comunicará con los servicios de emergencia y familiares del usuario para informarles la ubicación aproximada en donde ocurrió el accidente ocupando el GPS del automóvil.

Es importante destacar que el sistema OnStar solo se encuentra disponible para las firmas Chevrolet, Buick, GMC y Cadillac (e incluso el sistema no se encuentra disponible para todos los modelos de automóviles de estas firmas). Según cifras del INEGI sobre las ventas del 2018, las marcas anteriormente mencionadas solo implican un pequeño porcentaje de los autos vendidos durante dicho año [8].

El no contar con un automóvil de las marcas sobre las que opera OnStar, no es la única limitante para poder utilizarlo. Otros aspectos que se deben tener en cuenta, son el costo a mediano y largo plazo, ya que para obtener los beneficios de este servicio se debe pagar una renta mensual sobre el precio del vehículo (los precios de los planes varían de \$299.00 a \$499.00 m.n.) y tener un plan de datos contratado de al menos 25 Gb según las recomendaciones dirigidas a potenciales usuarios [9].

2.3 Redes VANET (Vehicular Ad Hoc Network)

Los comienzos de las redes vehiculares tienen sus inicios en la década de 1970. Estas redes nacieron con el principal objetivo de agilizar el tráfico vehicular, reducir el número de accidentes automovilísticos y aumentar el nivel de confort de conductores y pasajeros. El modo de comunicación de estas redes es de manera inalámbrica y trabaja utilizando la banda de radio de FM, la cual es asignada directamente por el gobierno o región. Debido a la manera exponencial en la que crece el parque vehicular a nivel mundial, crece también la necesidad de hacer el tránsito generado por estos vehículos cada vez más inteligente y fluido. Es así como el uso de cámaras, sensores, sistemas de monitoreo y protección se suman a la lista de elementos que se utilizan dentro de las redes VANET.

Las redes VANET se encargan de recolectar información a través de una red formada por vehículos e infraestructura comunicándose todos de manera inalámbrica. De esta manera, al todos compartir su información es posible obtener la situación del tránsito en tiempo real o recibir avisos de un posible peligro en el camino.

Dentro de las aplicaciones de las redes VANET se encuentra la “seguridad activa”, que es el sistema de notificación automático de accidentes empleado en este tipo de redes. La manera en que opera la seguridad activa consiste en enviar un mensaje de alerta de colisión a los automóviles o elementos de infraestructura que se encuentren dentro del rango de cobertura y de esta manera informar a los servicios de emergencia. En la Figura 1 puede observarse cómo el vehículo amarillo al sufrir un

accidente, notifica a los demás vehículos acerca del percance para que lo auxilien o pidan ayuda [10], [11], [12].



Figura 1. Situación de propagación de alerta operando en una red VANET.

A pesar de que las redes VANET son, dentro de su tipo, las más populares y las que más desarrollo han tenido, aún existen problemas y limitantes que impiden su despliegue a gran escala. Una de sus limitaciones principales son los protocolos de comunicación empleados, como el IEEE 802.11p el cual funciona bien en simulaciones, pero en ejercicios reales tiene complicaciones debido a que las tramas de información son enviadas de manera constante desde vehículos que viajan a velocidades desde 20 km/h en zonas urbanas hasta 180 km/h en carreteras. Sin embargo, a pesar de sus limitaciones, esta tecnología ha sido pionera y por lo tanto ha puesto las bases de estudios y prototipos similares empleando otro tipo de tecnologías y metodologías como el sistema PCN (Post Crash Notification) propuesto por la universidad de ICESI en Colombia [12], el sistema e-NOTIFY [1] propuesto por la dirección general de tráfico en España y el prototipo presentado en este trabajo.

2.4 Smart Cities

Las poblaciones a nivel mundial crecen y con ellas las ciudades en donde viven sus habitantes, es por ese motivo que la tecnología está comenzando a permear cada vez más en nuestras vidas, para ayudarnos a hacer más prácticas nuestras actividades y mejorar nuestra calidad de vida. La tecnología IoT incluye la construcción de redes masivas inteligentes en donde pueden convivir diferentes tipos de servicios y objetos como sensores, actuadores, displays, cámaras de vigilancia, vehículos y casi cualquier objeto cotidiano conectado a un microcontrolador y con conexión a internet [3].

Los sectores energético, educativo, médico y gobierno son solo algunos de los campos en donde el IoT ha logrado optimizar y resolver problemáticas; dentro de estos sectores se encuentran las ciudades inteligentes. En la actualidad no existe un concepto exacto de qué es una Smart City debido a la ambigüedad de la definición y también a la velocidad con la que expanden sus áreas de aplicación, sin embargo una propuesta de Žilina University en Eslovaquia, unió la interpretación de varios investigadores importantes del tema llegando a la siguiente conclusión acerca de qué es una Smart city: “Las ciudades inteligentes son la integración del entorno tecnológico y la naturaleza, incrementando así la efectividad de los procesos de cada campo en donde se encuentran incorporados dichos entornos, por ello se busca mejorar el desarrollo sustentable, la seguridad y bienestar de los habitantes y tener como objetivo final incrementar la calidad de vida de los ciudadanos y el medio ambiente” [13].

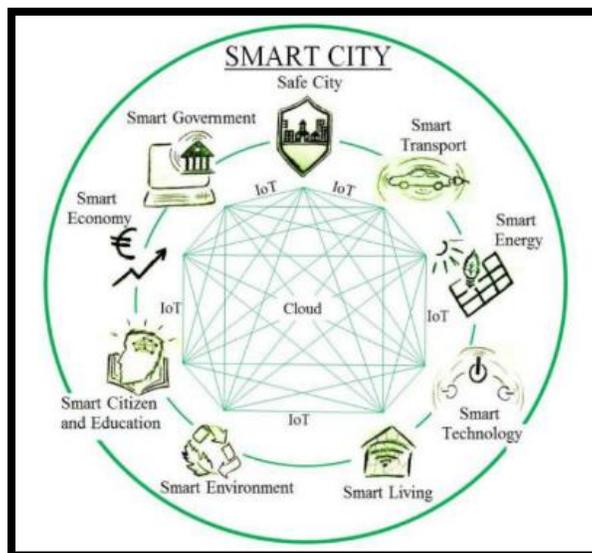


Figura 2. Componentes de una Smart City [13].

Dado que la seguridad vial es el tema principal en el presente trabajo, la forma en que las ciudades inteligentes abordan los accidentes automovilísticos es mediante el uso de sistemas de monitoreo avanzados, utilizando sistemas de video vigilancia, siendo finalmente el personal de monitoreo el encargado de notificar a los servicios de emergencia correspondientes en caso de que aviste una situación de riesgo.

2.5 Trabajos de investigación relevantes

Se consultaron diversos trabajos de investigación que abordan la misma problemática que se discute en este documento, dentro de los cuales, debido a la manera en que plantean la solución y al tipo de tecnología que utilizan, destacan dos en particular, los cuales son:

1.- “Desarrollo de un Prototipo para la Notificación Automática de Accidentes de Tráfico usando Redes Vehiculares” [1]. En este trabajo se plantean problemas generales de movilidad, redes VANET y accidentes vehiculares. La solución propuesta es todo un sistema llamado e-NOTIFY. El sistema e-NOTIFY aprovecha las características de operación y comunicaciones utilizadas por las redes vehiculares. La manera en que opera el sistema es mostrada en el diagrama a bloques de la Figura 3.

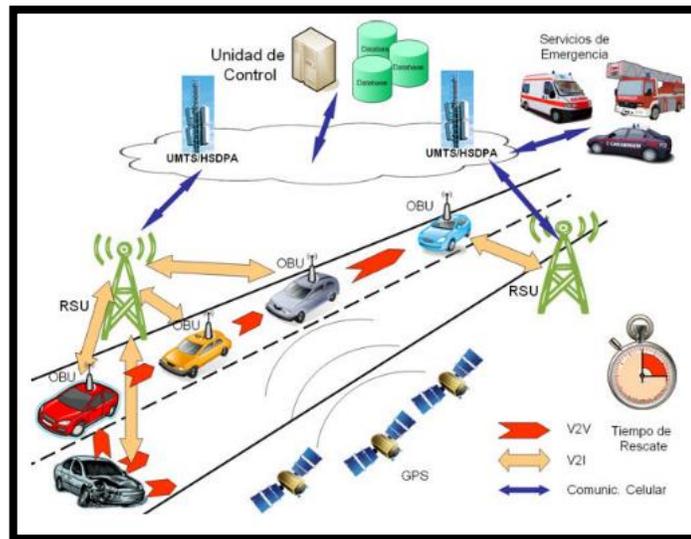


Figura 3. Arquitectura propuesta por e-NOTIFY [1] .

En la elaboración de dicho trabajo se muestran imágenes de experimentos prácticos realizados durante la ejecución de su sistema. Sin embargo, su operación es poco práctica debido a que cada automóvil debe utilizar una unidad a bordo, la cual está formada por una serie de conexiones alámbricas e inalámbricas y dispositivos adicionales a la estructura original del vehículo, además su funcionamiento está limitado a operar solamente sobre redes vehiculares.

2.- “Prototipo de detección automática de accidente con el empleo de hardware Libelium” [14]. En el desarrollo de este trabajo se mencionan las principales causas de accidentes automovilísticos, se incluye una recopilación de sistemas similares y un análisis de un microcontrolador Libelium. En este trabajo no se menciona ninguna arquitectura bien estructurada, ni como operaría el sistema en detalle técnico pero el objetivo que plantean aparentemente puede lograrse de la manera en que ellos proponen.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan conceptos teóricos y técnicos que es necesario entender previamente para tener mejor comprensión de la propuesta presentada en este trabajo. Además de dichos conceptos, se presentan los dispositivos que serán empleados para esta propuesta.

La selección de los dispositivos fue hecha de manera cuidadosa. Para la selección del microcontrolador fueron considerados aspectos como la velocidad de procesamiento, memoria flash y RAM, tamaño y costo (como se mencionó anteriormente, se busca que el equipo sea barato para que pueda ser implementado en básicamente cualquier vehículo). Para la selección del IMU (Inertial Measurement Instrument, por sus siglas en inglés), fueron considerados aspectos como precisión, tamaño, resistencia y compatibilidad con el microcontrolador. Por último, para el dispositivo que se empleará para realizar la tarea de comunicación (SIM808), fueron considerados aspectos como bandas de operación, protocolos de comunicación, GPS, precisión, consumo de batería y compatibilidad con el microcontrolador y el IMU.

3.1 Unidad de medición inercial

Es un dispositivo electrónico que generalmente está compuesto por un acelerómetro y un giroscopio, aunque existen modelos que pueden incluir también un barómetro, termómetro o magnetómetro. Incluso puede tener todos dependiendo del fabricante.

Un IMU está formado por una placa hecha de material conductor, un centro de masa y una serie de platinos que están cargados y fijados a la placa, como se muestra en la Figura 4.

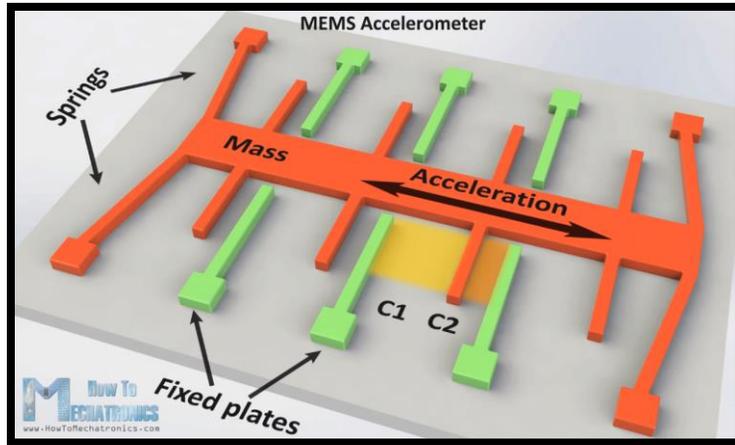


Figura 4. Composición interna de uno de los ejes de un IMU.

Cuando la masa se encuentra en movimiento, la capacitancia (C1 y C2 de la Figura 4) entre los platinos y la masa cambia. Esto se ve reflejado en las lecturas arrojadas por el IMU llamadas *data raw*, los cuales son una especie de datos que no están procesados y tienen una interpretación poco lógica. Es importante decir que una IMU no mide grados, pero con los datos *raw* y con ayuda de operaciones matemáticas recomendadas por el fabricante, se pueden llevar estas lecturas a una unidad de medición más familiar como grados o radianes.

Generalmente este tipo de dispositivos son utilizados en barcos, drones, aeronaves, misiles y básicamente cualquier aplicación relacionada con la navegación [15].

3.2 Acelerómetro

Un acelerómetro es un dispositivo electrónico con la capacidad de medir el cambio de velocidad de un objeto en movimiento con respecto al tiempo, sus unidades de medición son los $\frac{m}{s^2}$.

Para aclarar el concepto de aceleración, debemos aclarar otros conceptos físicamente previamente. El primer concepto que debe aclararse es la *posición*, que se refiere a la posición del objeto en un momento t específico. La representación física de la posición se muestra en (1)

$$\vec{P}(t) \tag{1}$$

donde \vec{P} es un vector de posición y t es el tiempo.

El siguiente concepto importante es la *velocidad*, que se define como la razón de cambio de la posición respecto al tiempo. La expresión física con la que se representa dicho fenómeno se muestra en (2). Las unidades de la velocidad son m/s (aunque pueden ser km/h) [16].

$$\vec{v} = \frac{d}{dt} \vec{P}(t) \quad (2)$$

donde \vec{v} es el vector de velocidad.

Por último, y con lo anteriormente aclarado, la *aceleración* puede definirse como la variación de la velocidad de un objeto de peso constante respecto a un tiempo. Este fenómeno puede representarse de manera física como se muestra.

$$\vec{a} = \frac{d}{dt} \vec{v}(t) \quad (3)$$

donde \vec{a} es el vector de aceleración. Cabe aclarar que un objeto que vaya muy rápido no necesariamente tiene que tener una aceleración alta si el cuerpo mantiene su velocidad constante [16].

3.3 Giroscopio

El giroscopio es un dispositivo que, mediante el principio mencionado en la Sección 3.1 de este trabajo, tiene la capacidad de medir la velocidad angular de un cuerpo basado en el efecto Coriolis y el principio de conservación angular. En otras palabras, es capaz de medir la variación de velocidad angular de un cuerpo respecto al tiempo.

Las unidades en que se representa son grados/segundo (pueden ser radianes/segundo también). Esto indica cuántos grados rota un cuerpo sobre su propio eje con respecto a una medida de tiempo [15].

3.4 Microcontroladores, sensores y shields

En esta sección se muestran los principios físicos, conceptos técnicos y dispositivos que se utilizarán para el desarrollo de la propuesta.

Antes de comenzar a explicar qué hace cada dispositivo y bajo qué principio funciona, aclararemos tres conceptos importantes.

- **Microcontrolador:** Dispositivo electrónico con entradas y salidas lógicas programables con la capacidad de realizar instrucciones lógicas y operaciones matemáticas. Para fines de la propuesta de este trabajo se eligió un módulo Arduino UNO [17].
- **Shield:** Son placas electrónicas adicionales, que aumentan las capacidades de origen del microcontrolador en el que se instalan. Para fines de la propuesta de este trabajo se eligió un shield DFRobot SIM808 [18].
- **Sensor:** Dispositivo (puede ser mecánico o electrónico) con la capacidad de captar magnitudes físicas externas de diferente tipo y transformarlas en señales eléctricas para poder ser interpretadas. Para fines de la propuesta de este trabajo se eligió un MPU-6050 [19].

3.4.1 Arduino UNO

El Arduino Uno es una placa electrónica que funciona sobre el microcontrolador ATmega328. Esta placa cuenta con puertos de entrada y salida digitales y analógicos como se muestra en la Figura 5. Estos puertos están diseñados para que la placa pueda interactuar con sensores y actuadores externos. Parte de las capacidades del microcontrolador es establecer rutinas lógicas y funciones matemáticas mediante instrucciones previamente programadas [17], [20].

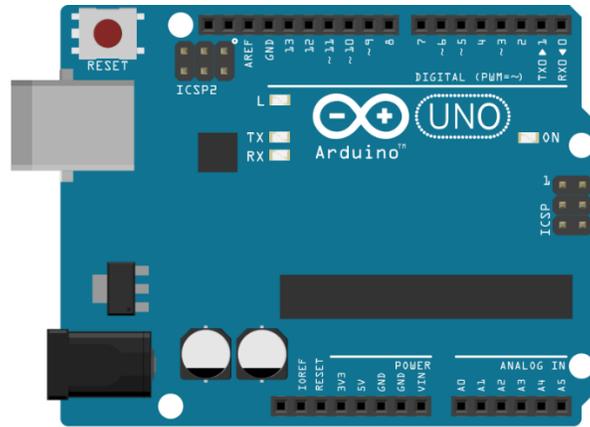


Figura 5. Representación física de un microcontrolador Arduino UNO.

Esta placa utiliza un Entorno de Desarrollo Integrado (Integrated Development Environment o IDE por sus siglas en inglés) que permite a los diseñadores establecer rutinas personalizadas dependiendo de la aplicación, sensores a utilizar, actuadores a utilizar, etc. Debido a que esta marca es de software libre, dicho ambiente de desarrollo se encuentra disponible de manera gratuita.

El motivo por el cual se eligió este modelo fue debido a que el ambiente de programación es amigable con el diseñador debido a que está basado en C++, el costo con el que se pueden adquirir estos dispositivos es barato y su accesibilidad es sencilla.

Nota del autor: A partir de este punto en adelante, nos referiremos solamente como Arduino a la placa Arduino UNO para fines prácticos.

3.4.2 Sensor MPU-6050

El MPU-6050 es un sensor que cuenta con un acelerómetro, un giroscopio, un sensor de temperatura y un procesador de movimiento digital en el mismo chip. Este sensor tiene 6 grados de libertad, 3 ejes correspondientes al acelerómetro (x , y & z) y 3 ejes correspondientes al giroscopio (Yaw, Pitch y Roll) como se muestra en la Figura 6 [19], [21].

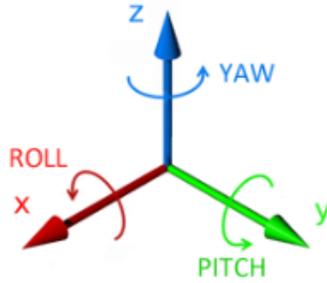


Figura 6. Ejes correspondientes al acelerómetro y giroscopio.

El sensor cuenta con diferentes pines como se muestra en la Figura 7. Este dispositivo utiliza el protocolo I2C [22] para establecer la comunicación con el microcontrolador mediante los pines SDA Y SCL (Series Data y Series Clock Line, respectivamente) y es alimentado a 5 Vcc. Para más información acerca de los demás pines y los rangos de escala en que opera, consultar [21].

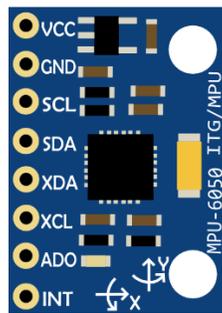


Figura 7. Representación física del sensor MPU-6050.

3.4.3 SIM808

Es un shield Quad-banda GPRS/GSM con GPS adaptado para funcionar con algunos modelos de microcontroladores Arduino. Este módulo cuenta con dos antenas externas, una correspondiente a GPR y otra a GPS, lo que permite combinar la tecnología GNSS para la navegación satelital en el mismo módulo. Este módulo cuenta con una ranura disponible para una tarjeta SIM. De esta manera se puede utilizar la red celular GSM prácticamente con cualquier operador para transmitir y recibir mensajes de diferente tipo, como SMS, HTTP, POP3, TCP/UDP entre otros [23], [18].

El aspecto del módulo SIM808 se muestra en la Figura 8, donde se puede observar que cuenta con los mismos puertos del módulo Arduino. Esto es debido a que el módulo se superpone en el Arduino.

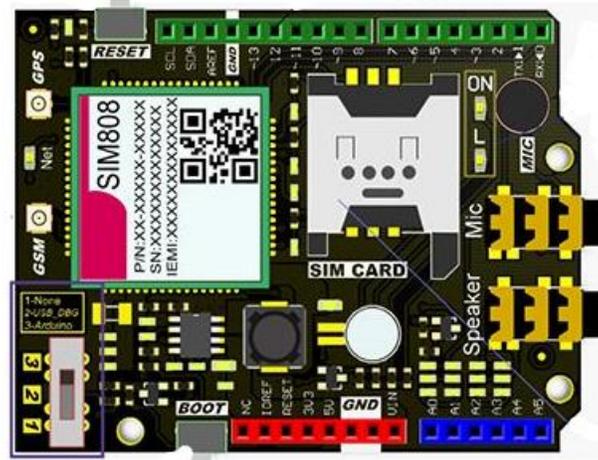


Figura 8. Representación gráfica del shield SIM808.

Aparte de sus características técnicas y de operación, este modelo fue escogido especialmente debido a el hecho de que sus dos antenas (GPS y GSM) son externas y esto permite colocarlas en el lugar que tenga mejor señalización dentro del automóvil, como en medio del toldo o en algún lugar más externo de la carrocería sin tener que exponer el módulo completo al momento del accidente.

Para mayor detalle acerca de sus características físicas, operación, comandos AT y manual de operación, consultar [24], [25].

3.5 GPS

El sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés, Global Positioning System) determina las coordenadas para ubicar un punto en la superficie terrestre. El surgimiento de la tecnología GPS fue en Estados Unidos a finales de la guerra fría. Es importante recalcar que su principal aplicación era para usos militares antes de ponerlo a disponibilidad de la población civil. La tecnología GPS funciona gracias a una red de 30 satélites sincronizados que se encuentran orbitando la superficie terrestre a 20,000 km aproximadamente [26], [27].

Esta tecnología puede verse aplicada en sistemas de navegación marítima, aérea y naval, en tareas de rescate e incluso está al alcance de la población en general en teléfonos inteligentes. A pesar de que las siglas “GPS” son las más conocidas cuando se hace referencia a un sistema de posicionamiento global, otros países como Rusia, India, China y la Unión Europea crearon sus propias versiones del diseño estadounidense [28].

Este tipo de tecnología fue contemplada para este diseño debido a que varias corporaciones dedicadas al control y prevención de accidentes viales de diferentes países estiman que uno de los mayores problemas después de un choque es no conocer la ubicación exacta de en dónde ocurrió el problema, lo cual hace gastar valiosos minutos cuando el accidente fue grave.

3.5.1 Elementos que conforman el sistema GPS

Los elementos que conforman la arquitectura del sistema GPS son los siguientes (Figura 9)[26]:

- Segmento espacial: Este segmento está formado por 30 satélites que se encuentran orbitando.
- Segmento de control: Este segmento está formado por 5 estaciones terrestres que se encargan de monitorizar el comportamiento y rutas de los satélites.
- Segmento usuario: Este segmento lo conforman antenas y receptores (los receptores son los dispositivos que solicitan sus coordenadas a los satélites).

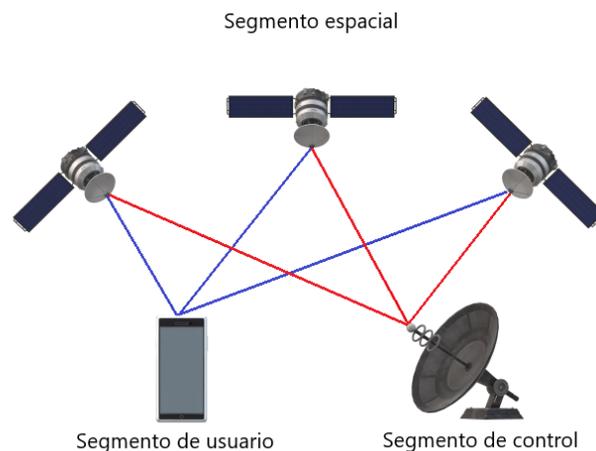


Figura 9. Elementos de la arquitectura GPS.

3.5.2 Funcionamiento

La tecnología GPS emplea el método de trilateración para estimar la ubicación del dispositivo solicitante de la siguiente manera [26]:

- Los satélites se encuentran transmitiendo de manera constante dos códigos de datos, uno corresponde al uso civil y el otro es de uso militar, por lo cual los civiles no tienen acceso a dicha señal.
- El dispositivo solicitante emite un mensaje de solicitud para conocer sus propias coordenadas (se deben establecer conexiones con al menos tres satélites para garantizar la precisión).
- Cuando el receptor detecta el primer satélite, se genera una esfera virtual que tiene como centro al satélite. Para este punto el satélite considera que el receptor se encuentra en algún punto de la superficie de dicha esfera, pero no sabe exactamente en dónde.
- Después, se conecta con un segundo satélite que genera una nueva esfera virtual que se superpone a la primera y de esta manera se estima que el receptor se encuentra en algún punto en donde se interceptan las esferas. Lo mismo pasa con un tercer y hasta un cuarto satélite como se muestra en la Figura 10.
- La manera en que se calcula la distancia entre el satélite y el receptor es tomando en cuenta el tiempo que tarda la señal en llegar del satélite al receptor y multiplicarla por la velocidad de la luz (debido a que es una señal electromagnética) como se muestra en (4)

$$d = c \cdot t \quad (4)$$

donde d = distancia, c = velocidad de la luz y t = tiempo que tarda la señal en llegar.

- Dicho proceso es repetido por el resto de los satélites, de manera que el punto en donde convergen las esferas virtuales es la estimación de la posición del receptor.



Figura 10. Superposición de esferas virtuales generadas por distintos satélites [29].

3.6 GSM

El Sistema Global de Comunicación Móvil (GSM por sus siglas en inglés, Global System for Mobile communication) surge a partir del despliegue de la segunda generación de telefonía celular (2G). Consiste en una red global de comunicación y conmutación completamente digital. Este sistema permite la comunicación de voz y datos de manera encriptada entre dos o más dispositivos a través de un canal dedicado (durante el momento de la conexión) utilizando como interfaz el medio libre, aunque también puede ser alámbrica [30].

La velocidad de transferencia puede ser de hasta 114 Kbps. Por otra parte, la banda sobre la que opera es asignada por cada país, y en México depende del operador como se indica en la Tabla 1 [31].

Operadores en México	Bandas de Operación
AT&T	B2 – 1900 MHz
	B5 – 850 MHz
	B4 – 1700/2100 MHz
Movistar	B2 – 1900 MHz
	B5 – 850 MHz
Telcel	B2 – 1900 MHz
	B5 – 850 MHz

Tabla 1. Bandas de operación GSM de los principales operadores en México.

3.6.1 GPRS

El servicio general de paquetes vía radio (GPRS por sus siglas en inglés, General Packet Radio Services) es una tecnología que trabaja con el protocolo TCP/IP. Este servicio está orientado al envío y recepción de paquetes de datos entre dos o más dispositivos a través de redes externas como redes privadas, intranet o internet.

Esta tecnología toma y mejora las características de la red GSM (se le conoce como 2.5G) debido a que trabaja sobre dicha red, con la diferencia de que se agrega un backbone para transmisión de datos que funciona de manera paralela a la red GSM. El backbone funciona como un router para encaminar los paquetes de datos a una red externa [30], [32].

GPRS cuenta con servicios adicionales a GSM como:

- WAP (Wireless Application Protocol).
- MMS (Multimedia Messaging System).
- Correo Electrónico.
- www (World Wide Web).
- PTP (Peer To Peer).

Una de las mayores ventajas de GPRS es que el costo del servicio no depende del tiempo de conexión, sino del consumo de datos. Esto, para el propósito de la propuesta presentada en este trabajo es una buena noticia, debido a que la transferencia de datos solo se producirá al ocurrir un accidente y el mensaje de alerta generado será de aproximadamente 100 caracteres aunque puede variar dependiendo de la longitud del nombre y datos del usuario.

HTTP

El protocolo de transferencia de hipertextos es un protocolo cliente–servidor, que permite el intercambio de información entre dichos elementos a través de la red de internet. Es importante aclarar que este protocolo es a lo que se conoce como *sin estado*, lo cual implica que no existe un registro que nos permita conocer si se han ejecutado acciones anteriores entre cliente y servidor, esto en ocasiones y dependiendo de la aplicación, puede ser útil para ahorrar espacio de memoria.

Este protocolo funciona mediante peticiones entre cliente–servidor, en donde el cliente es básicamente cualquier dispositivo que tenga acceso a la red de internet como celulares,

computadoras o, para este trabajo, un microcontrolador con dicha función, y el servidor puede variar desde uno de propósito específico, hasta un servidor de páginas de internet o correo electrónico.

Dentro de las peticiones más utilizadas por este protocolo podemos encontrar GET, POST, PUT, DELETE. Pero para la aplicación propuesta en este trabajo, nos concentraremos solamente en la petición POST, que básicamente se encarga de mandar información del cliente al servidor. El funcionamiento de este protocolo se podría resumir en los siguientes 4 pasos:

- **Conexión:** El cliente establece una conexión con el servidor a través del puerto 80 (el puerto 80 es el puerto estándar, pero se puede especificar algún otro).
- **Petición:** El cliente hace la petición al servidor para que realice alguna acción como, solicitar o transferir información hacia el servidor (hay más tipos de requerimientos).
- **Respuesta:** El servidor le responde al cliente, ya sea para confirmar la petición realizada o para indicar la existencia de algún error.
- **Cierra:** cliente y servidor cierran la conexión.

SMS

El Servicio de Mensajes Cortos (SMS por sus siglas en inglés Short Message Service) es un servicio ofrecido por GSM para transmitir y recibir mensajes entre usuarios, dichos mensajes tienen la característica de utilizar caracteres alfanuméricos únicamente. La capacidad de los mensajes es limitada, por lo que cada uno puede tener un máximo de hasta 918 caracteres [26],[33].

Se optó por este tipo de servicio para la transmisión de la alerta que irá dirigida a los familiares del usuario como contacto de emergencia, debido a que, a través de este medio, casi se puede garantizar que el mensaje llegará al receptor a menos que la EM receptora se encuentre apagada. El uso de servicios similares a los que se mostraron en el Capítulo II, depende de tecnologías como 4G o servicio de datos de alta velocidad para funcionar, lo cual se vuelve un problema cuando en México la cobertura de dichas tecnologías en caminos, carreteras y algunas comunidades es limitada (revisar Anexo 1).

3.6.2 Arquitectura GSM

La arquitectura de este sistema está compuesta básicamente por cuatro elementos como se muestra en la Figura 11 [26], [34]:

- SIM (Subscriber Identity Module): Es una pequeña tarjeta plástica que utilizan los dispositivos como medio seguro de identificación para poder registrarse y utilizar la red GSM. Estos dispositivos cuentan con una memoria que va de los 2Kb a 512Kb, dicha memoria es utilizada por el dispositivo en que es instalada para almacenar contactos e información referente al registro de la red.
- MS (Mobile Station): La estación móvil utiliza una tarjeta SIM para identificarse en la red y de esta manera tener acceso a sus servicios. Una estación móvil puede ser cualquier dispositivo que necesite de una tarjeta SIM para establecer la comunicación con una red celular, como teléfonos fijos y móviles, microcontroladores y enrutadores caseros.
- BS (Base Station): La estación base tiene un rango de cobertura que depende del alcance de la potencia su antena. Es el puente entre las estaciones móviles y los centros de conmutación.
- MSC (Mobile Switching Center): Los centros de conmutación móvil, se encargan de interconectar las BS que se encuentren en su radio de operación, aunque también están interconectadas con otros MSC. Parte de sus tareas es gestionar los recursos de comunicación como tiempo y frecuencia entre estaciones base y centros de conmutación. De esta manera se asegura el correcto funcionamiento de la red para evitar saturación y exceso de tráfico.

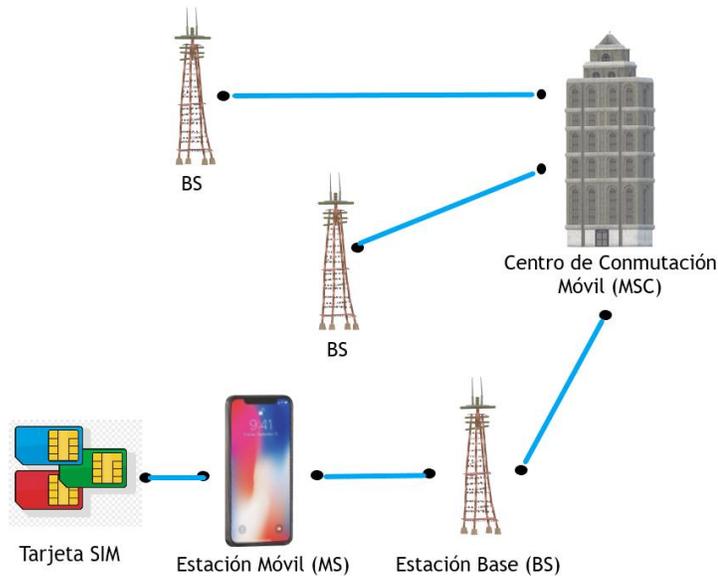


Figura 11. Elementos de la arquitectura GSM.

3.6.3 Funcionamiento

La manera en que opera GSM para dispositivos móviles es la siguiente.

- Primero se debe asegurar que la MS cuente con una tarjeta SIM.
- La MS se registra en la red GSM cuando comienza la señalización con la BS (se mantiene señalizando todo el tiempo).
- Cuando se necesita utilizar un canal para transmitir (voz o datos) a otra MS, la MS envía un código a la BS para solicitar un canal y así establecer dicha comunicación.
- La BS le regresa un código, ya sea para decirle que hay un canal disponible o para ponerlo en espera en lo que se desocupa uno.
- La BS revisa si la MS a la que se quiere transmitir se encuentra en sus registros.
- Si es así, establece el enlace entre las MS. De lo contrario, manda un mensaje al centro de conmutación preguntando si tiene en sus registros a la MS receptora. Si el MSC no lo tiene en sus registros, preguntará a otros MSC hasta encontrar el registro de la MS receptora dentro de la red de telefonía pública.
- Una vez se encuentra el registro de la MS receptora, se establece un canal temporal para la transmisión.
- Una vez terminada la transmisión, el canal se deja libre para otras MS.

El motivo por el cual se decidió elegir la tecnología GSM fue debido a que la mayor parte del territorio nacional cuenta con cobertura para esta tecnología (vease Anexo 2) en comparación con redes de cuarta generación. Parte del objetivo de ocupar una infraestructura ya existente, es que no hay necesidad de la implementación de equipos especiales para la operación del prototipo, además de que no se requiere de ningún permiso especial para ocupar dicha red telefónica, lo cual se resume en el ahorro de costos de implementación para esta propuesta.

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV. PRUEBAS, SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Durante este capítulo se discutirán algunos conceptos relacionados con la seguridad vehicular, la estandarización de organismos internacionales encargados de seguridad vial, las pruebas paso a paso del desarrollo del prototipo y la arquitectura bajo la cual funciona el sistema.

4.1 Seguridad vehicular

Ante la preocupación por parte de los fabricantes de preservar el bienestar de sus usuarios, se desarrollaron diferentes sistemas de seguridad que van desde el uso del cinturón de seguridad, pasando por la implementación de frenos ABS (Anti-lock Braking System), hasta los actuales sistemas cada vez más automatizados de tripulación asistida [35], [36].

Hay cuatro elementos que pueden afectar la seguridad de un automóvil en movimiento, que son los siguientes:

- El vehículo.
- La ruta.
- Características ambientales.
- El conductor.

Factores como el medio ambiente, la ruta y el conductor, no pueden ser evaluados desde el punto de vista de la propuesta presentada en este trabajo. Por lo tanto, únicamente nos enfocaremos en la seguridad referente al automóvil la cual se clasifica en activa y pasiva.

4.1.1 Seguridad activa

La seguridad activa se mantiene funcionando antes de que ocurra algún percance y su principal objetivo es evitar la posibilidad de un accidente. Esto se logra con la continua mejora en el diseño de los automóviles por parte de los fabricantes, quienes han mejorado continuamente las

características de seguridad activa como la estabilidad del automóvil, visibilidad, manejo, agarre al suelo, etc. [36].

4.1.2 Seguridad pasiva

Esta seguridad se activa al momento de percibir algún comportamiento inusual en el vehículo y su principal objetivo es reducir el daño generado por dicho evento inusual a los tripulantes del automóvil. Esta clasificación la podemos ver funcionando en sistemas como bolsas de aire, cinturones de seguridad, frenos ABS, etc. [36].

4.2 Organizaciones encargadas de la prevención y mejora continua de los sistemas de seguridad vehicular

Debido a la necesidad de mejorar de manera continua las condiciones de operación en los vehículos, en Estados Unidos se formó una comisión gubernamental encargada de la estandarización y organizaciones privadas encargadas de realizar recomendaciones a los fabricantes. Estas asociaciones no solo se encargan de la seguridad vehicular sino también de la prevención de accidentes, seguridad vial, estadísticas de mortalidad, etc.

Organizaciones como el *Comité de Transporte Interior de la Unión Europea* y el *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA), son algunas de las comisiones gubernamentales encargadas de desarrollar y mejorar los estándares de seguridad en los caminos y automóviles vendidos en la región de Europa y América respectivamente [37], [38]. Organizaciones sin fines de lucro como *Arrive Alive, Together for safer Roads* e incluso la OMS entre otras, coinciden en que parte de las mejoras que deben realizarse para evitar más muertes debido a accidentes automovilísticos, es establecer servicios de notificación efectivos y mejorar la coordinación de servicios de emergencia debido a que se pierde tiempo valioso intentando determinar la ubicación del accidente [4], [39], [40].

4.3 Pruebas realizadas en la industria

El Global NCAP (New Car Assessment Program) es el mayor proyecto de Towards Zero Foundation, una asociación sin fines de lucro formada por varios países, asociaciones civiles, fabricantes y comisiones gubernamentales. El objetivo de NCAP es brindar información independiente y transparente acerca de los niveles de seguridad de los modelos de vehículos a los usuarios, alertar a los fabricantes sobre la mejora en el desempeño de seguridad en sus modelos y alentar a los gobiernos a aplicar las regulaciones exigidas por la ONU [41].

Cada división de Global NCAP como Euro NCAP en Europa, US NCAP en Estados Unidos o Latin NCAP a la que pertenece México, analizan los modelos disponibles a la venta en su región, sin embargo, todos los modelos analizados deben ser sometidos a las siguientes tres pruebas [41]–[43]:

- *Prueba frontal*: La primera prueba, simula la situación más común de accidente automovilístico. Como se ve en la Figura 12, el automóvil se impacta de frente a 64 km/h contra un bloque fijo a un 40% del centro.

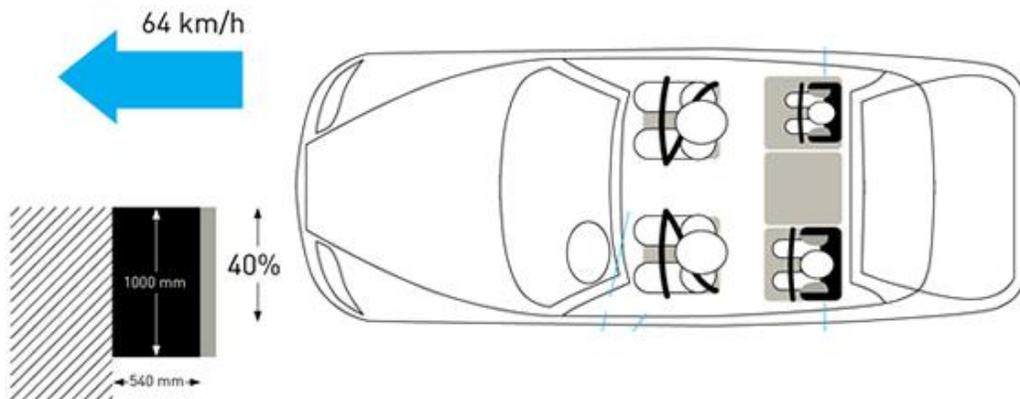


Figura 12. *Prueba frontal* estandarizada por NCAP [43].

- *Prueba lateral*: La segunda prueba simula el choque más letal, debido a que de costado no hay mucha estructura capaz de absorber el golpe, por lo que la mayor parte del impacto es absorbido por los ocupantes del vehículo. Las heridas más comunes durante este tipo de accidentes son en la cabeza y en el pecho.

Como se muestra en la Figura 13, en esta prueba el automóvil debe de estar totalmente en reposo, y será golpeado por un cuerpo en movimiento con las características físicas de un automóvil a 50 km/h apuntando a la parte central del costado del automóvil de pruebas.

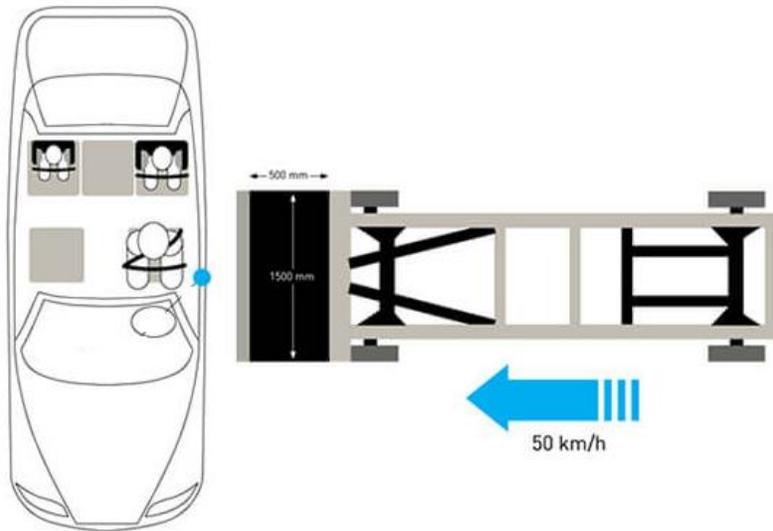


Figura 13. *Prueba lateral* estandarizada por NCAP [43].

- *Impacto lateral contra mástil*: Esta prueba tiene como objetivo mejorar las técnicas para proteger la cabeza del conductor ante un posible accidente. Consiste en impactar de forma lateral el automóvil de pruebas a 29 km/h contra un mástil de 254 mm de diámetro como se muestra en la Figura 14. Cabe mencionar que no todos los automóviles son sometidos a esta tercera prueba.

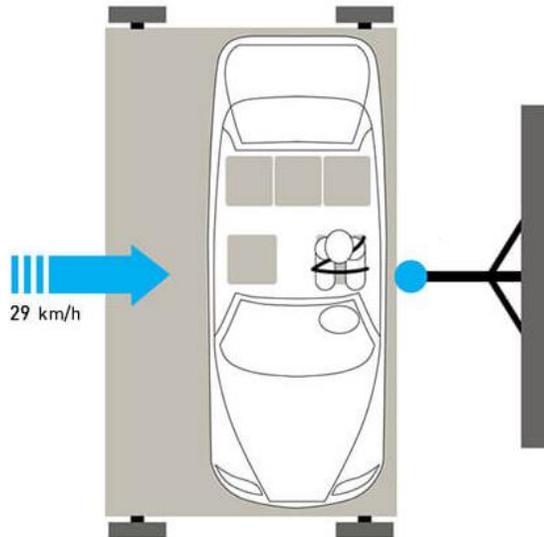


Figura 14. Prueba *Impacto lateral contra mástil* estandarizada por NCAP [43].

Las pruebas son realizadas con dummies a bordo de los automóviles de prueba, esto para conocer cuáles serían los daños que sufrirían los usuarios en las situaciones de choque más comunes [36].

4.4 Pruebas de dispositivos

Antes de comenzar a realizar la homologación de los dispositivos electrónicos planteados en el Capítulo III, se debe corroborar previamente la funcionalidad de cada uno de ellos para garantizar la operabilidad del prototipo. El código de cada una de las pruebas se encuentra en el Anexo 2.

Las pruebas realizadas a los dispositivos se dividen en tres etapas diferentes, durante la primera etapa se prueban los puertos, reloj interno y puerto de alimentación externa del microcontrolador Arduino, el cuál será el cerebro del prototipo y es desde donde se mandarían los comandos de ejecución a los otros dos elementos. Para dichas pruebas se utilizan un diodo emisor de luz, una resistencia de $1K\Omega$, una batería externa, además de un cronómetro externo. La segunda etapa de pruebas consiste en comprobar que las lecturas correspondientes al acelerómetro, giroscopio y termómetro del sensor MPU-6050 son confiables. La tercera y última etapa de pruebas consiste en comprobar las funciones del shield SIM-808, en donde se realizan pruebas de envío de mensaje de texto, comprobación de coordenadas GPS y envío de una trama HTTP.

4.4.1 Funcionamiento Arduino UNO

El fabricante no tiene formalmente un protocolo para comprobar el correcto funcionamiento del microcontrolador, por lo que se realiza una prueba con el uso del ejemplo *Blink* que viene precargado en la biblioteca del IDE de Arduino [44].

El ejemplo Blink, consiste en encender y apagar un led a una frecuencia determinada. La prueba realizada con el ejemplo Blink, ayuda a comprobar que la alimentación, el funcionamiento de la interfaz USB (necesaria para cargar el código al Arduino) y el reloj interno del Arduino, están funcionando de manera correcta.

- El primer paso, es hacer realizar la conexión del circuito Blink como se muestra en la Figura 15.

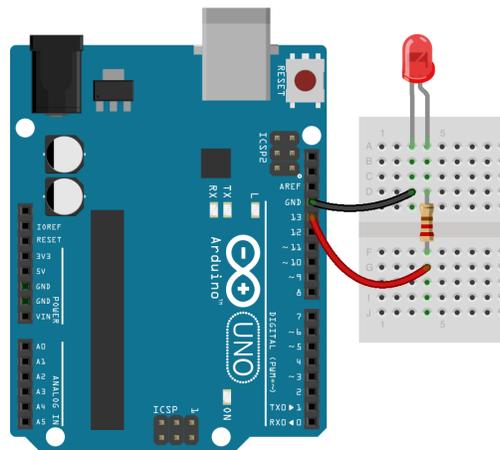


Figura 15. Circuito Blink [44].

- Después, conectar el microcontrolador a la computadora a través del puerto USB. Como se ve en el círculo rojo de la Figura 16, el led *ON* de encendido debe de permanecer de color verde sin parpadear; si parpadea o no enciende, el equipo presenta problemas.

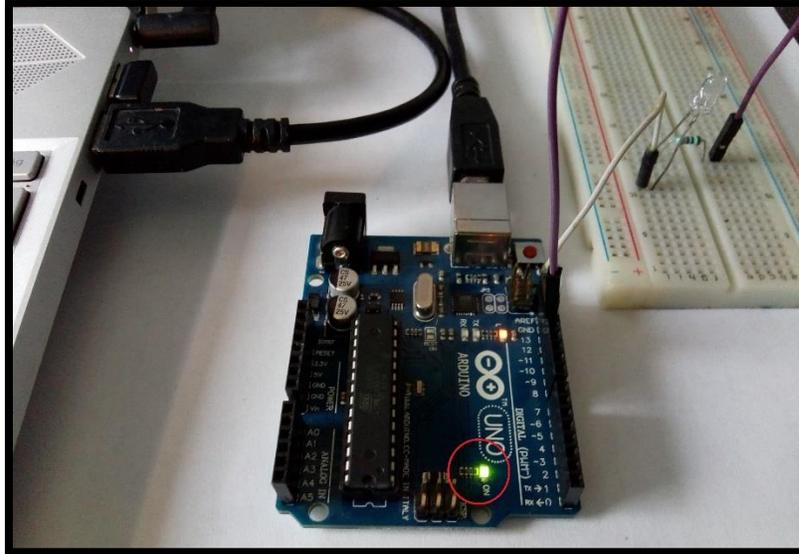


Figura 16. Conexión Arduino UNO mediante USB.

- Se carga el programa Blink a través del IDE al Arduino.
- Se comprueba que el código haya sido cargado correctamente como se muestra en la Figura 17.

```
Subido
El Sketch usa 930 bytes (2%) del espacio de almacenamiento de programa. El máximo es 32256 bytes.
Las variables Globales usan 9 bytes (0%) de la memoria dinámica, dejando 2039 bytes para las variables locales. El máximo es 2048 bytes.
```

Figura 17. Indicador de éxito en la compilación del código del IDE Arduino.

Nota del autor: En caso de que exista algún problema en el código, el IDE enviará un mensaje indicando el posible error en la lógica o sintaxis del código como se muestra en la Figura 18.

```
too few arguments to function 'void delay(long unsigned int)'
too few arguments to function 'void delay(long unsigned int)'
```

Copiar mensajes de error

Figura 18. Indicador de error en código del IDE Arduino.

- El código se configuró con un retardo de 1000 ms. entre parpadeo y parpadeo, por lo cual se compara la velocidad de parpadeo del led con un cronómetro externo, para comprobar la sincronía del reloj interno del microcontrolador (Figura 19). De esta manera se puede comprobar que el reloj interno del Arduino funciona de manera correcta (se asume que los 0.02 segundos de diferencia son despreciables, debido a que la prueba se repitió 10 veces obteniendo resultados similares, además de que el cronómetro era controlado manualmente).

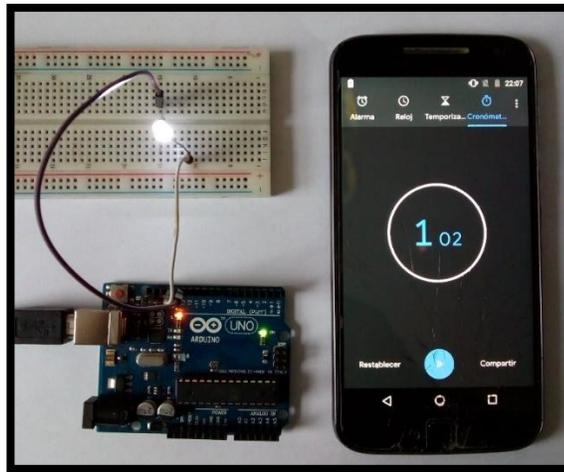


Figura 19. Cronometraje del reloj interno del Arduino con el circuito Blink.

- Desconectar la interfaz USB del Arduino y conectarlo a una batería externa de 7.4 V a 1000 mA como se muestra en la Figura 20. Para este punto, el circuito funciona de manera similar a cuando se encontraba conectado a la computadora como se muestra en la Figura 20.

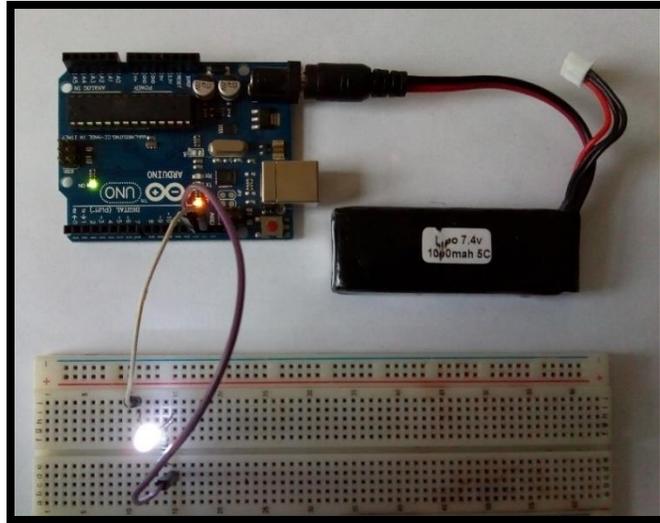


Figura 20. Circuito Blink con alimentación externa.

Una vez concluida esta serie de pruebas, podemos garantizar que el Arduino se puede comunicar de manera correcta con la computadora, que el funcionamiento del reloj interno es preciso y que el Arduino puede operar correctamente con una fuente externa.

4.4.2 Funcionamiento MPU-6050

Previo a realizar las pruebas de funcionamiento, se debe realizar la conexión del circuito mostrado en la Figura 21 [45].

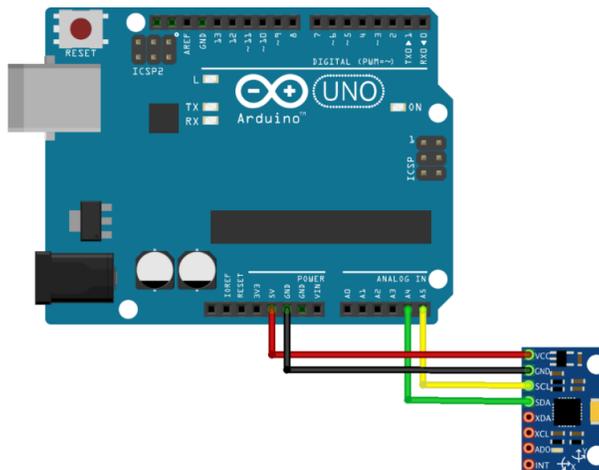


Figura 21. Conexión del Arduino UNO con el sensor MPU-6050.

El siguiente paso es descargar e instalar la biblioteca *MPU6050* en el IDE de Arduino [46]. Las pruebas de funcionamiento se realizaron cargando al Arduino el código *MPU6050_lecturas*.

Debido a las características del sensor MPU-6050, las pruebas se dividieron en acelerómetro, giroscopio y termómetro como se muestra a continuación:

- Acelerómetro

Una vez que se cargó el código *MPU6050_lecturas*, el puerto serial del IDE nos arrojará los siguientes resultados (Figura 22).

```
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx -0.17  Acy: 0.09  Acz: 10.07
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.08  Gy: -0.24  Gz: 0.27
-> Tmp = 23.59
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx -0.23  Acy: 0.12  Acz: 10.08
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.17  Gy: 0.11  Gz: 0.27
-> Tmp = 23.64
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx -0.18  Acy: 0.06  Acz: 9.98
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.29  Gy: -0.08  Gz: 0.09
-> Tmp = 23.64
```

Figura 22. Lecturas del código *MPU6050_lecturas*

En la Figura 22 se pueden apreciar los resultados obtenidos durante la prueba, en donde *Acx*, *Acy* y *Acz* corresponden a la aceleración en los ejes *x*, *y* & *z* respectivamente, los parámetros de *Gx*, *Gy* y *Gz* corresponden al yaw, pitch y roll respectivamente y por último la variable *Tmp* corresponde a la temperatura y está en grados centígrados.

Estas lecturas son arrojadas cuando el sensor se encuentra en posición normal como se muestra en la Figura 23. Se puede apreciar que la lectura del acelerómetro en el eje Z (*Acz*) es correcta, debido a que esos valores que rondan $9.8 \frac{m}{s^2}$ son correspondientes a la fuerza de gravedad ($9.8 \frac{m}{s^2} = 1$).

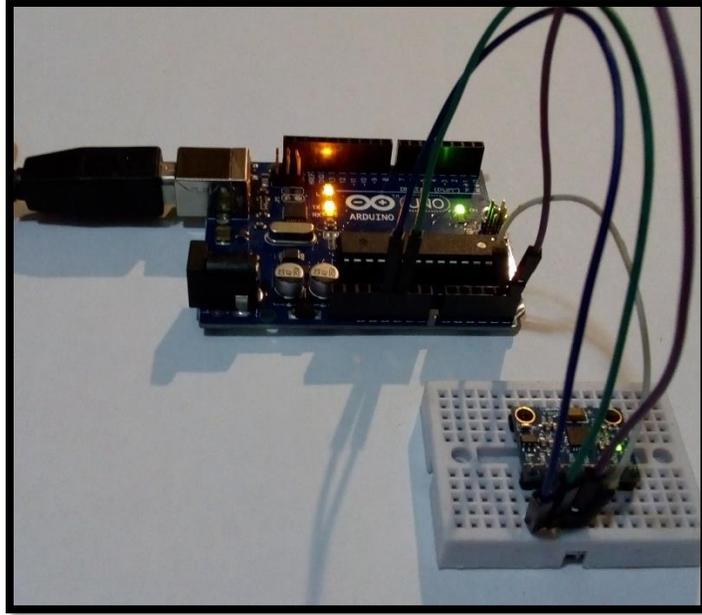


Figura 23. Posición normal del sensor MPU6050.

Para comprobar las lecturas correspondientes al eje X, se posicionará el sensor como se muestra en la Figura 24.

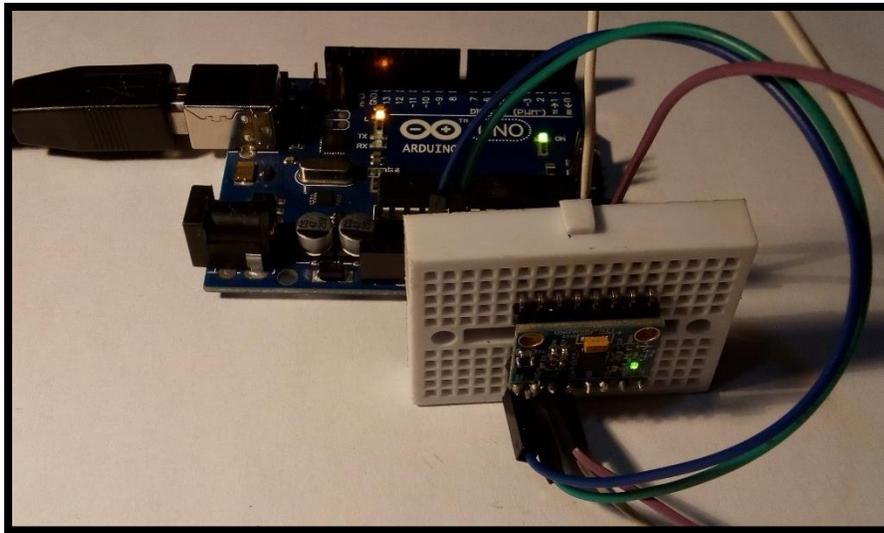


Figura 24. Posición del sensor MPU 6050 para medir la aceleración en el eje X.

Las lecturas arrojadas a través del puerto serial nos arrojaron los resultados de la Figura 25. La aceleración correspondiente al eje X (A_{cx}) ronda entre 9.95 y 10, por lo cual podemos asumir que

las lecturas son correctas, debido a que como indica el fabricante en su manual, existe un margen de error de $\pm 7.6^\circ$ además que la superficie puede presentar una cierta inclinación.

```
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 10.03  Acy: 0.17  Acz: -0.36
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -3.48  Gy: 0.32  Gz: 0.29
-> Tmp = 24.81
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 9.98  Acy: 0.22  Acz: -0.35
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.20  Gy: -0.50  Gz: 0.38
-> Tmp = 24.81
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 9.95  Acy: 0.16  Acz: -0.35
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -3.15  Gy: -0.08  Gz: 0.26
-> Tmp = 24.72
```

Figura 25. Lecturas del acelerómetro correspondiente a la posición de la Figura 24.

Por último, se analizó la aceleración correspondiente al eje y, para esto el sensor se colocó como se muestra en la Figura 26.

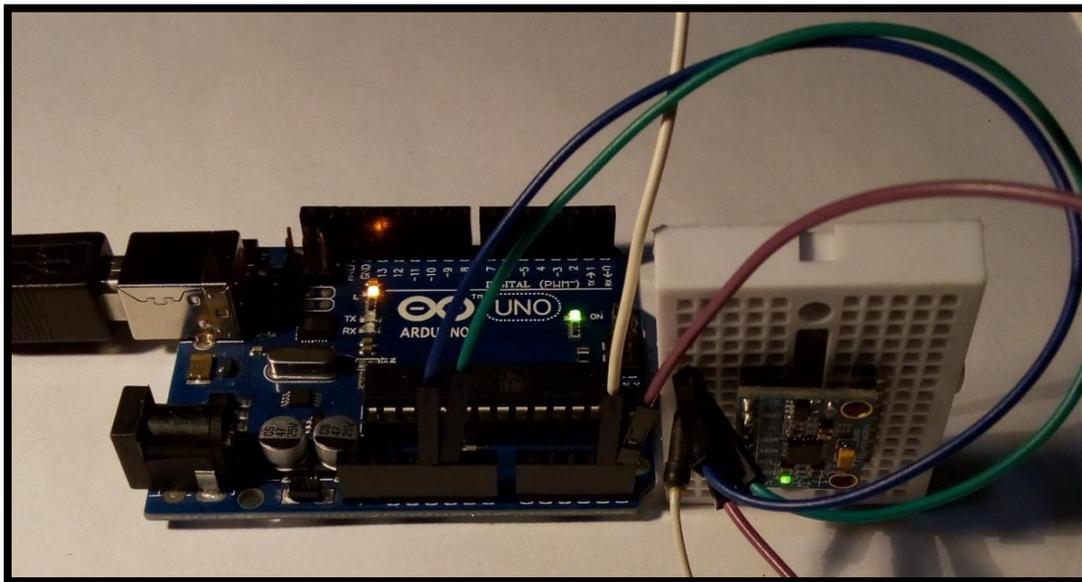


Figura 26. Posición del sensor MPU 6050 para medir la aceleración en el eje y.

Finalmente, la Figura 27 nos muestra los resultados arrojados con la posición de la Figura 26. Las lecturas mostradas son correctas por lo que se explicó anteriormente.

```
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.88   Acy: 9.81   Acz: -1.16
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.20   Gy: 0.12   Gz: 0.29
-> Tmp = 24.67
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.87   Acy: 9.83   Acz: -1.13
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.12   Gy: 0.11   Gz: 0.29
-> Tmp = 24.67
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.93   Acy: 9.78   Acz: -1.14
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.14   Gy: 0.02   Gz: 0.49
-> Tmp = 24.62
```

Figura 27. Lecturas del acelerómetro correspondiente a la posición de la Figura 26.

Una vez concluida esta serie de pruebas, se puede garantizar que el sensor MPU-6050 mide correctamente las aceleraciones de los ejes *x*, *y* & *z*.

- Giroscopio

Para probar las lecturas correspondientes al giroscopio, se tiene que rotar en sus ángulos de yaw, pitch y roll. El sensor MPU-6050 tiene diferentes rangos de escalas que son 250/500/1000/2000 °/s, se eligió la escala de 500°/s debido a que de esta manera podemos detectar un giro completo además de que a manera que aumenta la escala, aumenta el rango de error en las mediciones.

Se comienza por medir el yaw (Gz). Se colocó el sensor sobre una superficie sobre la cual pudiese ser fácilmente rotada (una cuerda de tonillo en este caso) como se muestra en la Figura 28. Esta posición sería equivalente a una vista desde la parte superior del automóvil.

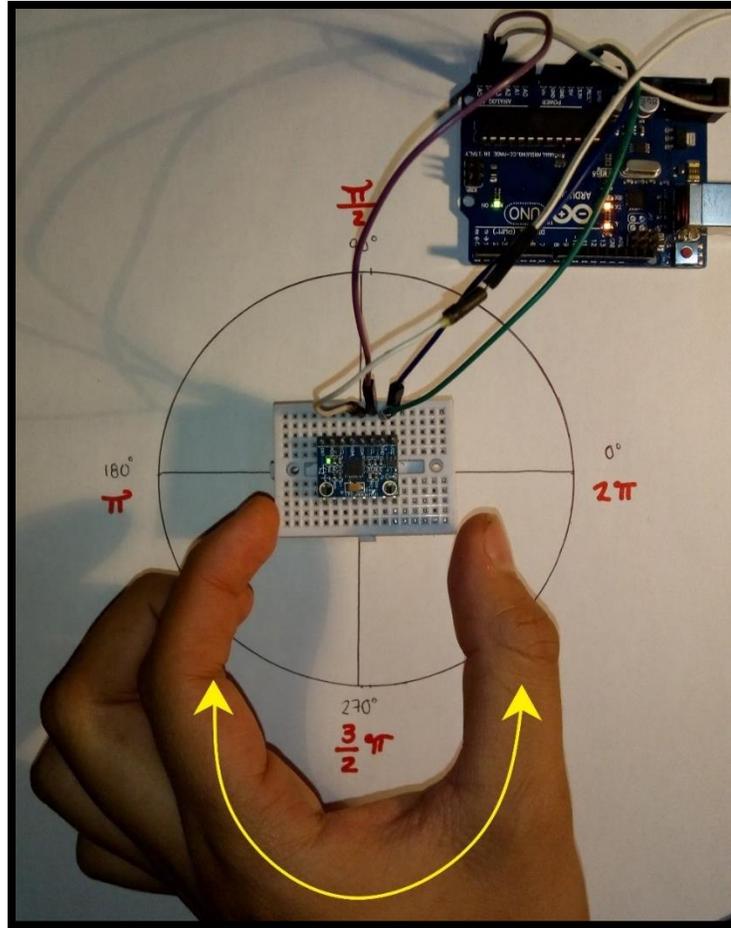


Figura 28. Prueba de rotación del sensor MPU-6050 para el yaw.

Primero se giró el sensor a 90° y las lecturas obtenidas se muestran en la Figura 29. Como se puede ver, las lecturas correspondientes al ángulo yaw (G_z) arrojan un resultado que ronda los 90° , esto debido al margen de error y al hecho que las pruebas son realizadas de manera manual.

```

-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.36   Acy: -0.10   Acz: 10.06
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.08   Gy: -0.11   Gz: 0.37
-> Imp = 26.88
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.86   Acy: -0.07   Acz: 9.70
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -1.60   Gy: 18.85   Gz: 88.98
-> Imp = 26.98

```

Figura 29. Lectura con el sensor rotado a 90° para la prueba del ángulo yaw.

Se repite el experimento anterior, pero esta vez girando el sensor a 180° y se obtienen las lecturas mostradas en la Figura 30. Esta vez los resultados de G_z rondan los 180° por la razón anteriormente mencionada, por lo que se asume que las lecturas son correctas.

```
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx -0.19  Acy: -0.18  Acz: 9.97
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.32  Gy: 0.11  Gz: 0.41
-> Tmp = 26.37
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx -0.04  Acy: -2.06  Acz: 9.56
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -3.79  Gy: -8.98  Gz: 174.70
-> Tmp = 26.60
```

Figura 30. Lectura con el sensor rotado a 180° para la prueba del ángulo yaw.

En la siguiente prueba, se hizo girar el sensor el equivalente a una vuelta completa y media, y como se ve en la Figura 31, la lectura llega hasta $500^\circ/s$. Esto debido a que se programó de manera que 500° fuera el rango de medida máximo permitido en un segundo.

```
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.46  Acy: -0.68  Acz: 9.67
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -14.76  Gy: 33.22  Gz: 500.26
-> Tmp = 28.86
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx -0.58  Acy: -0.77  Acz: 10.23
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx 8.76  Gy: 0.96  Gz: -357.95
-> Tmp = 28.81
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx -0.07  Acy: 0.39  Acz: 10.07
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -6.41  Gy: 2.15  Gz: 0.18
-> Tmp = 28.77
```

Figura 31. Lectura con el sensor rotado a 540° para la prueba del ángulo yaw.

El siguiente paso es analizar la respuesta del pitch (G_y). El sensor se rotó como se muestra en la Figura 32. Esta posición sería equivalente a una vista desde un costado del automóvil.

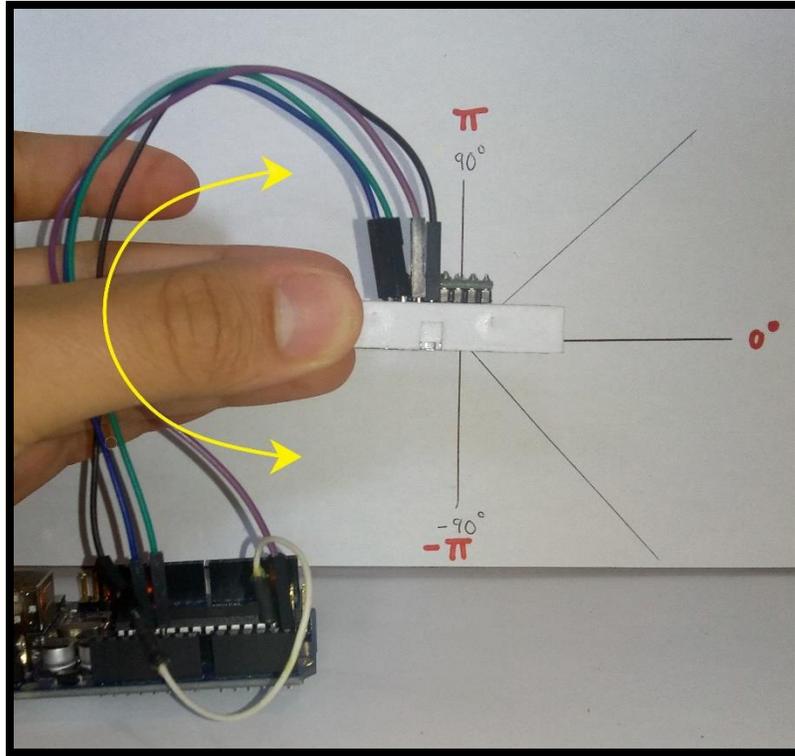


Figura 32. Prueba de rotación del sensor MPU-6050 para el pitch.

La prueba consistió en comprobar si el movimiento a 45° y 90° era correcto. En las Figuras 33 y 34, se muestran los resultados correspondientes a dichos ángulos.

```

-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 4.54  Acy: 0.11  Acz: 9.30
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.38  Gy: -0.24  Gz: -0.24
-> Tmp = 26.55
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.43  Acy: 0.12  Acz: 10.04
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -3.92  Gy: 43.77  Gz: 1.73
-> Tmp = 26.69
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx -0.26  Acy: 0.15  Acz: 10.01
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.05  Gy: -0.08  Gz: 0.38
-> Tmp = 26.69

```

Figura 33. Lectura con el sensor rotado a 45° para la prueba del ángulo pitch.

```
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx -0.70  Acy: 0.07  Acz: 10.19
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.81  Gy: 1.10  Gz: 8.43
-> Tmp = 25.14
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx -0.43  Acy: 0.17  Acz: 10.10
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.12  Gy: -0.78  Gz: 1.15
-> Tmp = 25.19
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx -1.04  Acy: 0.27  Acz: 10.55
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -13.59  Gy: 90.12  Gz: -6.56
-> Tmp = 25.14
```

Figura 34. Lectura con el sensor rotado a 90° para la prueba del ángulo pitch.

La última variable del giroscopio a considerar es el ángulo roll (Acx). Como se muestra en la Figura 35, esta posición sería equivalente a una vista desde el frente del automóvil.

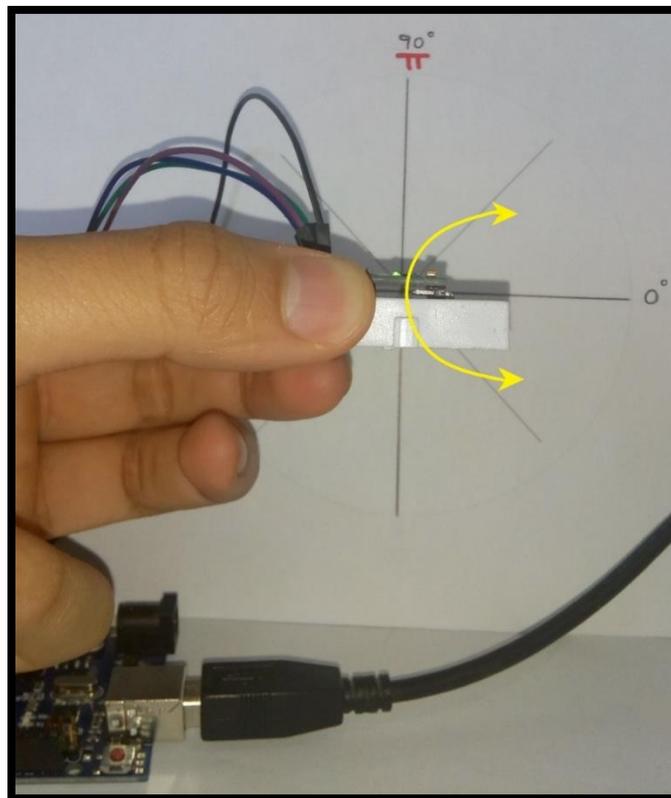


Figura 35. Prueba de rotación del sensor MPU-6050 para el roll.

La prueba consistió en comprobar si el movimiento a 45° y 90° era correcto. En las Figuras 36 y 37, se muestran los resultados correspondientes a dichos ángulos.

```
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 1.11  Acy: 0.32  Acz: 10.07
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -5.37  Gy: 0.21  Gz: 0.09
-> Tmp = 26.18
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 1.02  Acy: 1.81  Acz: 9.32
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx 43.82  Gy: 2.78  Gz: -27.94
-> Tmp = 26.27
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 1.49  Acy: 1.47  Acz: 9.94
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -2.34  Gy: 2.40  Gz: 0.37
-> Tmp = 26.27
```

Figura 36. Lectura con el sensor rotado a 45° para la prueba del ángulo roll.

```
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx -0.20  Acy: 0.62  Acz: 9.89
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx 89.57  Gy: 22.85  Gz: 14.15
-> Tmp = 26.84
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.01  Acy: 0.56  Acz: 9.99
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -34.95  Gy: -9.28  Gz: -4.75
-> Tmp = 26.84
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.31  Acy: -0.62  Acz: 10.19
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -9.21  Gy: 4.29  Gz: 1.16
-> Tmp = 26.93
```

Figura 37. Lectura con el sensor rotado a 90° para la prueba del ángulo roll.

Una vez concluida esta serie de pruebas, se puede garantizar que el sensor MPU-6050 mide correctamente los ángulos en los ejes correspondientes al giroscopio (yaw, pitch y roll).

- Termómetro

Finalmente se analizaron las lecturas correspondientes al sensor de temperatura del MPU-6050. Como se puede ver la Figura 38, la lectura de la temperatura rondaba los 26°, que correspondía a la temperatura ambiente al momento de la prueba.

```
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.06  Acy: 0.46  Acz: 10.02
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.14  Gy: -0.35  Gz: 0.46
-> Tmp = 25.94
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.06  Acy: 0.48  Acz: 10.07
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.06  Gy: -0.35  Gz: 0.27
-> Tmp = 25.85
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.03  Acy: 0.48  Acz: 9.97
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.02  Gy: -0.18  Gz: 0.50
-> Tmp = 25.89
```

Figura 38. Lecturas correspondientes a la temperatura ambiente con el MPU-6050.

La prueba consistió en acercar una fuente externa de calor (en este caso la flama de un encendedor) al sensor MPU-6050.

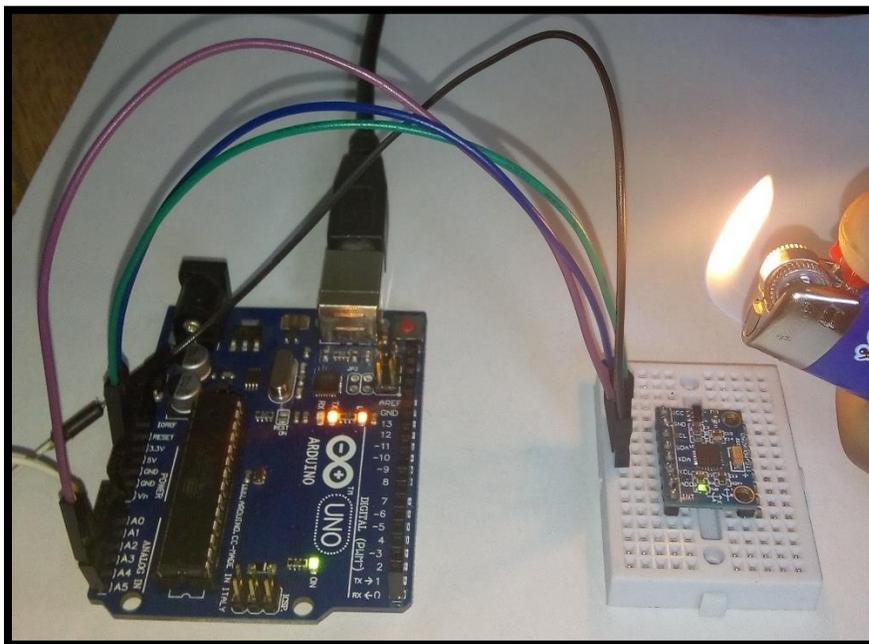


Figura 39. Prueba del sensor de temperatura con fuente de calor externa.

Como muestran las lecturas del sensor mostradas en la Figura 40, la temperatura fue aumentando de manera gradual (no se pudo dejar durante mucho tiempo la flama para cuidar los cables).

```

-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.19  Acy: 0.47  Acz: 10.01
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -3.85  Gy: 0.46  Gz: 0.61
-> Tmp = 31.82
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx -0.24  Acy: 0.55  Acz: 10.40
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.46  Gy: -0.67  Gz: 0.49
-> Tmp = 31.92
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.10  Acy: 0.48  Acz: 9.94
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.08  Gy: -0.12  Gz: 0.69
-> Tmp = 32.11
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.10  Acy: 0.37  Acz: 9.81
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.27  Gy: -0.61  Gz: 0.38
-> Tmp = 32.20

```

Figura 40. Lecturas correspondientes a la prueba de la Figura 39.

A medida que el sensor se va enfriando, sus lecturas regresan a la temperatura ambiente (Figura 41).

```

-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.13  Acy: 0.46  Acz: 9.84
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -3.95  Gy: -0.20  Gz: 0.43
-> Tmp = 31.26
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.16  Acy: 0.51  Acz: 9.90
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.00  Gy: -0.31  Gz: 0.60
-> Tmp = 31.12
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.07  Acy: 0.51  Acz: 9.97
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -3.98  Gy: -0.02  Gz: 0.38
-> Tmp = 31.07
->
-> Aceleraciones en m/s2 .      Acx 0.15  Acy: 0.46  Acz: 9.92
-> Velocidad Angular en grados/s). Gx -4.03  Gy: 0.05  Gz: 0.53
-> Tmp = 30.98

```

Figura 41. Lecturas correspondientes al enfriamiento del sensor MPU-6050.

Una vez concluida esta serie de pruebas, se puede garantizar que el sensor MPU-6050 mide correctamente la temperatura.

4.4.3 Funcionamiento SIM808

Antes de comenzar con las pruebas, se deben conectar las antenas GSM y GPS a sus bornes correspondientes en el módulo SIM808 (Figura 42).

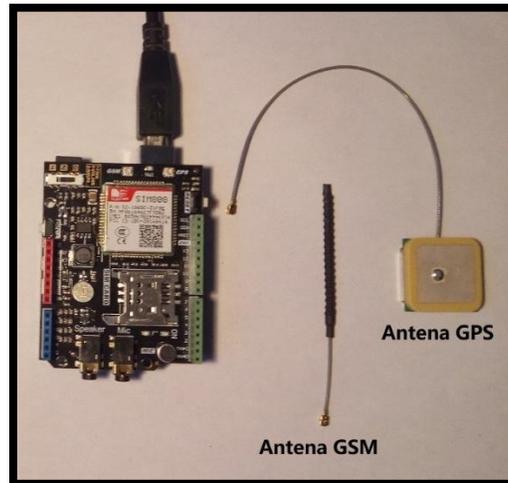


Figura 42. Antenas del módulo SIM808.

La manera de instalar el módulo SIM808, es simplemente sobreponer e introducir sus terminales sobre los bornes de conexión del Arduino, tal y como se muestra en la Figura 43.

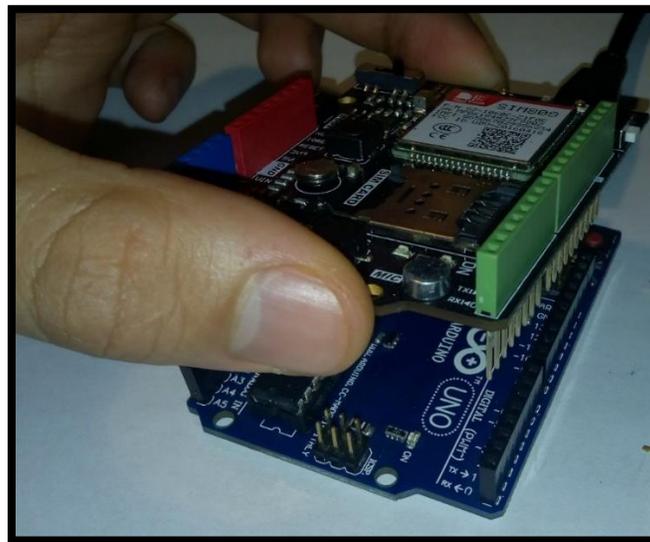


Figura 43. Instalación del módulo SIM808 sobre el Arduino

Después, se insertó la tarjeta SIM en la ranura correspondiente del módulo SIM808 como se muestra en la Figura 44.

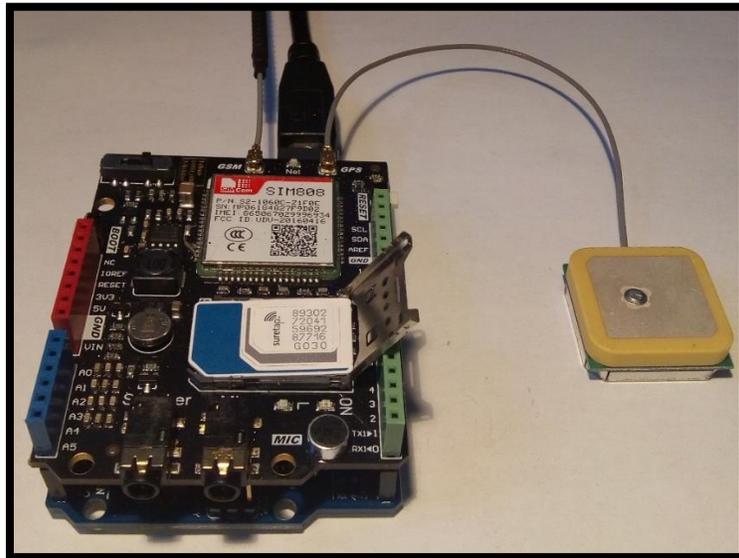


Figura 44. Instalación de tarjeta SIM en módulo SIM808.

El módulo se conectó a una fuente externa con las mismas características mencionadas en la Sección 4.4.1 (si no tiene una batería externa, el módulo no va a funcionar). Después, el led indicador de red (led azul) del módulo comenzará a parpadear de manera continua por un intervalo de 10 segundos (aproximadamente) hasta que establezca conexión con el operador de red de la tarjeta SIM. A continuación, el led indicador de conexión emitirá un destello cada 3 segundos, prueba de que está funcionando de manera correcta (Figura 45).

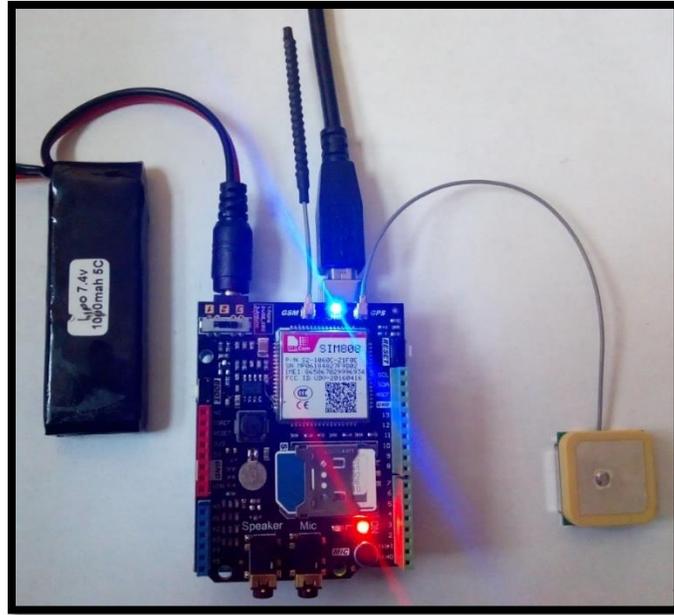


Figura 45. Módulo SIM808, operando con batería externa.

➤ GPS

Se comienza por comprobar la precisión del GPS en el módulo SIM808. Antes de realizar la prueba se debe cargar el código “GPS_Pruebas” que se encuentra en el Anexo 1 de este trabajo. Una vez ejecutado el código, le toma al módulo alrededor de 5 minutos antes de comenzar a entregar resultados confiables de latitud y longitud como se muestran en la Figura 46.

```
12:55:34.067 -> 28/5/2019|15:25  
12:55:34.103 -> latitude 1 :47.343448  
12:55:34.103 -> longitud 1 :-52.440517
```

Figura 46. Coordenadas obtenidas por el módulo SIM808.

Finalmente, los resultados obtenidos por el módulo SIM808 se pasan de coordenadas decimales a coordenadas GMS (Grados-Minutos-Segundos) para de esta manera se pueda hacer uso de la herramienta Google Maps. Una vez ingresadas las coordenadas obtenidas por el SIM808, notamos que son coordenadas existentes, aunque no del todo precisas. El

círculo verde de la Figura 47 indica el punto desde donde se realizaban las pruebas y el círculo rojo indica el lugar de las coordenadas obtenidas por el módulo.

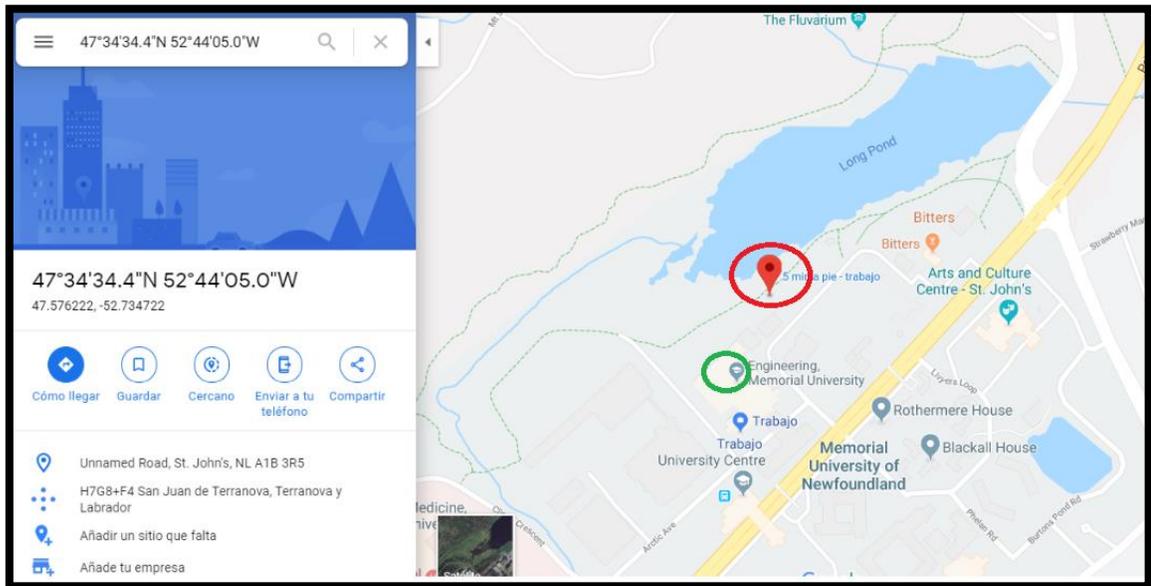


Figura 47. Visualización de las coordenadas obtenidas a través de Google Maps.

Se realizó el mismo tipo de prueba utilizando diferentes operadores telefónicos como lo fue A&T, Rogers, Bell y Hologram, obteniendo un resultado de precisión muy similar. A pesar de que la precisión no es exacta, el fabricante indica en su modo de operación que siempre existirá un rango de error que depende de factores como el clima, la calidad del servicio ofrecido por el operador o si el módulo se encuentra en un lugar cerrado.

➤ SMS

La siguiente prueba se realizó para comprobar la capacidad del SIM808 de transmitir mensajes SMS. Para ejecutar la siguiente prueba, se debe cargar al módulo el código "SMS_Prueba" que se encuentra en el Anexo 1 de este trabajo.

Una vez ejecutado el código, el puerto serial arrojó el mensaje que se muestra en la Figura 48. En este caso, se cubrió el número telefónico por motivos discrecionales.

```
-> AT
-> AT+CFUN=1
-> AT+CPIN?
-> Exito con el protocolo de inicio
-> Mandando mensaje ...
-> AT+CMGF=1
-> AT+CMGS="5215555555555555"
-> Prueba 9.1 □
```

Figura 48. Respuesta obtenida del módulo SIM808 después de ejecutar la prueba de envío de un SMS.

La respuesta obtenida tarda aproximadamente entre 10 y 30 segundos en llegar al destinatario (se realizaron pruebas de Canada-Canada y Canadá-México). Para concluir con esta prueba, se comprobó que el contenido del mensaje llegó correctamente al número del receptor como se muestra en la Figura 49.

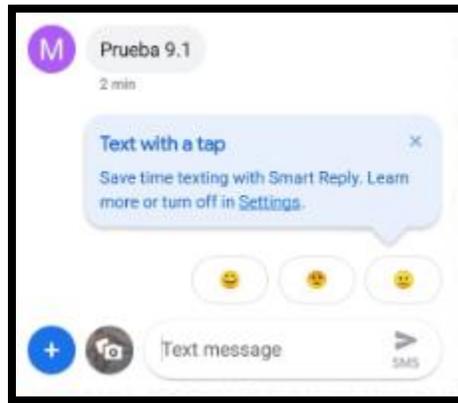


Figura 49. Respuesta obtenida en el teléfono del receptor.

Con el éxito de esta prueba, se asegura el correcto funcionamiento de la función SMS del SIM808.

➤ HTTP

A medida que se fueron realizando las pruebas como se ha ido mostrando en este trabajo, se creó un código único para contener las características de las pruebas anteriores. De esta manera, al llegar al punto de la configuración HTTP se observó que la memoria flash del microcontrolador había llegado a desbordarse a más del 100% como se muestra en la Figura 50. Según las recomendaciones del fabricante, la memoria del microcontrolador no debe irse ocupando rebasar el 70% de su capacidad, ya que después de este punto se pueden presentar problemas de estabilidad.

```
Error compilando para la tarjeta Arduino/Genuino Uno.  
  
El Sketch usa 15692 bytes (48%) del espacio de almacenamiento de programa. El máximo es 32256 bytes.  
Las variables Globales usan 2262 bytes (110%) de la memoria dinámica, dejando -214 bytes para las variables locales. El máximo es 2048 bytes.  
No hay suficiente memoria, ver http://www.arduino.cc/en/Guide/Troubleshooting#size para obtener consejos sobre cómo optimizar su código.  
Error compilando para la tarjeta Arduino/Genuino Uno.
```

Figura 50. Alerta de memoria flash rebasada.

Para intentar solucionar este problema, se acudió a la página sugerida por el IDE para seguir las recomendaciones del fabricante, en donde sugiere cómo volver más eficiente el código. Una vez realizados dichos procesos se alcanzó una ocupación del 84% en la memoria flash como se muestra en la Figura 51. Sin embargo, sigue estando por encima del 70%.

```
Compilado  
El Sketch usa 15762 bytes (48%) del espacio de almacenamiento de programa. El máximo es 32256 bytes.  
Las variables Globales usan 1734 bytes (84%) de la memoria dinámica, dejando 314 bytes para las variables locales. El máximo es 2048 bytes.  
Poca memoria disponible, se pueden producir problemas de estabilidad.
```

Figura 51. Memoria flash después de las modificaciones sugeridas por el fabricante.

Para fines de eficiencia del prototipo, se dejará de lado la opción de la trama HTTP al servidor, debido a que el porcentaje consumido por la función de TCP/IP es de 57% de la memoria flash, esto sin ser adaptado a las necesidades del código actual. Por este motivo y con el principal objetivo de cuidar la estabilidad en las lecturas y el funcionamiento del microcontrolador, se descarta por el momento esta opción, aunque se seguirá dejando indicada en la arquitectura para trabajos futuros.

Solo para comprobar que el envío de la trama es viable, se comprobó con ayuda de la herramienta *serial debugger* del proveedor DFRobot (El software se puede descargar consultando [47]).

La función de la herramienta es mediante comandos AT y no mediante código en C. La función del debugger es mandar los comandos AT al microcontrolador, desde donde se mandarían las instrucciones de ejecución al módulo SIM808 (Figura 52).

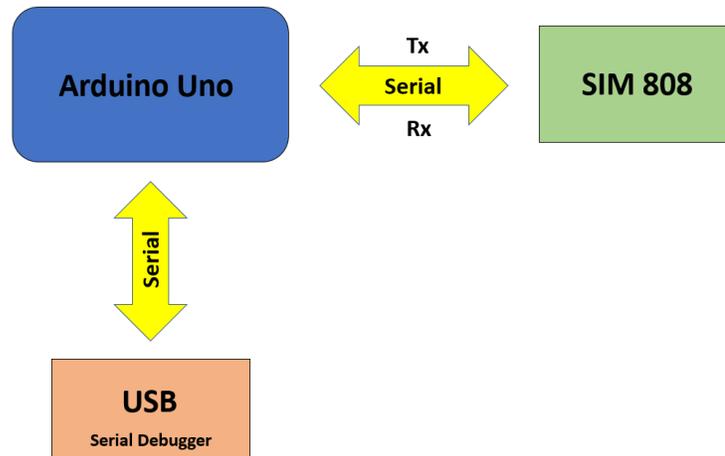


Figura 52. Esquema de funcionamiento para el *serial debugger*.

Lo primero es comprobar que el módulo tenga conexión a internet y para esto nos ayudaremos del cmd (command o comando en español) para conocer la IP pública de alguna página web, en este caso utiliza la página de la institución como se muestra en la Figura 53.

```
C:\Users\dilan>ping www.ipn.mx
Haciendo ping a ipn.mx [148.204.103.43] con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 148.204.103.43: bytes=32 tiempo=18ms TTL=247
Respuesta desde 148.204.103.43: bytes=32 tiempo=23ms TTL=247
Respuesta desde 148.204.103.43: bytes=32 tiempo=18ms TTL=247
Respuesta desde 148.204.103.43: bytes=32 tiempo=20ms TTL=247

Estadísticas de ping para 148.204.103.43:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
              (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
    Mínimo = 18ms, Máximo = 23ms, Media = 19ms
```

Figura 53. Prueba para obtención de IP.

Una vez obtenida la IP y utilizando el comando "TCAT+CIPSTART=P","148.204.103.43","80" comprobaremos si es posible establecer conexión con dicha página. Lo que realiza el anterior comando es simplemente establecer conexión con la página a través del puerto 80. Como se puede ver en la Figura 54, se estableció con éxito la conexión.

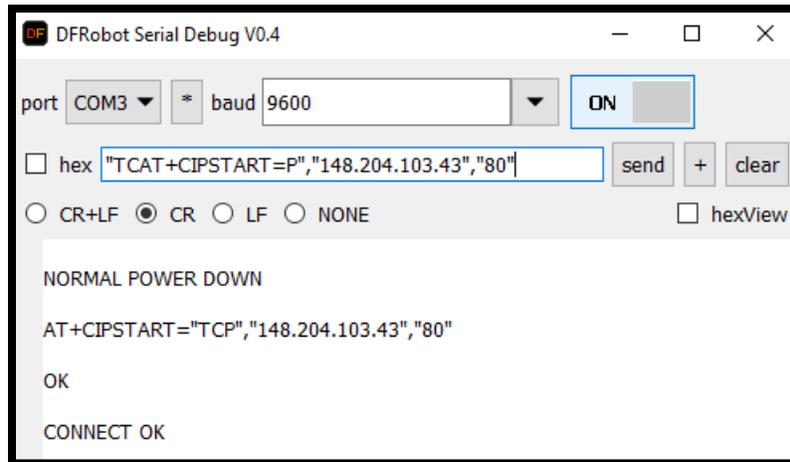


Figura 54. Conexión exitosa del prototipo a una página web.

Lo siguiente después de establecer la conexión, es utilizar el comando AT+CIPSEND para solicitar el envío de información. Si aparece el símbolo >, indica que el canal está disponible para enviar información. Después de 10 segundos sin transmitir nada, el canal se cierra de manera automática.

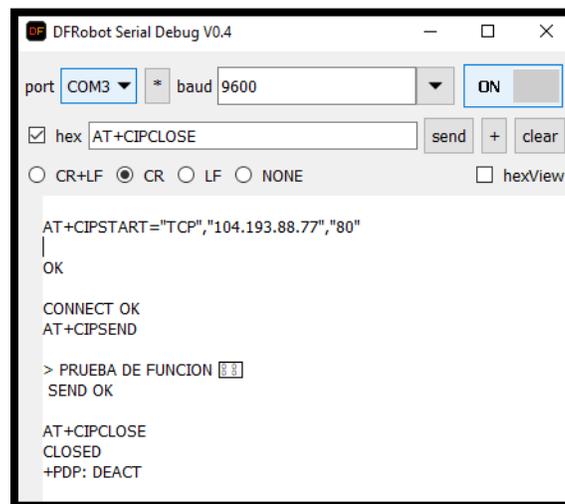


Figura 55. Prueba de envío de mensaje TCP.

Si el servidor tiene el puerto bloqueado o no está disponible para recibir dicho mensaje, aparecerá un mensaje de *ERROR*.

4.5 Efectos lesivos al cuerpo humano durante un accidente vehicular

Cuando ocurre un accidente automovilístico, los ocupantes son protegidos principalmente por la seguridad activa y pasiva del vehículo. Sin embargo, no toda la fuerza liberada durante el accidente es disipada y/o absorbida por estos sistemas. Es así como, dependiendo de la fuerza generada en el impacto, la diferencia de velocidad entre los cuerpos involucrados en el accidente y la posición de dichos cuerpos al momento del impacto, el cuerpo humano puede sufrir distintos niveles de lesiones.

El cuerpo humano tiene tolerancia a distintas magnitudes de fuerzas G. Esto lo vemos desde un simple estornudo, que genera una fuerza de 2Gs, hasta algunas atracciones de parques de diversiones que pueden ejercer una fuerza de entre 2.5Gs y 3Gs. Pero en un choque automovilístico es diferente, en primer lugar, por la aceleración o desaceleración que ocurre al momento del impacto (esto depende si es el vehículo proyecta a otro o si el vehículo recibe el impacto) y, por otra parte, porque la magnitud de la **fuerza del golpe** será en proporción a la masa del vehículo y la citada aceleración.

Distintos estudios como *“Do whiplash injuries occur in low-speed rear impacts?”*, *“Influence of crash severity on various whiplash injury symptoms: a study based on real-life rear-end crashes with recorded crash pulses”* y ensayos realizados por Forcon (una prestigiosa empresa de ingeniería forense en distintas áreas), coinciden en que el cuerpo humano puede comenzar a presentar lesiones en cuello y cervical en accidentes a partir de $8 \frac{km}{h}$. Tomando en cuenta estos estudios, éste es el umbral mínimo que se estableció en este trabajo para la generación de alertas, como se muestra en la Tabla 2. Se tomó un criterio de pasos de 4 en 4 $\frac{km}{h}$ para fines demostrativos y experimentales, debido a que la capacidad que aquí fue programada para el sensor es de hasta $\pm 4Gs$ [48]–[51].

Velocidad del vehículo		Aceleración-Desaceleración producida por un impacto a dicha velocidad		
Velocidad en $\frac{km}{h}$	Velocidad en $\frac{m}{s}$	Aceleración en $\frac{m}{s^2}$	Aceleración en fuerzas G	Escala de impacto
8 km/h	2.2 m/s	14.8 m/s^2	± 1.5 G	Nivel 1
12 km/h	3.3 m/s	22.2 m/s^2	± 2.26 G	Nivel 2
16 km/h	4.4 m/s	29.6 m/s^2	± 30.2 G	Nivel 3
20 km/h	5.5 m/s	37 m/s^2	± 3.77 G	Nivel 4

Tabla 2. Tabla de intensidad de impacto.

En la Tabla 2, se muestra en la primera columna la velocidad que debe experimentar el vehículo y en la segunda columna su equivalencia en m/s. En la columna 3, se muestra la aceleración o desaceleración (si es el que impacta sufriría una desaceleración y si fuera el cuerpo impactado sería una aceleración) generada al impactar contra un objeto en $\frac{m}{s^2}$ y en la columna 4 su equivalencia en fuerzas G. Para finalizar, en la última columna se establece el criterio de intensidad de choque propuesto (este criterio fue creado para fines demostrativos).

4.5.1 Pruebas ejecutadas para la simulación

Para la realización de las pruebas, se tomará como referencia las ejecutadas por NCAP de choque frontal y lateral (a menor velocidad), en donde se ponen a prueba y evalúan los sistemas de seguridad de los vehículos, además de dos casos especiales en donde se contempla la posibilidad de que el vehículo se encuentre volcado. Esto ayudará a los servicios de emergencia antes de llegar al lugar del accidente a llevar el equipamiento necesario para el rescate, y así aprovechar la hora de oro.

Para los dos casos especiales, se contemplaron los siguientes tres criterios.

- Primer criterio especial .

Si el sensor detecta un promedio de lecturas de entre $-9.30 \frac{m}{s^2}$ a $-10 \frac{m}{s^2}$ en la aceleración del eje z durante 10 segundos, se enviará un mensaje de alerta. Esto debido a que este rango de lecturas solo se presenta cuando el automóvil se encuentra en la posición mostrada en

la Figura 56. Dicho signo, rango de tiempo y magnitud se establecen para evitar falsas alarmas y tomando en cuenta el rango de error en el sensor, establecido por el fabricante.

Aceleraciones en m/s2.	Acx 0.21	Acy: -0.10	Acz: -9.87
Aceleraciones en m/s2.	Acx 0.18	Acy: -0.10	Acz: -9.76
Aceleraciones en m/s2.	Acx 0.23	Acy: -0.07	Acz: -9.77
Aceleraciones en m/s2.	Acx 0.21	Acy: -0.07	Acz: -9.77
Aceleraciones en m/s2.	Acx 0.17	Acy: -0.08	Acz: -9.75
Aceleraciones en m/s2.	Acx 0.25	Acy: -0.17	Acz: -9.67



Figura 56. Lecturas correspondientes al automóvil en posición del primer criterio especial.

- Segundo criterio especial

Se establecen los mismos criterios, con la diferencia de que esta vez se tomaron en cuenta dos posiciones correspondientes al rango permisible que va de $-9.6 \frac{m}{s^2}$ a $-10 \frac{m}{s^2}$ y de $9.6 \frac{m}{s^2}$ a $10 \frac{m}{s^2}$ en las lecturas correspondientes a la aceleración del eje y. Dicho rango de lecturas corresponde a la posición mostrada en la Figura 57.

Aceleraciones en m/s2.	Acx 1.20	Acy: -9.72	Acz: -0.33	Aceleraciones en m/s2.	Acx 0.95	Acy: 9.91	Acz: -0.63
Aceleraciones en m/s2.	Acx 1.14	Acy: -9.73	Acz: -0.32	Aceleraciones en m/s2.	Acx 1.05	Acy: 9.87	Acz: -0.68
Aceleraciones en m/s2.	Acx 1.23	Acy: -9.61	Acz: -0.18	Aceleraciones en m/s2.	Acx 1.15	Acy: 9.81	Acz: -0.59
Aceleraciones en m/s2.	Acx 1.16	Acy: -9.80	Acz: -0.35	Aceleraciones en m/s2.	Acx 1.06	Acy: 9.93	Acz: -0.82
Aceleraciones en m/s2.	Acx 1.17	Acy: -9.82	Acz: -0.39	Aceleraciones en m/s2.	Acx 1.11	Acy: 9.85	Acz: -0.68
Aceleraciones en m/s2.	Acx 1.16	Acy: -9.72	Acz: -0.27	Aceleraciones en m/s2.	Acx 1.05	Acy: 9.88	Acz: -0.61



Figura 57. Lecturas correspondientes al automóvil en posición del segundo criterio especial.

La manera en que se establece el criterio de 10 segundos se realizó de la siguiente manera:

$$(150 \text{ ms})(67 \text{ muestras}) = 10.05 \text{ segundos}$$

El prototipo realiza un muestreo cada 150 ms, mismo tiempo establecido en los estudios anteriormente mencionados. Además, se puede ver en las pruebas realizadas por NCAP cómo esos 150 ms son el tiempo que dura el impacto durante un accidente (véase [52]).

4.6 Arquitectura y funcionamiento de la propuesta

En la siguiente sección se plantea la lógica que sigue el prototipo para funcionar y la arquitectura física que se utiliza para el funcionamiento de éste. De esta manera, no solamente se conoce la lógica y dispositivos con los que opera el sistema, sino también es útil para sectorizar fallas y así corregirlas o mejorar otros aspectos.

4.6.1 Arquitectura lógica del funcionamiento del prototipo

La arquitectura del prototipo está básicamente conformada por tres diferentes elementos conectados entre sí, que son: Arduino Uno, sensor MPU-6050 y el módulo SIM-808, como se muestra en la Figura 58

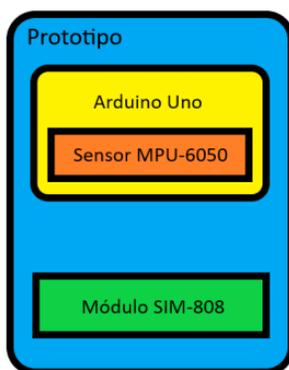
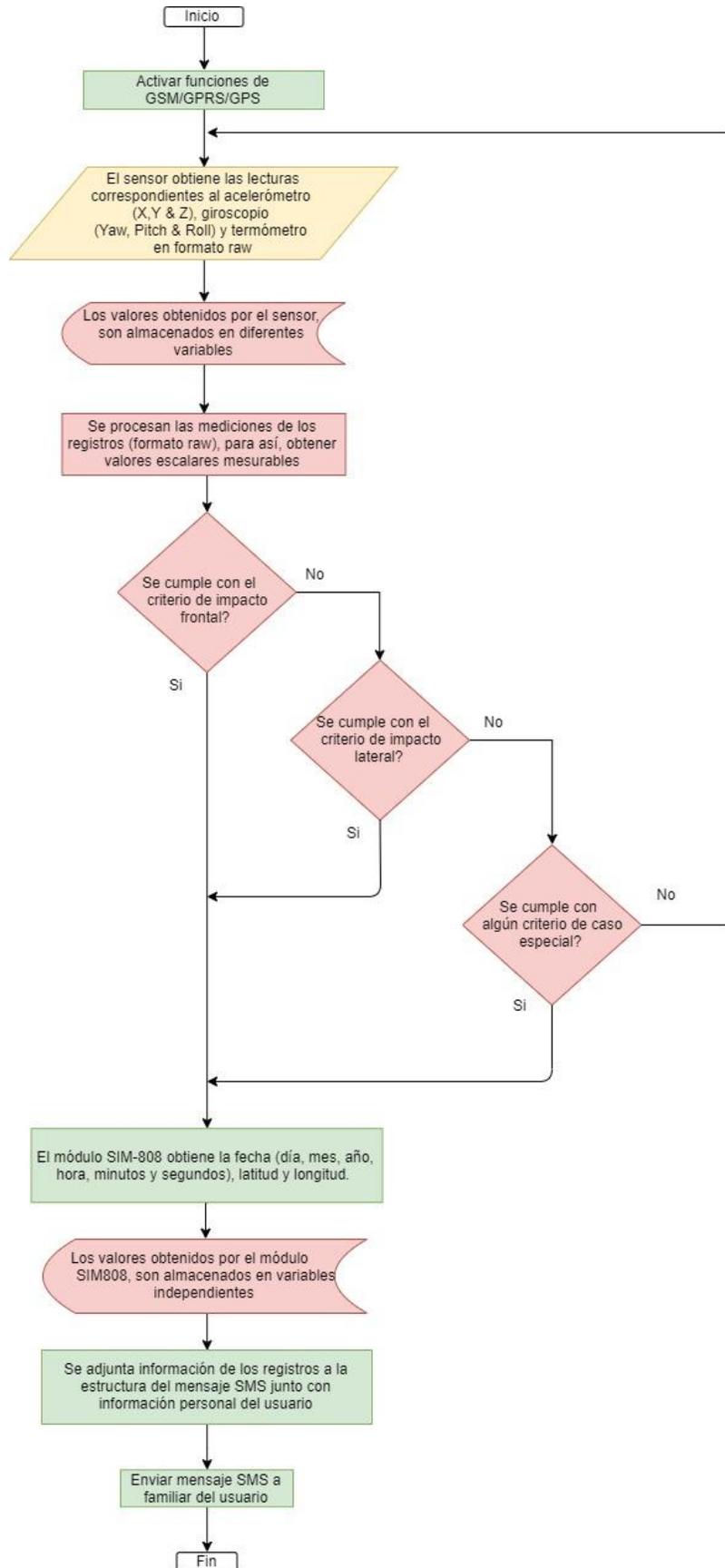


Figura 58. Arquitectura básica de los componentes del prototipo.

En el siguiente diagrama de flujo, se muestra la rutina ejecutada por el prototipo.



- En el momento que el prototipo es alimentado, los elementos involucrados realizan diferentes acciones como:
 - Arduino Uno: Alimenta a los otros dos módulos, reinicia las variables que pueda tener almacenadas y manda una señal a los otros módulos indicando la rutina que deben ejecutar.
 - Sensor MPU-6050: Toma aproximadamente 5 segundos en orientar sus ejes como se explicó en la Sección 3.4.2.
 - Módulo SIM808: Enciende la función de GSM/GPS/GPRS, esto indica que está comenzando a señalizar (como cualquier teléfono celular).
- El sensor comienza a registrar lecturas en formato raw de sus diferentes variables.
- El Arduino almacena dichas lecturas en diferentes registros y las procesa para obtener magnitudes escalares, en este caso $\frac{m}{s^2}$, $\frac{^\circ}{s}$ y $^\circ C$.
- El sensor comienza a comparar los registros con los criterios de paro cada 150 ms con excepción del tercer criterio que se realiza cada 10 segundos (cada 67 muestras, que se acumulan, promedian y comparan con el criterio de paro específico).
- Si no se cumple con ninguno de los criterios de paro, el sistema permanecerá realizando la rutina de manera continua o hasta que la batería se termine.
- En caso de que se cumpla con alguno de los criterios de paro, el Arduino solicitará al módulo SIM-808 los datos de fecha, latitud y longitud. Dicha información se almacenará en registros independientes.
- La información de los registros del SIM808 se adjuntará a un mensaje y trama escritos de manera previa.
- El mensaje SMS y la trama contendrán la siguiente información del usuario: nombre de usuario, modelo y placas del automóvil, intensidad del accidente, posición del automóvil (en caso de suceder alguno de los dos casos especiales), fecha del accidente, latitud y longitud (entre más información sea proporcionada, mejor podrá estar preparado el personal de rescate).
- Enviar un SMS a algún contacto familiar del usuario y la trama TCP/IP al servidor dedicado a personal de servicios de emergencia.
- Fin de la ejecución de rutina.

4.6.2 Arquitectura física del funcionamiento del sistema propuesto

En esta sección se explica paso a paso el proceso bajo el cual funciona el sistema. En la Figura 59 se muestra la arquitectura física empleada. El mensaje SMS utilizará la BS a la que esté enlazado en el momento del choque, después el mensaje viajará entre diferentes BS y MSCs hasta encontrar en los registros de las estaciones o centros de conmutación el número del destinatario, después el receptor recibirá el mensaje de alerta.

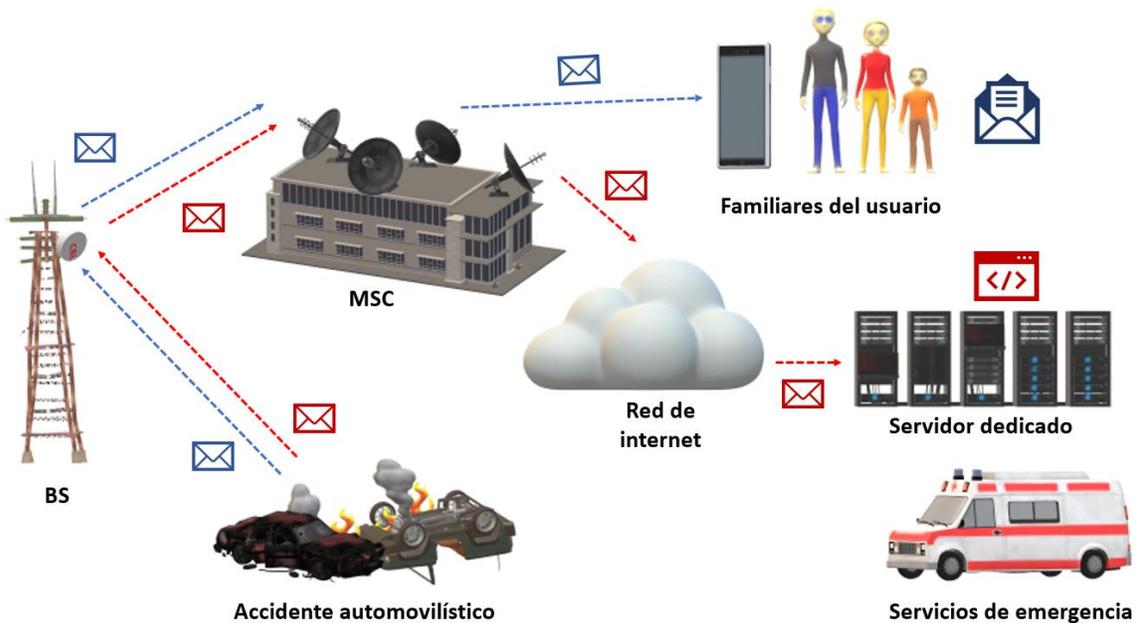


Figura 59. Arquitectura física del comportamiento del sistema.

- El prototipo se mantendrá ejecutando la rutina explicada a detalle en la Sección 4.6.1 durante todo el tiempo de operación.
- El logaritmo del prototipo está programado a manera de que los movimientos regulares de un automóvil no envíen alertas falsas.
- Cuando los parámetros del prototipo y de acuerdo con los criterios de alerta detectan un accidente, se enviarán dos mensajes casi de manera simultánea (de acuerdo con el orden de ejecución del código se estaría enviando primero el SMS y después la trama, la diferencia entre uno y otro es de apenas unos segundos).

- El mensaje SMS de rescate utilizará la infraestructura (BS y MSC) ya existente correspondiente a GSM Y GPRS para hacer llegar los dichos mensajes a sus destinatarios.
- El mensaje SMS llegarán al MSC en donde se buscará el número del destinatario entre sus registros y será dirigido a él (el destinatario es el número del familiar del usuario).

Nota del autor I: La idea es que la trama y el mensaje de texto se envíen de manera simultánea solo en el caso de que el impacto haya sido de escalas considerables como para solicitar equipos de emergencia. Pero si solo fue un impacto leve correspondiente a los primeros niveles propuestos en donde el golpe puede llegar a causar daños leves, solo se enviará el mensaje de texto para que los familiares del usuario se pongan en comunicación con él y aseguren que todo está en orden.

Nota del autor II: Debido a que durante la ejecución de las pruebas la memoria flash del Arduino sobre pasó el límite de operación, no se pudieron incluir las funciones de HTTP para enviar la trama en este trabajo.

4.7 Simulación y pruebas del dispositivo

Aquí se muestran las simulaciones a las que fue sometido el prototipo. Como se mencionó en la Sección 4.5.1, las pruebas serán muy parecidas a las realizadas por NCAP (a menor velocidad en comparación con las pruebas de NCAP debido a que son para fines experimentales), además de los dos casos especiales agregados en esta propuesta, que en su conjunto representan los accidentes automovilísticos más comunes.

El sensor debe ser fijado a la estructura del automóvil tal como se muestra en la Figura 60. De esta manera, los ejes del acelerómetro se estarán moviendo de manera coordinada con el automóvil en todo momento.

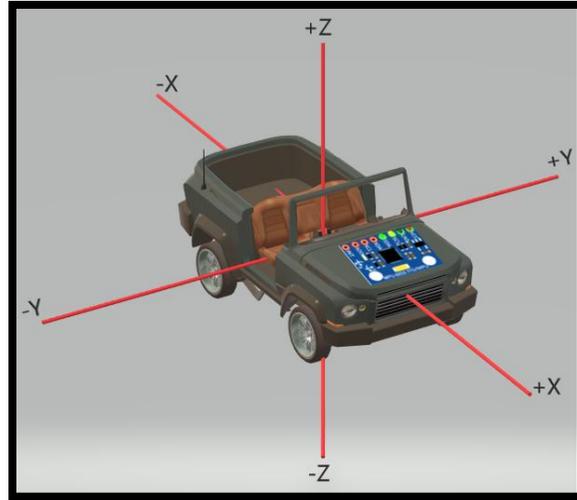


Figura 60. Ejes definidos para el prototipo.

Es importante recalcar, tal como se hizo en la Sección 3.2, que la función del acelerómetro no es medir la fuerza del impacto, sino medir el cambio de aceleración entre dos instantes de tiempo, en este caso cada 150 ms. De manera que la aceleración puede ser de magnitud positiva o negativa y la definición de la fuerza del impacto será de la siguiente manera.

$$Fuerza = m \cdot \Delta_{aceleración}$$

donde m es la masa del vehículo en kg y $\Delta_{aceleración}$ es el cambio de aceleración entre dos instantes de tiempo en $\frac{m}{s^2}$.

Ejemplo. Si consideramos el peso promedio de un automóvil mediano y la $\Delta_{aceleración}$ en $\frac{m}{s^2}$ equivalente a una velocidad constante de $16 \frac{km}{h}$ tal como se mostró en la Tabla 2, la fuerza ejercida al momento del impacto sería la siguiente:

$$Fuerza = 1200 \text{ kg} \cdot 29.6 \frac{m}{s^2} = 35,520 \text{ Newton},$$

lo cual representa una fuerza considerable.

4.7.1 Simulación y pruebas de choque frontal

Para el desarrollo de la siguiente prueba, la $\Delta_{aceleración}$ se obtiene de la manera mostrada en la Figura 61 usando un auto a escala. En dicha imagen, la figura azul representa la posición del automóvil en el instante del impacto y el segundo automóvil será la posición 150 ms después del impacto (en este caso y con la lógica explicada en secciones anteriores, la aceleración del impacto será negativa).

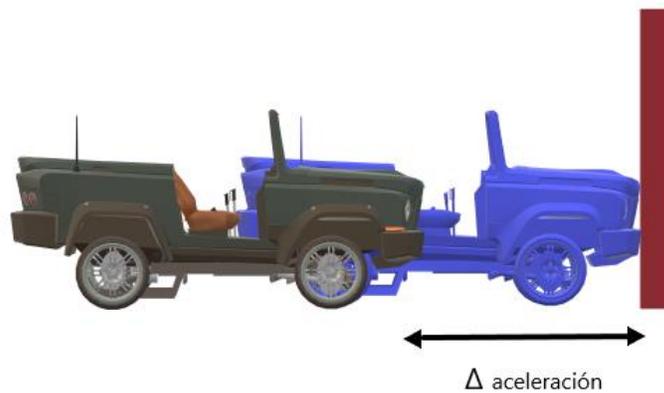


Figura 61. $\Delta_{aceleración}$ en impacto frontal.

El vehículo se colocó a una distancia de 1 metro del obstáculo como se muestra en la Figura 62.



Figura 62. Vista preliminar de la prueba de impacto frontal con el prototipo montado en un auto a escala.

La prueba consistió en proyectar el vehículo-prototipo contra un obstáculo fijo (pared) y observar los resultados obtenidos. El prototipo cuenta con un led de color blanco (Figura 63), el cual se enciende al detectar cualquier comportamiento por encima de la escala señalada en la Tabla 2.



Figura 63. Vehículo-prototipo el momento del impacto.

Como se aprecia en la Figura 64, en esa prueba realizada se alcanzó un nivel de intensidad 1. En un caso real, implicaría que existe riesgo de que alguno de los tripulantes haya sufrido algún daño en el cuello o cervical.

```
Aceleracion en m/s2. Acx 3.12 Acy: -0.79 Acz: 7.20
Aceleracion en m/s2. Acx 3.72 Acy: -3.21 Acz: 8.13
Aceleracion en m/s2. Acx 2.55 Acy: -6.79 Acz: 12.33
Aceleracion en m/s2. Acx 6.46 Acy: -6.39 Acz: 6.97
Impacto frontal nivel 1
El Impacto fue de -19.35 m/s2 o -1.97 Fuerzas G
```

Figura 64. Resultados de la prueba de impacto frontal.

El comportamiento gráfico de la prueba anterior se muestra en la Figura 65.

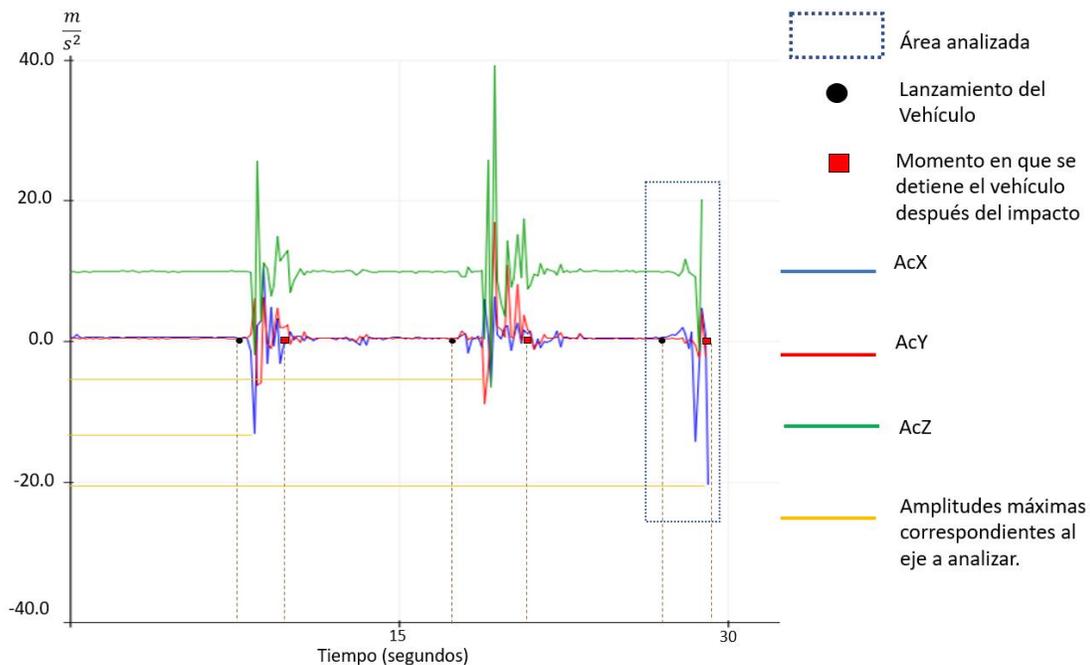


Figura 65. Análisis de la señal de la prueba de impacto frontal.

En la Figura 65 se pueden apreciar diferentes etapas durante la realización de la prueba y a continuación se explicará qué sucede en el área analizada: el comportamiento en esta sección corresponde a el momento en el que el prototipo fue lanzado con la suficiente fuerza como para emitir un mensaje de auxilio. Se puede observar que la lectura correspondiente a la aceleración en el eje X ha pasado el límite establecido en la Tabla 2, mientras que las otras lecturas, se mantienen fuera del criterio de choque frontal (para las pruebas de impacto frontal, se analiza el eje X).

Después de haber impactado a dicha intensidad, en la Figura 66 se muestra el mensaje recibido por el familiar con la información general previamente establecida y con las coordenadas aproximadas del accidente. En la misma figura y como se hizo en el capítulo de pruebas, nos apoyamos en la herramienta *google maps* para comprobar las coordenadas recibidas y así conocer la precisión de nuestro sistema.

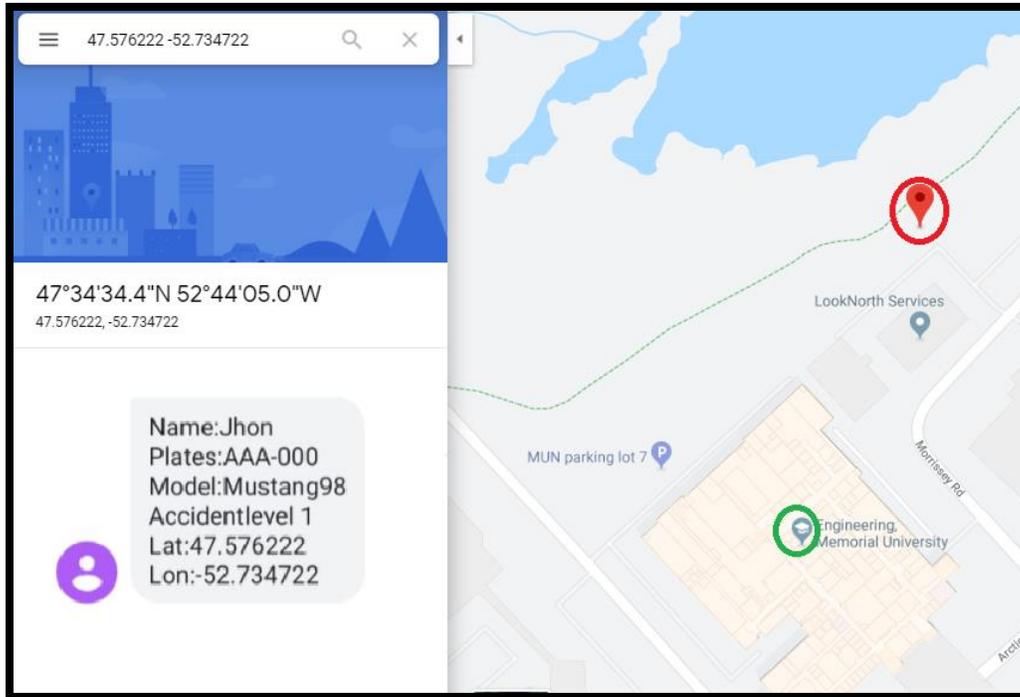


Figura 66. Mensaje recibido por el receptor después de la prueba de impacto frontal y comprobación de coordenadas.

En la figura 66, el círculo verde representa el lugar en donde se estuvieron ejecutando las pruebas y el círculo rojo representa las coordenadas correspondientes al mensaje de alerta. En este caso (y en la mayoría de las pruebas) la precisión no fue exacta, pero la distancia es aún viable para avistar un vehículo accidentado. En este caso, la distancia entre ambos puntos es de entre 200 y 250 metros aproximadamente (este margen de error se repitió en casi todas las pruebas). Como ya se explicó anteriormente, este error puede ser causado por distintos factores, además se debe considerar que las pruebas fueron ejecutadas en un laboratorio.

Como se puede apreciar, la ubicación es más precisa en comparación con las pruebas de funcionalidad de capítulos anteriores, por lo cual, se comprueba que el objetivo del prototipo ha sido logrado y se optó por realizar más pruebas a diferentes intensidades. Debido que todas las pruebas fueron realizadas en el mismo sitio, para las siguientes pruebas solo se analizará la respuesta del sistema, debido a que las coordenadas obtenidas son prácticamente las mismas.

A continuación, se procedió a realizar la misma prueba aumentando la intensidad con la que era proyectado el prototipo en la prueba anterior. Los resultados se pueden observar en las Figuras 67 y 68.

```
Aceleracion en m/s2. Acx -0.25 Acy: -0.48 Acz: 12.11  
Aceleracion en m/s2. Acx 2.19 Acy: 1.31 Acz: 9.95  
Aceleracion en m/s2. Acx 2.46 Acy: 0.10 Acz: 11.94  
Aceleracion en m/s2. Acx 12.12 Acy: -5.21 Acz: 2.68  
Impacto frontal nivel 2  
El Impacto fue de -24.39 m/s2 o -2.49 Fuerzas G  
Enviando mensaje nivel 2
```

Figura 67. Respuesta correspondiente a la segunda etapa de pruebas.

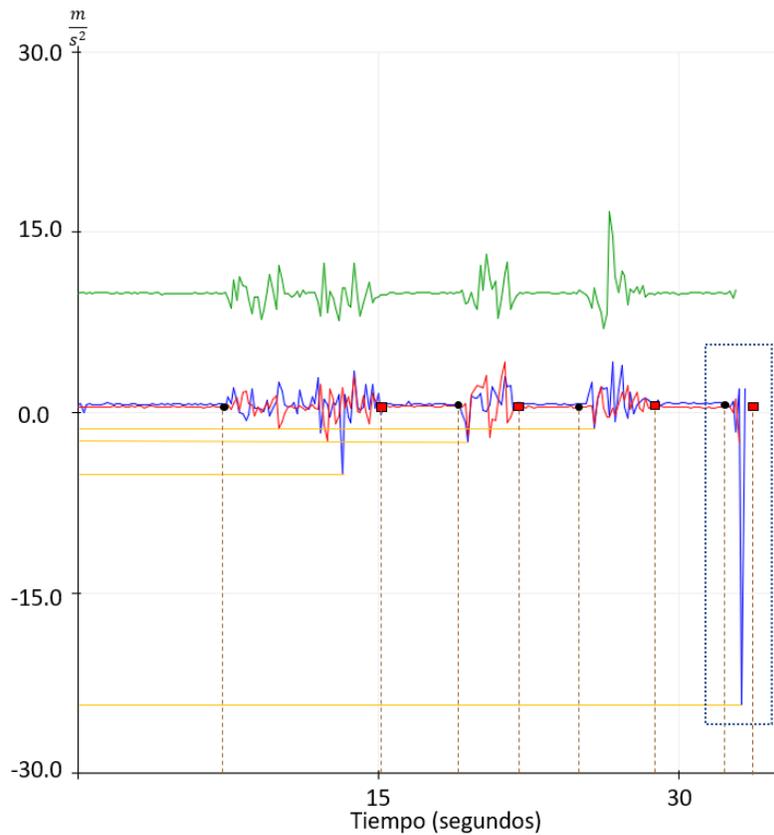


Figura 68. Respuesta gráfica correspondiente a la segunda etapa de pruebas.

La lógica de análisis para esta prueba es la misma que se siguió para la primera.

Se continuó aumentando la intensidad de lanzamiento del prototipo, obteniendo los resultados mostrados en las Figuras 69 y 70. En este caso, se alcanzó un nivel de intensidad 3.

```
Aceleracion en m/s2. Acx -0.84 Acy: 1.94 Acz: 7.21
Aceleracion en m/s2. Acx 1.45 Acy: 1.03 Acz: 16.34
Aceleracion en m/s2. Acx 1.64 Acy: 1.85 Acz: 8.96
Aceleracion en m/s2. Acx 13.98 Acy: -1.79 Acz: 15.06
Impacto frontal nivel 3
El Impacto fue de -35.33m/s2 o -3.60 Fuerzas G
Enviando mensaje nivel 3
```

Figura 69. Respuesta correspondiente a la tercera etapa de pruebas.

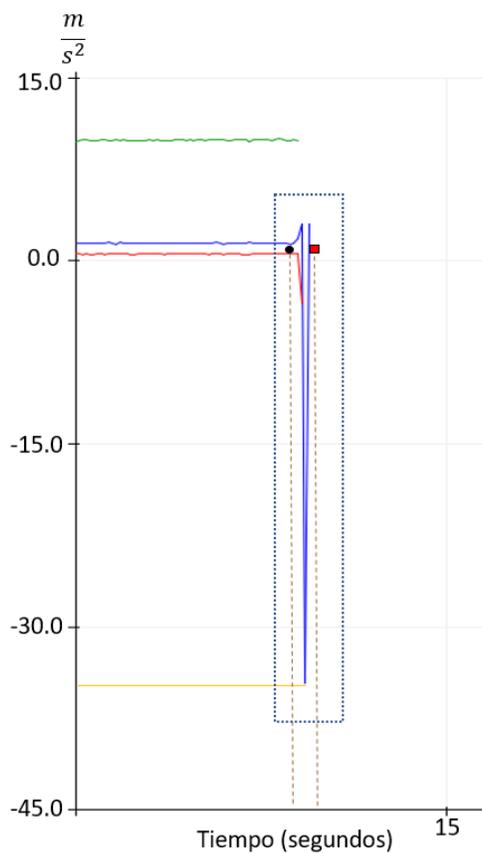


Figura 70. Respuesta gráfica correspondiente a la tercera etapa de pruebas.

Debido a que los fines del prototipo son experimentales, no se continuó aumentando la intensidad con la que el prototipo era proyectado (para su cuidado y conservación). Sin embargo, con ayuda de las pruebas anteriores, se comprueba que el prototipo es capaz de cumplir con su objetivo.

Las pruebas fueron realizadas en Canadá y se mandaron los mensajes de alerta a números telefónicos receptores en Canadá y México. El tiempo aproximado entre el envío del mensaje de alerta y la recepción, fue para ambos casos fue de entre 15 y 30 segundos (se realizaron más de 30 pruebas en total, obteniendo siempre un rango de tiempo similar).

4.7.2 Simulación y pruebas choque lateral

El prototipo es impactado por un objeto externo como se muestra en la Figura 71. En este caso, el vehículo fue golpeado con un mazo de goma del peso aproximado al del prototipo, para emular el comportamiento de un accidente lo más real posible.

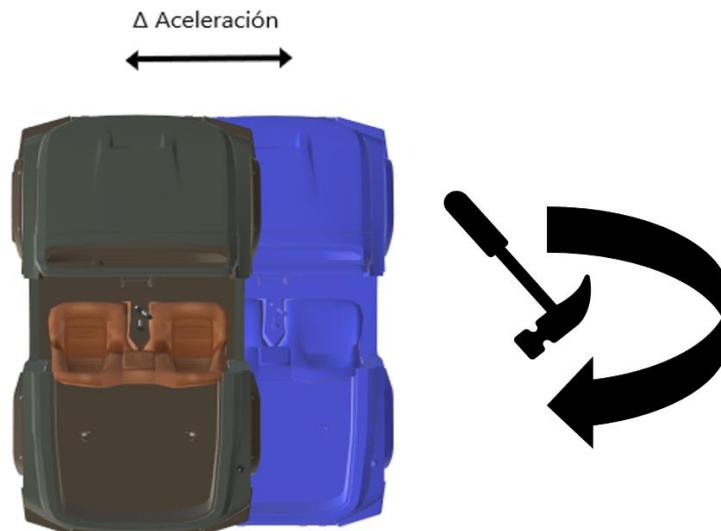


Figura 71. Esquema de la prueba de impacto lateral.

Para esta prueba (como se muestra en la Figura 71), el vehículo-prototipo fue impactado en varias ocasiones a diferentes intensidades (similares a las de la prueba de impacto frontal) por un mazo de goma en su parte lateral, pero los resultados obtenidos no fueron los esperados. Durante la realización de las pruebas se obtuvieron mensajes de alerta falsas. En ocasiones, sí indicaba el

impacto lateral y en otras enviaba una respuesta de impacto frontal. Esto se puede deber a la manera básica en que se ejecutaron las pruebas o a la falta de equipo necesario para poder simular un impacto lateral de manera más científica o similar a las pruebas ejecutadas por NCAP. Sin embargo y como se comprobó en la Sección 4.4.2, las lecturas correspondientes al eje Y —que mide el impacto lateral— son correctas.

4.7.3 Simulación y pruebas de casos especiales

Como se mencionó en la Sección 4.5.1, si el sistema detecta las posiciones correspondientes a una volcadura por más de 10 segundos, enviará una alerta indicando además de la información general del usuario, la posición del vehículo.

Para realizar la simulación del primer caso especial, el prototipo se coloca en la posición mostrada en la Figura 72.



Figura 72. Posición del vehículo-prototipo para la prueba de primer caso especial.

Las últimas lecturas correspondientes a la prueba de primer caso especial se muestran en la Figura 73.

```
Aceleracion en m/s2. Acx 1.03 Acy: -0.17 Acz: -9.72
Aceleracion en m/s2. Acx 1.02 Acy: -0.18 Acz: -9.91
Aceleracion en m/s2. Acx 0.93 Acy: -0.13 Acz: -9.86
Aceleracion en m/s2. Acx 0.97 Acy: -0.13 Acz: -9.75
El automovil esta de cabeza
Enviando mensaje, caso especial 1
```

Figura 73. Lecturas correspondientes a las pruebas de primer caso especial.

Gráficamente podemos observar su comportamiento en la Figura 74.

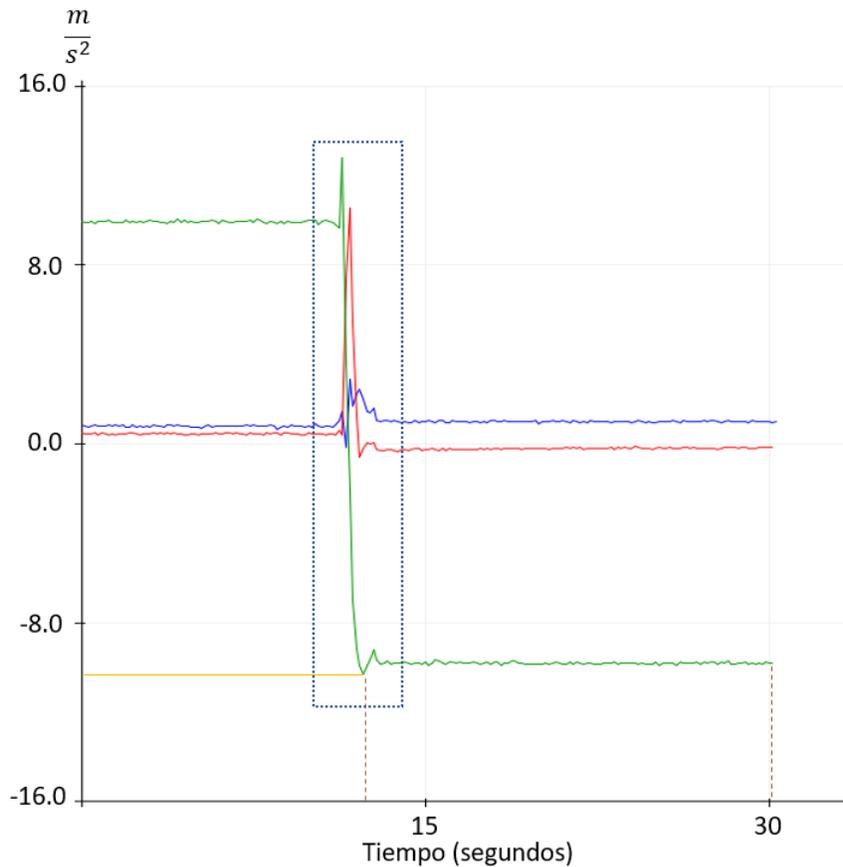


Figura 74. Respuesta gráfica correspondiente a la prueba de caso especial 1.

Como se aprecia en la Figura 74, la primera parte de la gráfica corresponde a la posición del vehículo en posición normal, después de 10 segundos, el vehículo se colocó de cabeza. El recuadro de área a analizar corresponde a las lecturas correspondientes al eje Z obtenidas al momento en el que el carro es volteado y, como se puede ver, el sistema se detiene después de un lapso de entre aproximadamente 18 y 20 segundos. A pesar de que el algoritmo está diseñado para mandar una alerta después de haber estado 10 segundos en esta posición, en general le tomó más tiempo, debido a que como ya se explicó anteriormente, se hace un promedio de lecturas para cada eje. Sin embargo, en todas las pruebas realizadas con la misma metodología, no pasaron más de 20 segundos después de que se giró, para que el mensaje de alerta fuera enviado.

Siguiendo el procedimiento que se siguió en la prueba de impacto frontal, en la Figura 75 se muestra el mensaje de alerta recibido y con ayuda de la herramienta *Google maps*, se comprobó la ubicación de las coordenadas obtenidas.

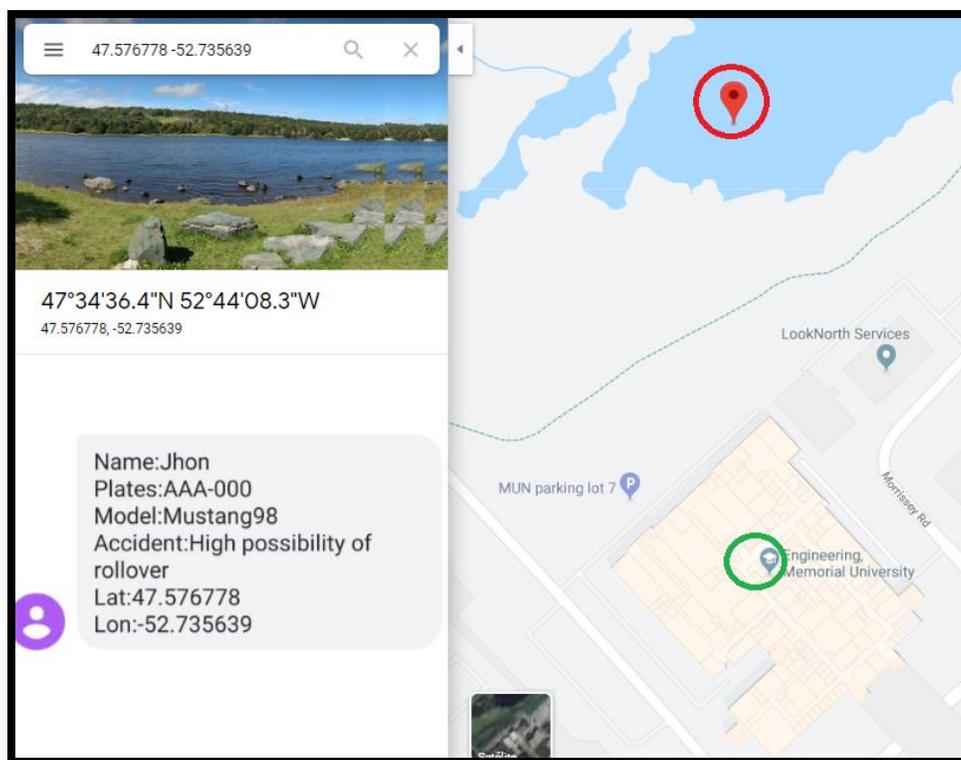


Figura 75. Mensaje recibido por el receptor después de la prueba de impacto frontal y comprobación de coordenadas.

Siguiendo la misma simbología de la Figura 65, para esta prueba se ve en el círculo verde el lugar en donde se estuvieron realizando las pruebas, y el círculo rojo corresponde al punto de las coordenadas obtenidas en el mensaje de alerta.

Para el resto de las pruebas de caso especial, y siguiendo la misma lógica de impacto frontal, las coordenadas para las pruebas variaron en un rango de entre 200 y 250 metros por motivos ya explicados en secciones anteriores, por lo que, para las siguientes pruebas, solo se hizo el análisis de la señal de respuesta, debido a que el mensaje de alerta y las coordenadas eran prácticamente las mismas ya que las pruebas se realizaron en el mismo laboratorio.

Para realizar la simulación del segundo caso especial, el prototipo se colocó en la posición mostrada en la Figura 76.



Figura 76. Posición del vehículo-prototipo para la prueba de segundo caso especial.

Siguiendo la misma lógica del caso especial 1, se obtienen los siguientes resultados, mostrados en la Figura 77.

```
Aceleracion en m/s2. Acx 0.97 Acy: 9.85 Acz: -1.07
Aceleracion en m/s2. Acx 1.07 Acy: 9.83 Acz: -1.02
Aceleracion en m/s2. Acx 1.01 Acy: 9.86 Acz: -0.93
Aceleracion en m/s2. Acx 1.07 Acy: 9.81 Acz: -0.90
El automovil esta sobre volteado sobre uno de sus lados
Enviando mensaje, caso especial 2
```

Figura 77. Lecturas correspondientes a las pruebas de segundo caso especial.

La representación gráfica correspondiente a las pruebas del caso especial 2, se muestran en la Figura 78.

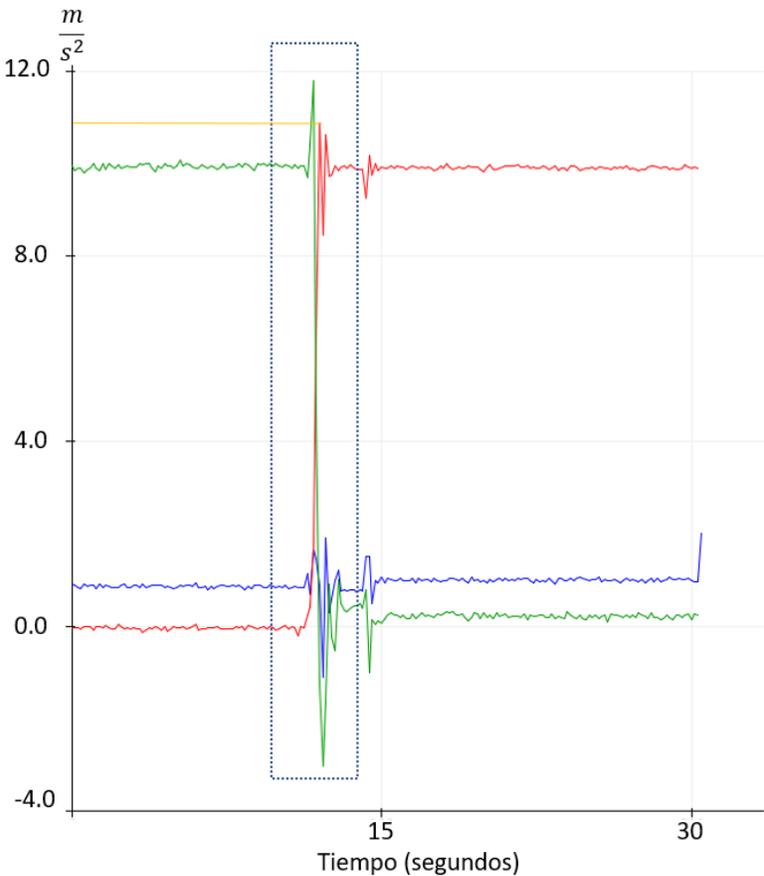


Figura 78. Respuesta gráfica correspondiente a la prueba de caso especial 2.

La simbología correspondiente al caso especial 2 sigue siendo la misma que para casos anteriores, con la diferencia de que en este caso se analizará el eje Y. Para esta prueba (al igual que en el caso especial 1) el vehículo prototipo se mantuvo en su posición normal durante 10 segundos. Después se cambió de posición como se mostró en la Figura 76 y posteriormente, después de un lapso no mayor a 20 segundos, se detiene el sistema mandando el mensaje de alerta. El área por analizar en la Figura 78 corresponde a la variación que experimenta el vehículo-prototipo al ser cambiado de posición, en donde se ve que esta vez es el eje Y el que experimenta dicho cambio.

CAPÍTULO V

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

Al concluir este trabajo de investigación, se llegó a las siguientes conclusiones.

- El prototipo opera correctamente para redes 3G y 4G, sin embargo el sistema también estará listo para utilizarse cuando se comience con el despliegue de 5G. El único requerimiento que se necesitaría para que el prototipo pueda operar, sería la implementación de un SIM con capacidad de conectarse a dicha red. Otra cosa importante de resaltar es que el programa no requeriría ninguna modificación.
- Para que en un futuro el prototipo pueda ser más viable, se debe implementar el uso de un microcontrolador con mayor capacidad de al menos el triple de memoria flash del que se utilizó para esta propuesta, ya que de esta manera se podrán incluir las funciones de HTTP y SMS al momento del impacto. La implementación de un microcontrolador con mayor capacidad de memoria también dará la posibilidad de poder utilizar las funciones del giroscopio y termómetro para establecer otros criterios de alerta.
- La opción de enviar una trama TCP fue implementada, debido a que incluso sin esta función el microcontrolador ya había superado el límite sugerido de uso de su memoria flash (116%) cuando incluso las recomendaciones del fabricante sugieren que no supere el 70% para evitar problemas de estabilidad en el funcionamiento. Siguiendo las recomendaciones de los asesores y el fabricante, se logró reducir el uso de la memoria flash hasta un nivel más aceptable de operación (76%). Otro de los aspectos tomados en cuenta para elegir la opción del mensaje SMS sobre el envío de la trama, fue la cobertura para redes GPRS en el territorio nacional.
- El motivo por el cual no se ejecutaron pruebas de envío de datos TCP con la información correspondiente al acelerómetro, es debido a que el código de ejecución de la plantilla TCP utiliza 57% de la memoria flash (sin realizar modificaciones) y las funciones del MPU-6050 utilizan 42% de dicha memoria, por lo que se repetiría el mismo error de sobrepasar el 70%. A pesar de dicho problema, se pudo comprobar con ayuda del *DFRobot debugger* que si es posible establecer conexión a una página web y enviar información. Otro dato importante a resaltar es que cuando se intentaba establecer conexión con alguna dirección IP en

formato IPV6, el microcontrolador no tenía la capacidad para manejar ese protocolo, por lo que si se desea implementar la función del envío de la trama en un futuro, el prototipo no será capaz de establecer conexión debido a que la tendencia es migrar todas las direcciones de IPV4 a IPV6, por lo que se requeriría un shield que tenga la capacidad de manejar direccionamiento IPV6. Lo anterior mencionado, fue otro de los motivos por los cuales se decidió descartar dicha opción, ya que a largo plazo la viabilidad de SMS es superior, debido a que no se tienen noticias de dejar de utilizar o inhabilitar la función SMS.

- Por una parte, se tiene a la Unión Europea realizando sus propios estándares y recomendaciones para la seguridad vehicular y por otra, a la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) en Estados Unidos, apostando por el desarrollo de redes VANET. A pesar de que esto pueda parecer una desventaja para los desarrolladores e investigadores, realmente es una ventaja, porque la falta de estandarización para este tipo de sistemas proporciona un margen mucho más amplio para el desarrollo de pruebas y prototipos innovadores.
- A pesar de que se tiene la creencia de que el uso de SMS se ha dejado de lado como medio de comunicación rápida, éste sigue siendo utilizado en la actualidad para notificar. Sus actuales aplicaciones van desde la notificación (a manera de recordatorio) de pagos y servicios, hasta la autenticación de cuentas personales como el correo electrónico y Facebook; además de que sigue siendo utilizado como medio de comunicación cuando no se tiene acceso a internet.
- El prototipo propuesto tiene ventajas sobre los sistemas existentes como el precio, el tamaño, la escalabilidad, el hecho de que no requiere de infraestructura extra para operar y la facilidad de instalación, sin embargo el prototipo no es tan preciso, debido a que como se comentó anteriormente tiene un rango de error respecto al punto en donde ocurrió el accidente de entre 200 y 300 metros en línea recta. Dicho problema se puede deber a que las pruebas fueron realizadas en interiores y otros factores externos que se mencionaron anteriormente.

Al final del largo viaje que viví escribiendo este trabajo, me di cuenta qué debemos poner más atención a los detalles de seguridad, no solo en el sector automotriz, sino en cada aspecto que sea posible dentro de nuestras actividades cotidianas. Esto lo digo, porque descubrí crudas realidades como el hecho de que los accidentes automotrices no solo infringen un daño directo a la economía

y moral de las personas accidentadas (y de los que los rodean), sino también, todos los daños colaterales de un accidente automovilístico como terapias médicas (en el mejor caso), operación de servicios de seguridad y restauración de daños, entre otras cosas, que tienen un alto costo para la economía de los países. Otra de las crudas realidades que descubrí al analizar las pruebas de NCAP y el equipamiento de los vehículos comercializados en México (se analizaron todos los modelos de las 5 marcas más vendidas en México, hasta junio 2018), es que nadie se ha preocupado por desarrollar sistemas como el presentado en este trabajo. El hecho es que vivimos en un mundo en el que si algo no reditúa dinero, no importa, a pesar de que con ello se puedan salvar vidas (esto se ve en diferentes campos como, por ejemplo, el energético y médico). Eso lo noté observando como todos los sistemas existentes que realizan una función similar, son clientelares, por lo cual, yo lo interpreto como “si quieres tener más posibilidades de salvar tu propia vida, debes pagar más y debes pagar una cuota mensual”. Ese fue el motivo por el cual se intentó diseñar un prototipo de bajo costo y que fuera útil sin necesidad de pagar una renta, además de que fuera operable para cualquier vehículo sin importar el año, la marca, ni el modelo ni su equipamiento de fábrica.

Por último, me gustaría enfatizar la necesidad de una visión menos comercial y mucho más humanista en la medida de lo posible, para futuras mejoras y desarrollos de cualquier campo.

5.1 TRABAJO A FUTURO

Conociendo los alcances que tuvo este proyecto, se proponen las siguientes mejoras:

- Realizar pruebas con diferentes dispositivos con el fin de mejorar la precisión y los tiempos de respuesta.
- Se sugiere la implementación de nuevas pruebas para verificar el funcionamiento del sistema.
- Realizar pruebas de medición de velocidad con rigor científico, para de esta manera obtener mejores resultados.
- Plantear la utilización de microcontroladores con una memoria flash más amplia para cumplir todas las funciones dentro del mismo algoritmo, sin descuidar el factor costo.
- El sistema, tal como se presenta, es capaz de obtener las mediciones de giroscopio y termómetro, por lo que nuevos desarrolladores podrían utilizar dichas mediciones para desarrollar nuevas pruebas, aplicaciones y criterios de alerta.
- Analizar nuevos tests de impacto lateral que ayuden a simular de mejor manera dicho accidente.
- El módulo SIM-808 cuenta una función para realizar llamadas telefónicas y micrófono que podrían ser implementadas para algún otro criterio de alerta.

ANEXO 1

A través del portal del Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT)[53], se realizó un mapeo analizando la cobertura de los dos principales operadores de telefonía móvil en México, que son AT&T y Telcel. El análisis consistió en revisar la cobertura que tiene cada uno de los operadores para los sistemas GSM (2G), UMTS para datos (3G) y LTE (4G). Este análisis se realizó para las tres principales ciudades de México (CDMX, Jalisco y Monterrey) y dos estados más (Estado de México y Oaxaca) como una posible muestra representativa del resto de los estados. Primero se analizará al operador AT&T. Es importante resaltar que para este operador solo se analizarán UMTS y LTE, debido a que no se tiene registro de su cobertura para GSM.

Ciudad de México (CDMX)

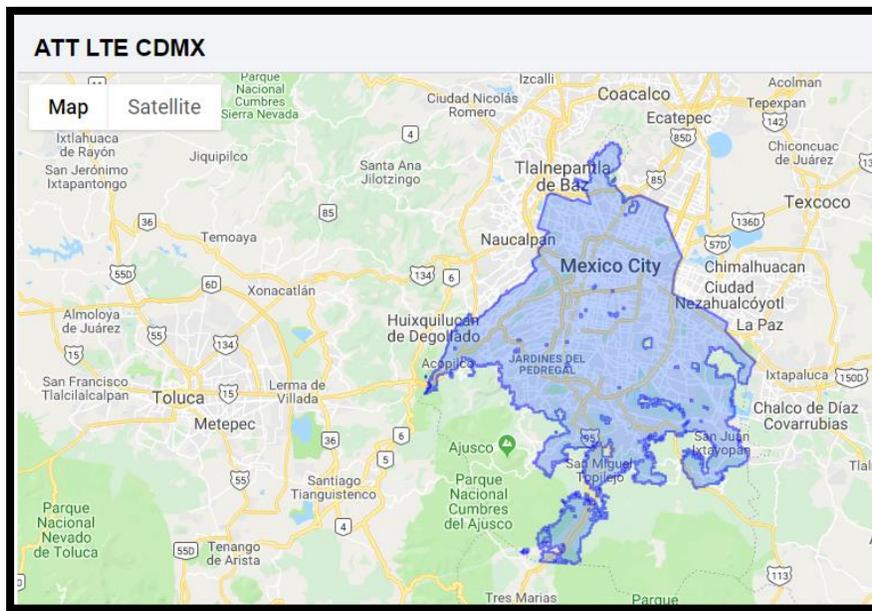


Figura 79. Cobertura de AT&T en la CDMX para LTE.

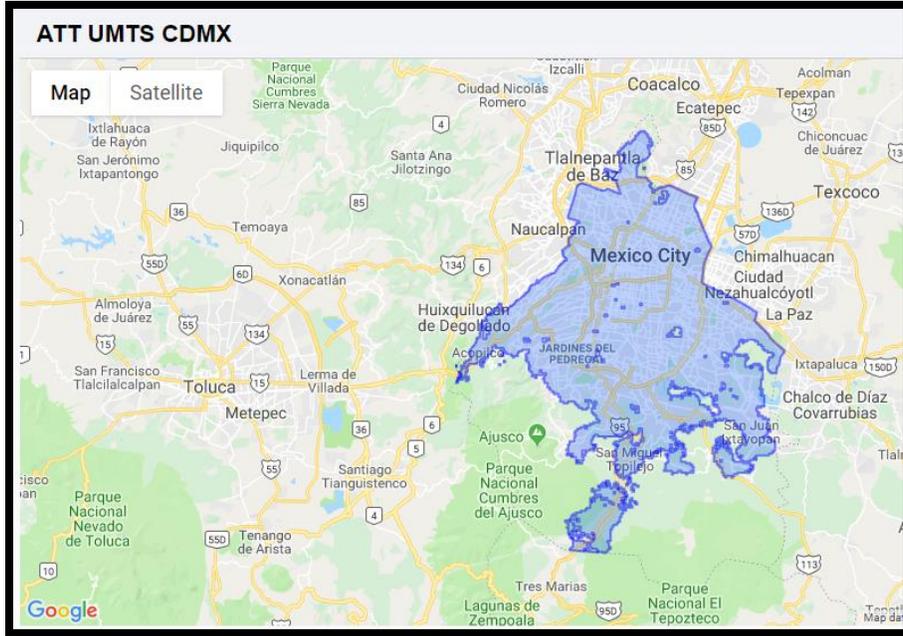


Figura 80. Cobertura de AT&T en la CDMX para UMTS.

Estado de Jalisco

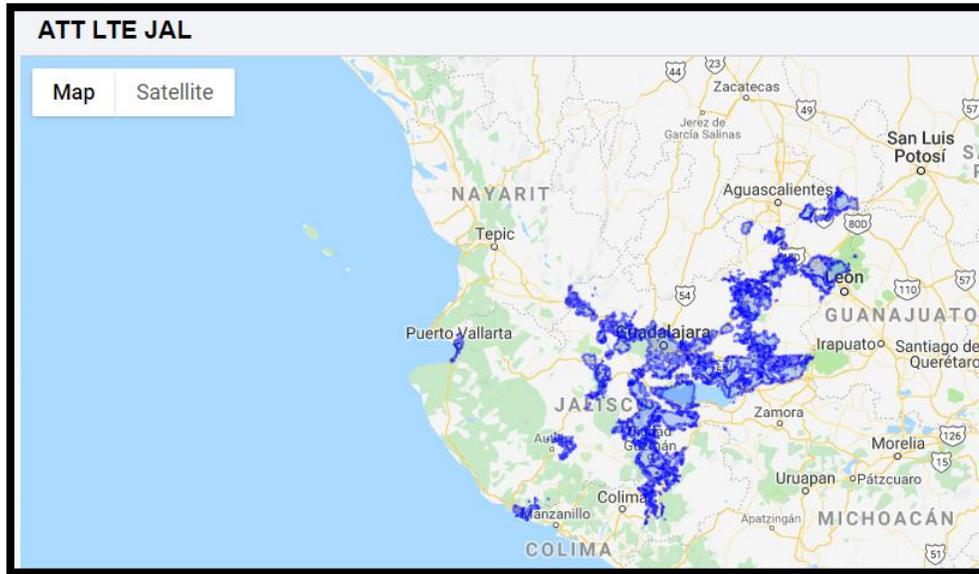


Figura 81. Cobertura de AT&T en Jalisco para LTE.

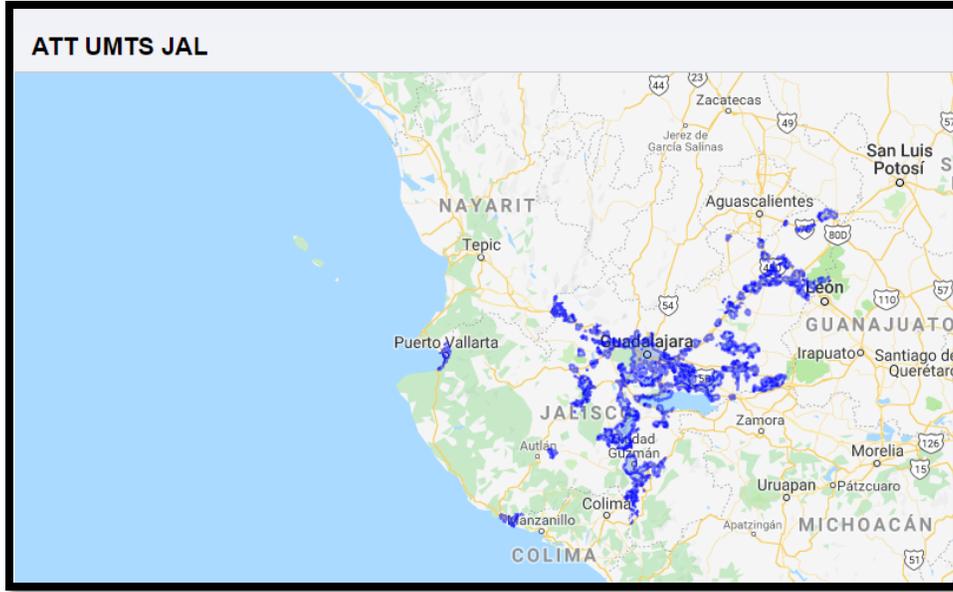


Figura 82. Cobertura de AT&T en Jalisco para UMTS.

Estado de Monterrey

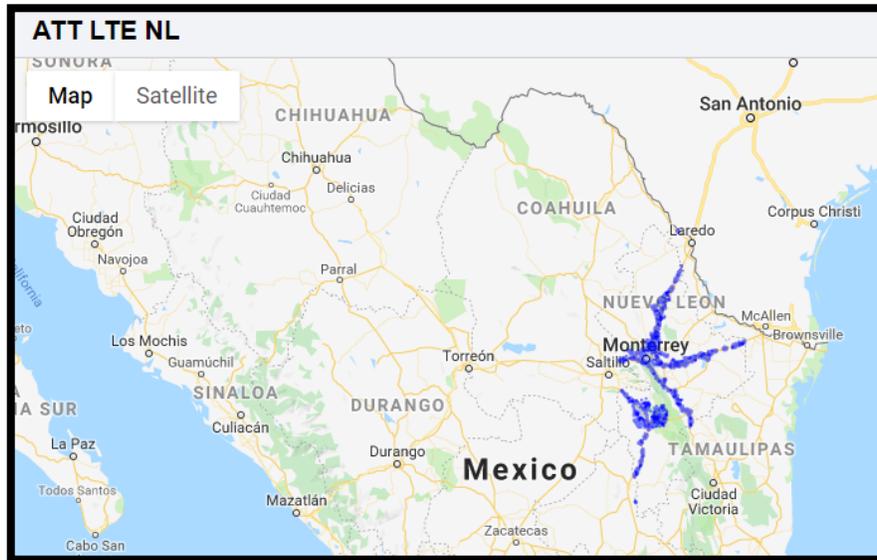


Figura 83. Cobertura de AT&T en Nuevo León para LTE.

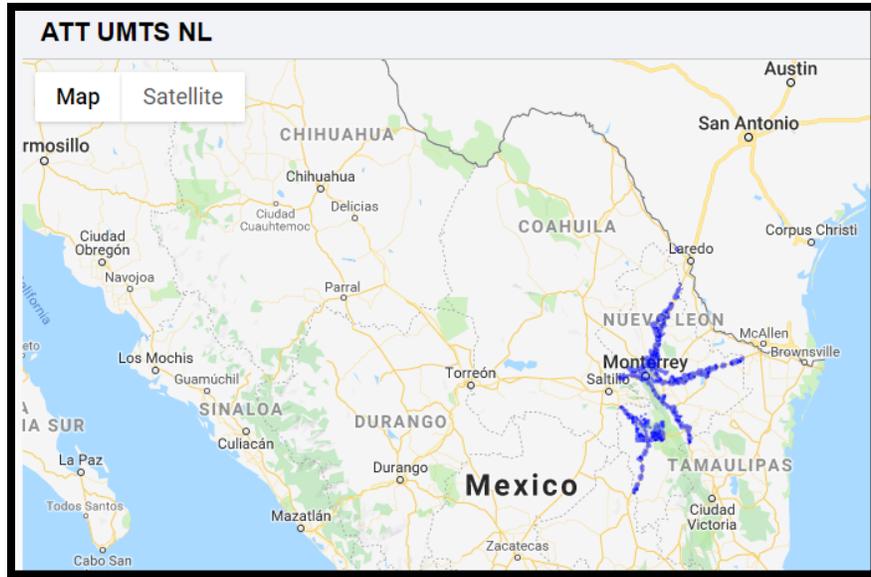


Figura 84. Cobertura de AT&T en Nuevo León para UMTS.

Estado de México.

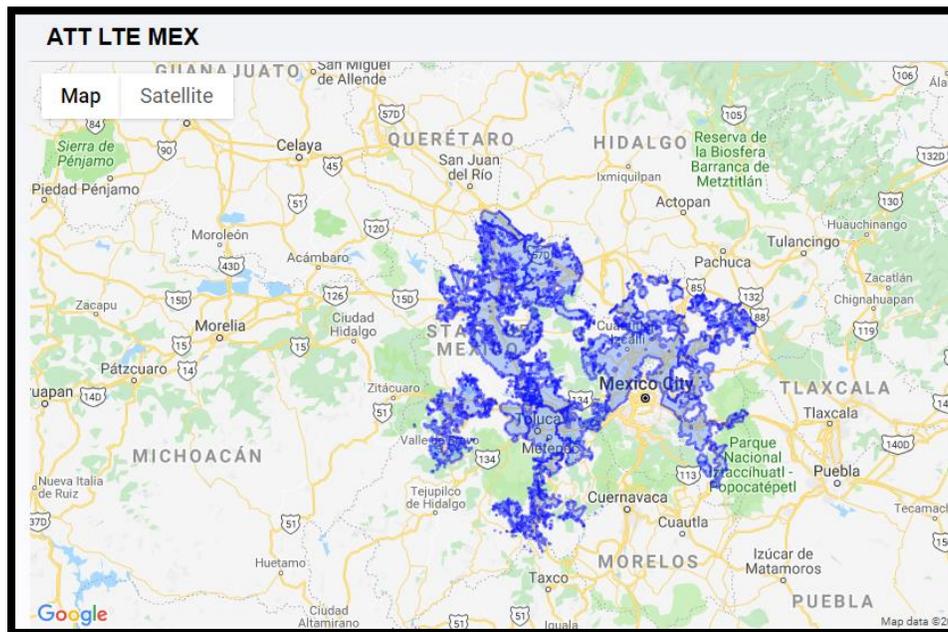


Figura 85. Cobertura de AT&T en Estado de México para LTE.

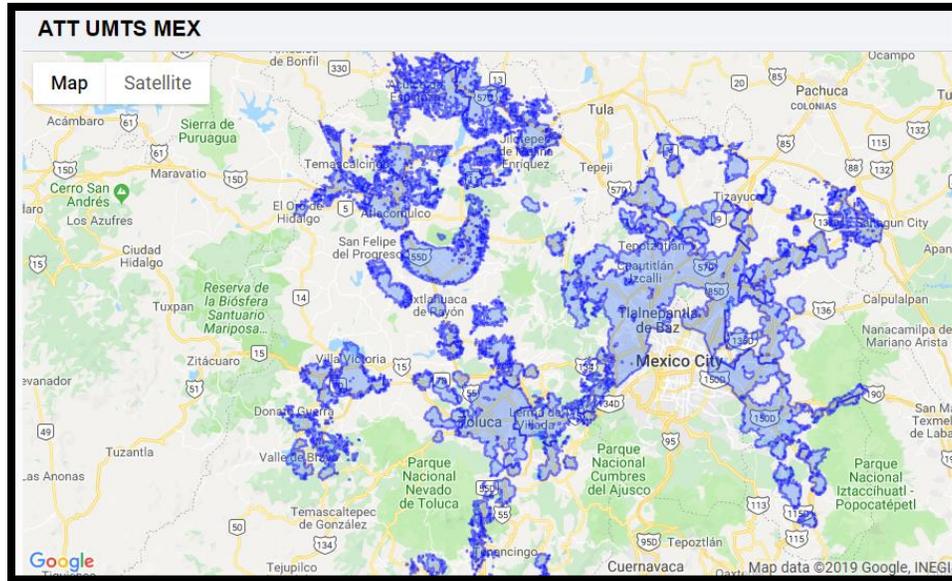


Figura 86. Cobertura de AT&T en Estado de México para UMTS.

Estado de Oaxaca.



Figura 87. Cobertura de AT&T en Oaxaca para LTE.

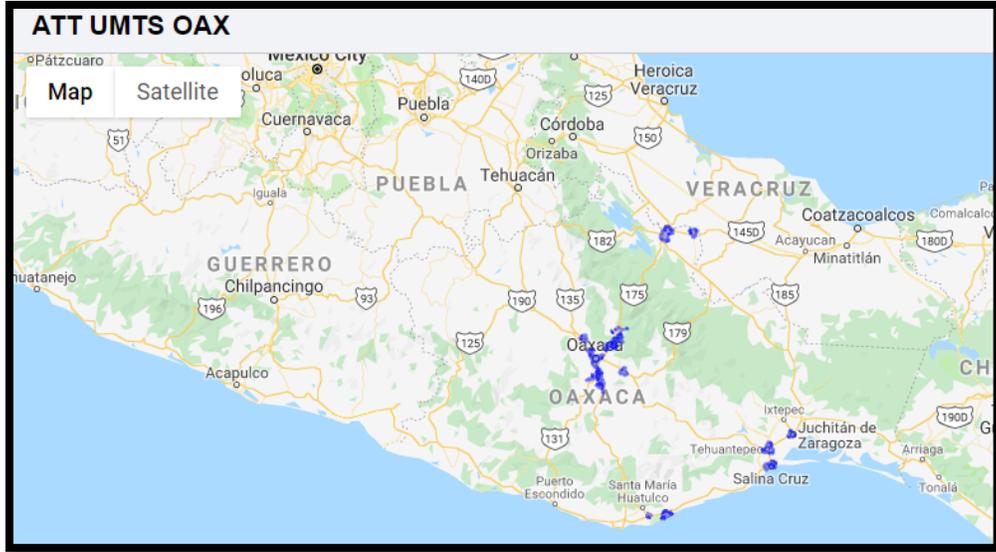


Figura 88. Cobertura de AT&T en Oaxaca para UMTS.

TELCEL

Ciudad de México (CDMX)

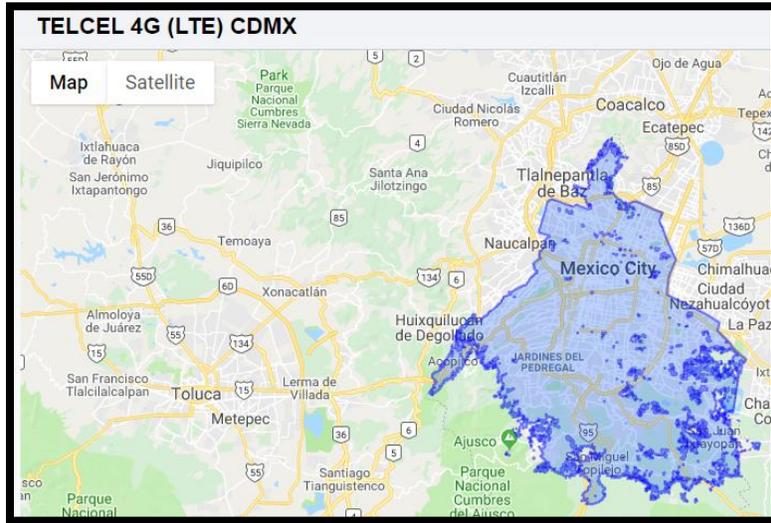


Figura 89. Cobertura de Telcel en la CDMX para LTE.

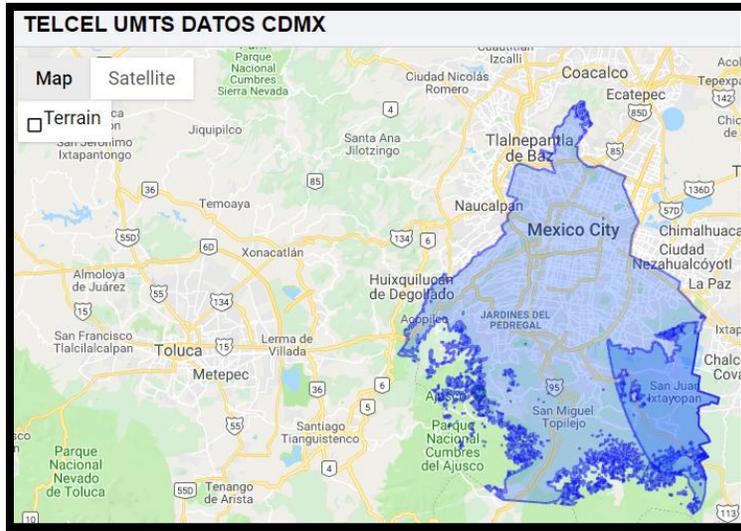


Figura 90. Cobertura de Telcel en la CDMX para UMTS datos.

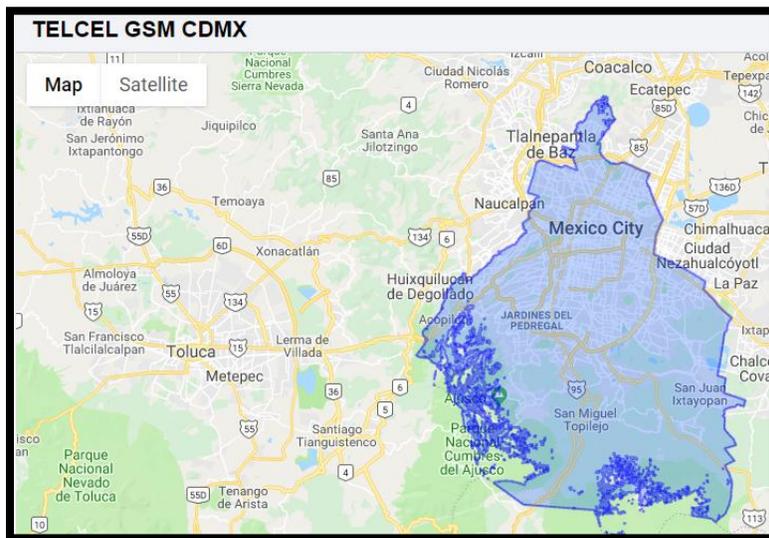


Figura 91. Cobertura de Telcel en la CDMX para GSM.

Estado de Jalisco

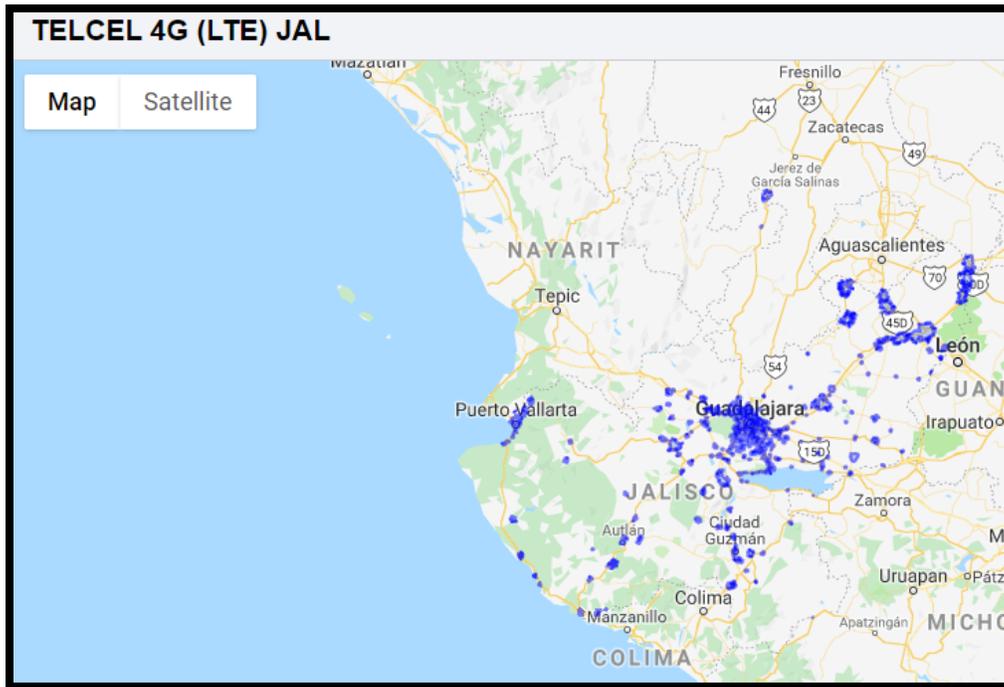


Figura 92. Cobertura de Telcel en Jalisco para LTE.

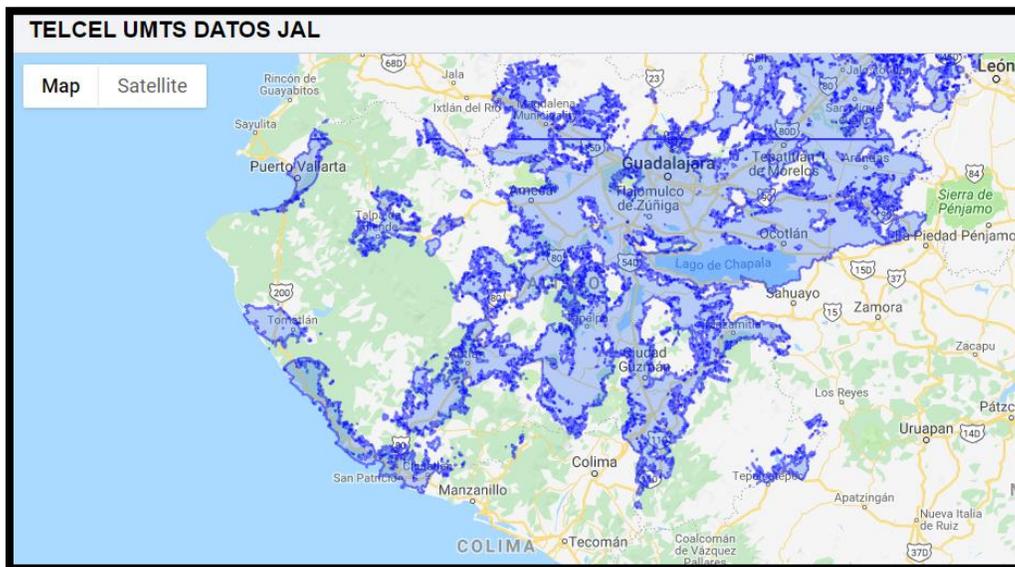


Figura 93. Cobertura de Telcel en Jalisco para UMTS datos.

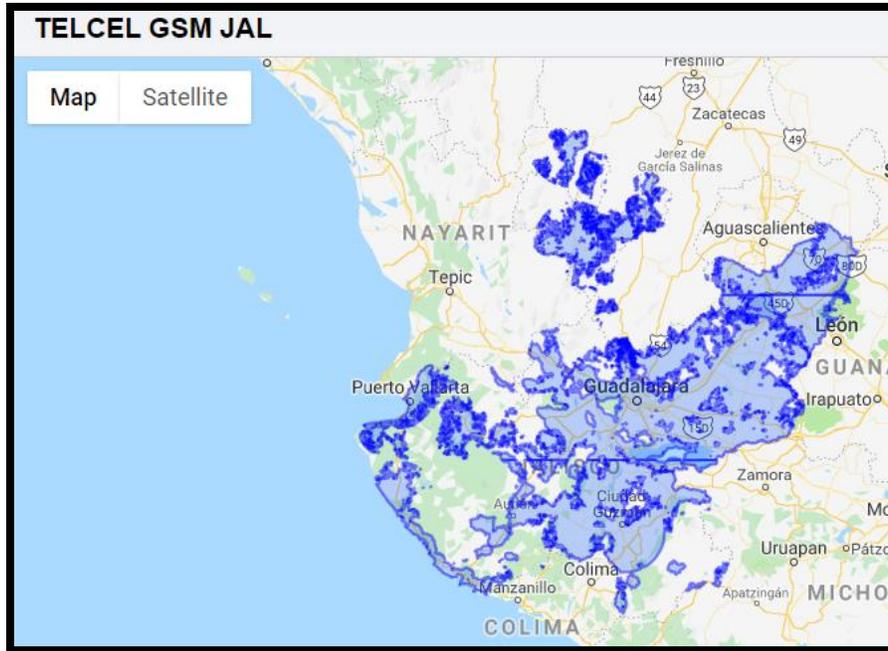


Figura 94. Cobertura de Telcel en Jalisco para GSM.

Estado de Monterrey

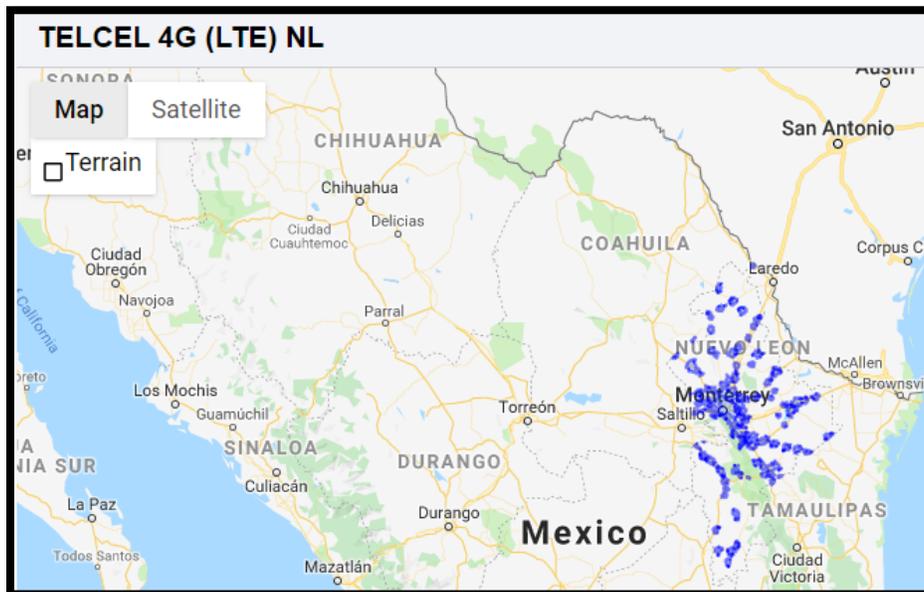


Figura 95. Cobertura de Telcel en Nuevo León para LTE.

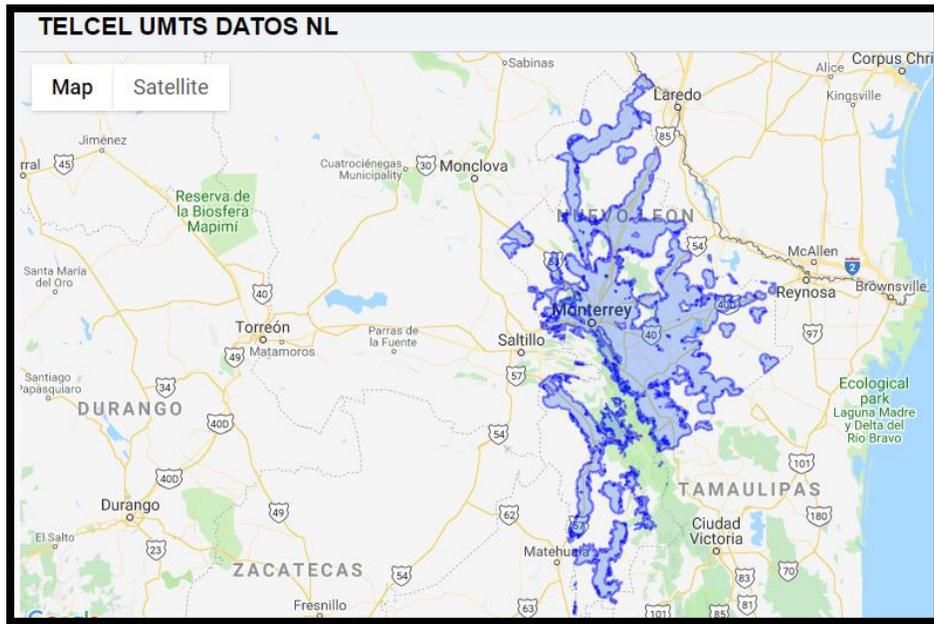


Figura 96. Cobertura de Telcel en Nuevo León para UMTS datos.

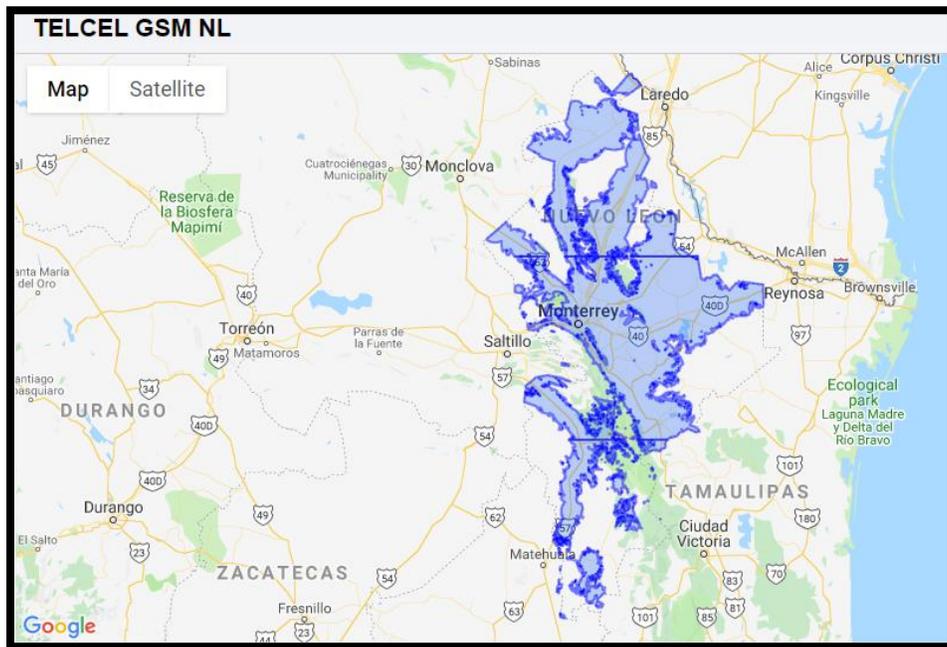


Figura 97. Cobertura de Telcel en Nuevo León para GSM.

Estado de México

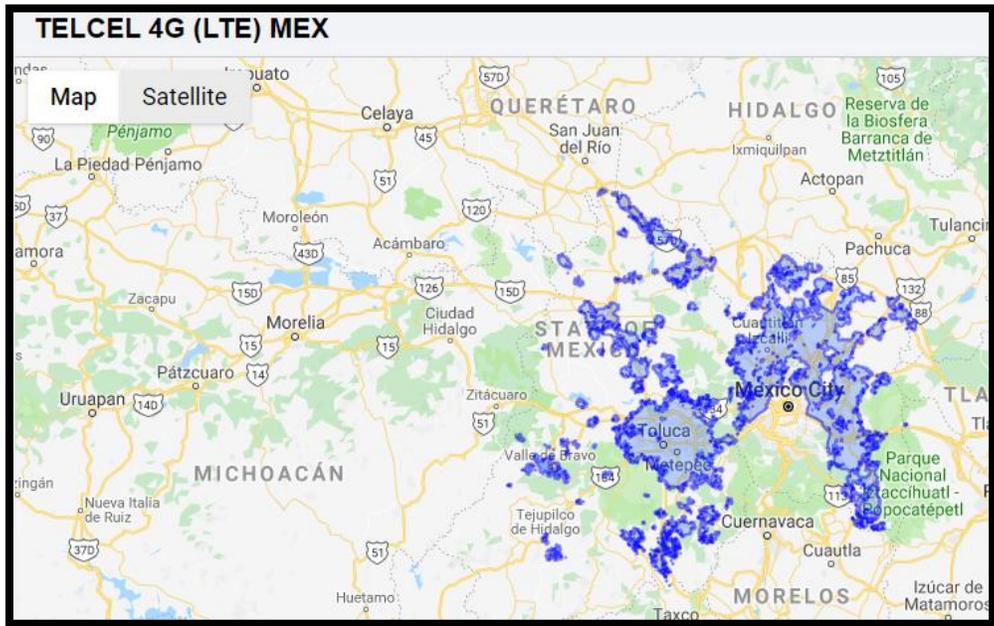


Figura 98. Cobertura de Telcel en Estado de México para LTE.

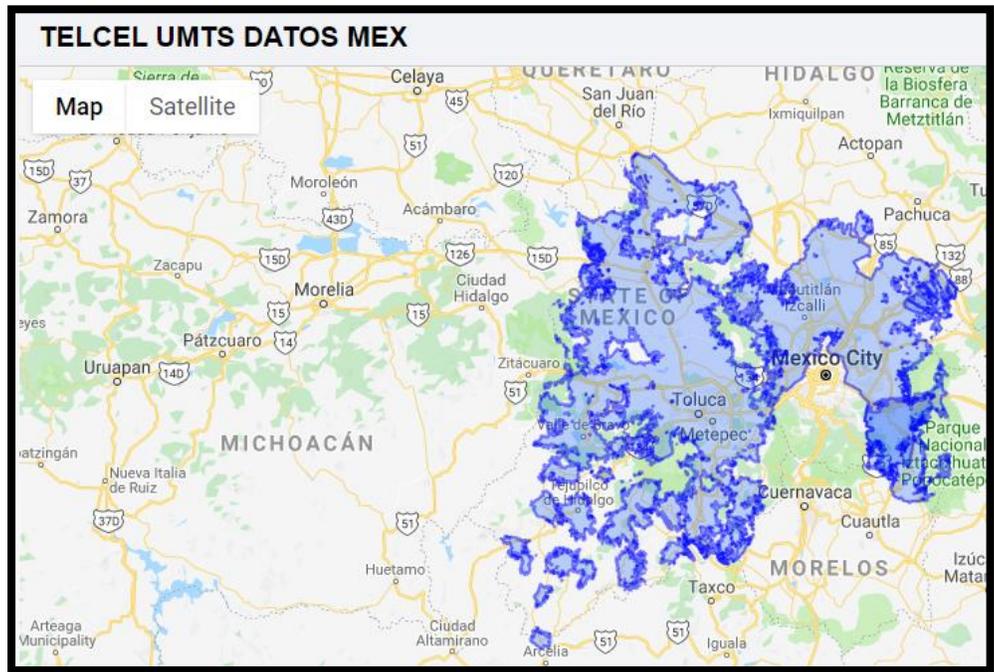


Figura 99. Cobertura de Telcel en Estado de México para UMTS datos.

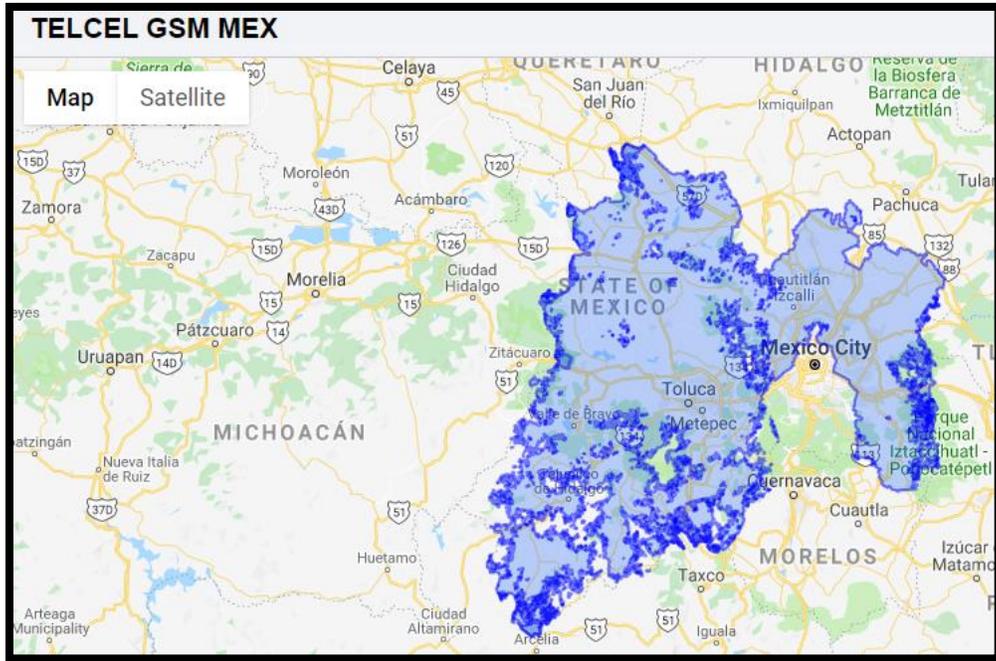


Figura 100. Cobertura de Telcel en Estado de México para GSM.

Estado de Oaxaca

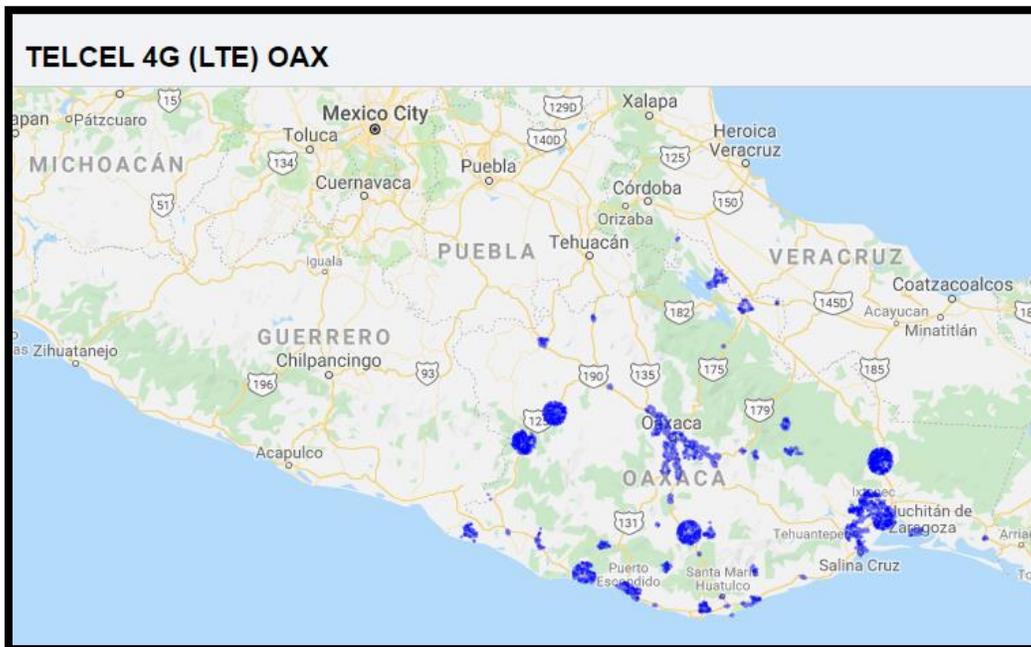


Figura 101. Cobertura de Telcel en Oaxaca para LTE.

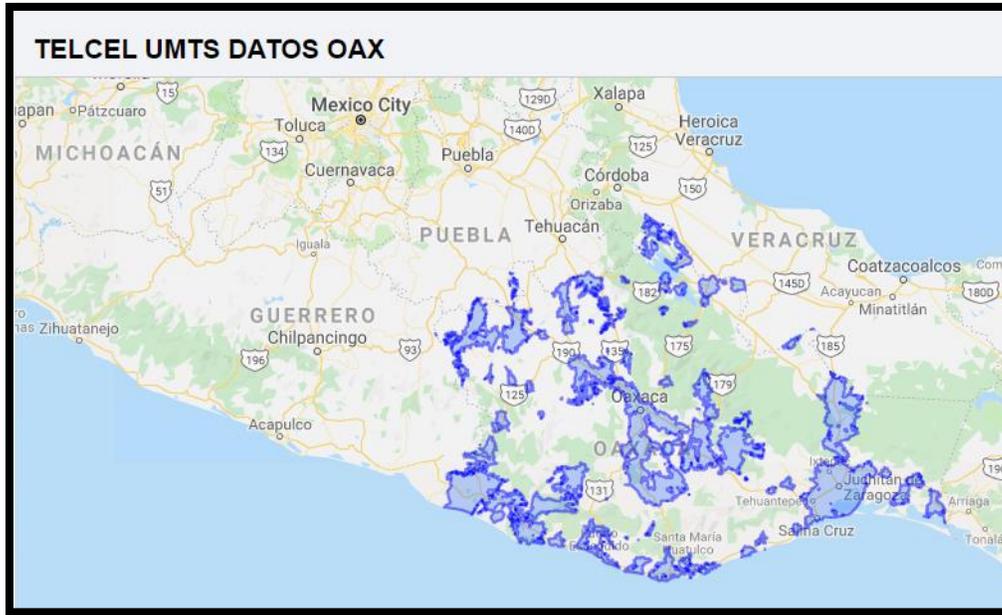


Figura 102. Cobertura de Telcel en Oaxaca para UMTS datos.

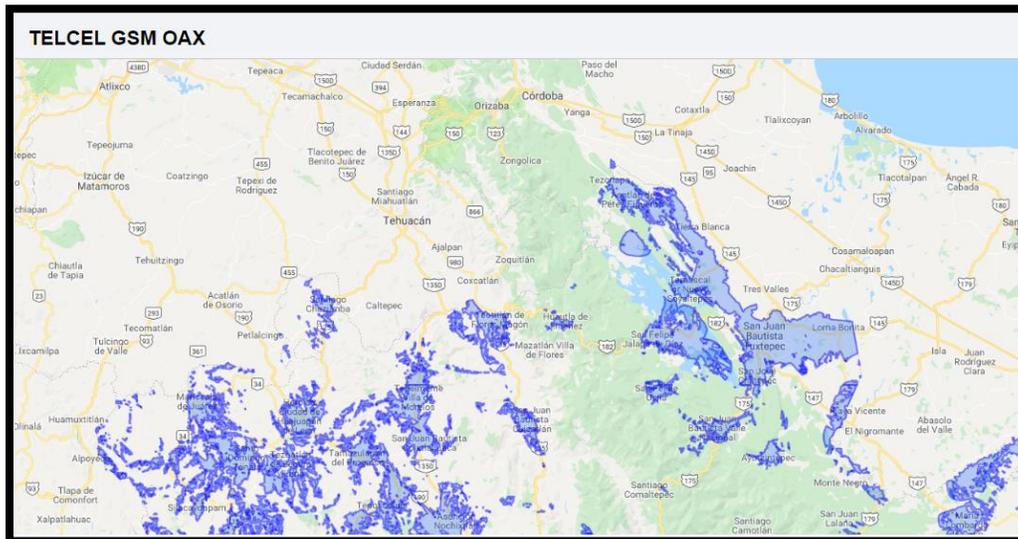


Figura 103. Cobertura de Telcel en Oaxaca para GSM.

Como podemos ver en el análisis anterior, las redes GSM y UMTS son los sistemas que cuentan con la mejor cobertura a nivel nacional, por lo cual se utilizó GSM para realizar la comunicación de la propuesta.

ANEXO 2

- **Código correspondiente el programa *Blink* [54].**

```
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000); // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000); // wait for a second
}
```

- **MPU6050_lecturas [45], [55].**

```
// ING. MARCO BRIAN SILVA VAZQUE
// INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
// ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA UNIDAD ZACATENCO
// SEPI - TELECOMUNICACIONES

#include <Wire.h>
#include <I2Cdev.h>
#include <MPU6050.h>

// Inicializar variables
int ax, ay, az, gx, gy, gz;
int AX,AY,AZ,GX,GY,GZ;
int tmp;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);

  Wire.begin();
  Wire.beginTransmission(0x68);
  Wire.write(0x6B);
  Wire.write(0);
  Wire.endTransmission(true);

  // Configura el acelerometro con (+/- 4G)
  Wire.beginTransmission(0x68);
  Wire.write(0x1C);
  Wire.write(0x08); // 4G Sensibilidad = 8192
```

```

Wire.endTransmission();

// Configura el giroscopio con (500º/s)
Wire.beginTransaction(0x68);
Wire.write(0x1B);
Wire.write(0x08); // 00001000 = 500º/s.Sensibilidad = 65.5
Wire.endTransmission();
}

void loop()
{
  Wire.beginTransaction(0x68);
  Wire.write(0x3B); // Comenzar con el registro 0x3B
  Wire.endTransmission(false);

  //Solicita lecturas al sensor
  Wire.requestFrom(0x68,14,true);

  //Extraer la lectura de los registros correspondientes de cada parámetro del sensor y se asigna a
  una variable (aquí solo se obtienen datos del tipo RAW)
  AX=Wire.read()<<8|Wire.read(); //0x3B
  AY=Wire.read()<<8|Wire.read(); //0x3D
  AZ=Wire.read()<<8|Wire.read(); //0x3F
  tmp=Wire.read()<<8|Wire.read(); //0x41
  GX=Wire.read()<<8|Wire.read(); //0x43
  GY=Wire.read()<<8|Wire.read(); //0x45
  GZ=Wire.read()<<8|Wire.read(); //0x47

  // Calculo de las variables (Estas constantes y calculos son recomendaciones del fabricante y son
  de acuerdo a la escala que se desea medir)
  float ax_m_s2 = AX * (9.81/8192);
  float ay_m_s2 = AY * (9.81/8192);
  float az_m_s2 = AZ * (9.81/8192);
  float gx_deg_s = GX / 65.5;
  float gy_deg_s = GY / 65.5;
  float gz_deg_s = GZ / 65.5;
  float termo= (tmp/340.00)+36.53 ;

  // Mostrar valores calculados en el puerto serial (tabla)
  Serial.print(" Aceleraciones en m/s2 .          Acx ");Serial.print(ax_m_s2);Serial.print("   Acy:
");Serial.print(ay_m_s2);Serial.print("   Acz: "); Serial.print(az_m_s2);Serial.print("\n");
  Serial.print(" Velocidad Angular en grados/s. Gx ");Serial.print(gx_deg_s);Serial.print("   Gy:
");Serial.print(gy_deg_s);Serial.print("   Gz: "); Serial.print(gz_deg_s);Serial.print("\n");
  Serial.print(" Tmp = "); Serial.print(termo); //Calcula la temperatura en grados Celsius
  Serial.print("\n");Serial.print("\n");

  delay(600);
}

```

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Fogue, P. Garrido, F. J. Martinez, C. T. Calafate, J. C. Cano, and P. Manzoni, “Desarrollo de un prototipo para la notificación automática de accidentes de tráfico usando redes vehiculares,” *Actas XXII Jornadas Paralelismo*, pp. 367–372, 2011.
- [2] Anibal Sanchez, “La evolución de Internet desde el paraíso nerd a un ecosistema de consumo,” *Joomla*, 2016. [Online]. Available: <https://magazine.joomla.org/es/ediciones-antteriores/agosto-2016/item/3118-la-evolucion-de-internet-desde-el-paraiso-nerd-a-un-ecosistema-de-consumo>.
- [3] Z. Andrea, B. A. Nicola, L. Castellani, and Z. F. Michele, “Internet of things for smart cities,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2014.
- [4] OMS, “Lesiones causadas por el tránsito.” [Online]. Available: <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>.
- [5] S. P. Trejo, “Lesiones, incapacidad y muerte en accidentes de tránsito cuesta 120 mil mdp,” *El sol de México*, 2017. [Online]. Available: <https://www.elsoldemexico.com.mx/metropoli/cdmx/Lesiones-incapacidad-y-muerte-en-accidentes-de-tránsito-cuesta-120-mil-mdp-145829.html>.
- [6] INEGI, “INEGI Parque vehicular,” 2017. [Online]. Available: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/indicadores/?p=449#divFV3102001001>.
- [7] U. de Chile, “SoSmart.” [Online]. Available: <http://www.sosmartapp.com/>.
- [8] INEGI, “Registro administrativo de la industria automotriz de vehículos ligeros.” [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/datosprimarios/iavl/>.
- [9] OnStar, “OnStar System.” [Online]. Available: https://www.onstar.com.mx/soporte/4g-lte/?gclid=CjwKCAjwo9rtBRAdEiwA_WXcFjIII54bHw_AJxWD0p_w1SJHPvxhmjllmD0bWPgj8HaK1IGDG3BoThoCi50QAvD_BwE.
- [10] R. M. Hernández, J. García Haro, and E. Egea López, “Evaluación de herramientas de simulación de redes vehiculares,” Universidad Politécnica de Cartagena, 2010.
- [11] R. Hajlaoui, T. Moulahi, and H. Guyennet, “Vehicular ad hoc networks : From simulations to real-life scenarios,” vol. 10, pp. 632–637, 2018.
- [12] A. M. Orozco, G. Llano, and R. Michoud, “Redes vehiculares Ad-hoc: aplicaciones basadas en simulación,” *Ingenium, Ciencia & Tecnología*, vol. 6, no. 12, pp. 11–22, 2012.
- [13] J. Ristvej and M. Lacinák, “Smart City, safety and security,” *Procedia Eng.*, vol. 192, pp. 522–527, 2017.
- [14] C. Rodríguez García, “Prototipo de Detección Automática de Accidente con el empleo de hardware Libelium,” Santiago de Chile.
- [15] P. D. Concha, D. D. E. Tesis, L. Pastor, and J. C. Hern, “Procesamiento y análisis de señales

biomecánicas adquiridas por redes de sensores,” Instituto Politécnico Nacional, 2018.

- [16] Wn. He, X. Yang, H. Zhang, Y. Wang, and Z. Wang, *Structure of TKPCK of mathematics teachers in junior middle schools in China*. 2004.
- [17] Arduino Inc, “Arduino UNO, Datasheet.” [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>.
- [18] Adafruit / DFROBOT, “SIM808 GSM + GPRS + GPS Cellular Module.”
- [19] E. V Board and U. Guide, “MPU-6000/MPU-6050 9-Axis Evaluation board user guide,” 2011.
- [20] Arduino, “Arduino web page.” [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [21] I. InvenSense, “MPU-6000 and MPU-6050 product specification,” *InvenSense Inc. Product Specification*, vol. 3.4. pp. 1–57, 2013.
- [22] “El protocolo HTTP.” [Online]. Available: <http://neo.lcc.uma.es/evirtual/cdd/tutorial/aplicacion/http.html>.
- [23] SIMCom, “GSM / GPRS + GPS Module.” p. 1.
- [24] S. W. Sun, X. Wang, X. Xiao, L. Teng, X. Zhang, and H. Yang, “SIM808 Hardware Design.” 2015.
- [25] S. W. Sun, X. Wang, X. Xiao, L. Teng, X. Zhang, and H. Yang, “SiM800 Series_AT Command,” 2013.
- [26] R. S. Muñoz and A. F. Caballero, “Diseño y construcción de un sistema de seguridad vehicular mediante monitoreo vía GSM-GPS,” p. 104, 2016.
- [27] D. P. A. S.L. Ranaweera, R. Bajaj, “GPS: location-tracking technology,” *IEEE*, 2012. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/993780>.
- [28] Scott S. Warren, “GPS,” *National Geographic*. [Online]. Available: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/gps/>.
- [29] GIS Geography, “Trilateration vs Triangulation – How GPS Receivers Work,” 2019. [Online]. Available: <https://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/>.
- [30] Audrey Selian, “3G Mobile licensing policy: GSM case study,” 2000.
- [31] Gobierno de México, “Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT),” 2019. [Online]. Available: <http://www.ift.org.mx/usuarios-y-audiencias/siumapa>.
- [32] J. de J. Mendoza Velasco and A. Ocampo Álvarez, “Implementación de un arduino para un bloqueo electrónico por medio de un mensaje o una llamada de celular.pdf,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- [33] S. M. Service, N. B. Solution, I. Services, and D. Network, *Short Message Service (SMS) for fixed networks; Network Based Solution (NBS); Part 3: Integrated Services Digital Network (ISDN) access protocol*. France, 2005, pp. 1–25.
- [34] V. Carpio Barco, E. Galicia López, and D. Vázquez, “Aplicación Android Para un sistema de alarma, bloqueo y localización automotriz vía Gsm-Gps,” IPN, 2014.
- [35] M. Galvani, “History ad future of driver assistance,” *IEEE Instrum. Mes. Mag.*, p. 60, 2019.

- [36] A. Maria Di Natale, "The evolution of Passive Safety in I&M," *IEEE Instrum. Mes. Mag.*, p. 60, 2019.
- [37] "NHTSA." [Online]. Available: <https://www.nhtsa.gov/about-nhtsa>.
- [38] Economic and social council of economic commission for Europe, "Proposal for new regulation no. XXX on accident emergency call systems (AECS)," 2017, p. 81.
- [39] Arrive Alive, "Emergency response time and response to road crashes." [Online]. Available: <https://www.arrivealive.mobi/emergency-response-time-and-response-to-road-crashes>.
- [40] Together for safer Roads, "6 ways to improve post-crash care," 2016. [Online]. Available: <https://www.togetherforsaferroads.org/6-ways-to-improve-post-crash-care/>.
- [41] "Global NCAP." [Online]. Available: <http://www.globalncap.org/>.
- [42] "Euro NCAP." [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/en/for-engineers/protocols/general/>.
- [43] "Latin NCAP." [Online]. Available: <https://www.latinncap.com/es/inicio>.
- [44] "Arduino UNO Blink." [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/Blink>.
- [45] "MPU-6050 Accelerometer + Gyro." [Online]. Available: <https://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050/>.
- [46] J. Rowberg, "MPU-6050 Libreria." [Online]. Available: <https://github.com/ElectronicCats/mpu6050>.
- [47] DFROBOT, "SIM808 GPS GPRS GSM Shield SKU TEL0097." [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/SIM808_GPS_GPRS_GSM_Shield_SKU__TEL0097.
- [48] D. A. Peters, "essays of D.A. Peters." [Online]. Available: <https://www.forcon.com/>.
- [49] W. H. M. Castro, M. Schilgen, S. Meyer, M. Weber, C. Pauker, and K. Wortler, "Do 'whiplash injuries' occur in low speed rear impacts?.pdf," *Eur. spine J.*, vol. 6, pp. 366–375, 1997.
- [50] M. Krafft, A. Kullgren, M. Sigrun, and A. Ydenius, "Influence of crash severity on various whiplash injury symptoms: A study based on real-life rear-end crashes with recorded crash pulses," *Proc. 19th Int. Tech. Conf. Enhanc. Saf. Veh. (ESV), Washingt.*, no. Paper Number: 05-0363, p. 8, 2005.
- [51] N. Causal, I. T. Industrial, E. En, and R. Accidentes, "Nexo causal entre las colisiones a baja velocidad y las lesiones del raquis cervical . Nexo causal entre las colisiones a baja velocidad y las lesiones del raquis cervical .," 2015.
- [52] NCAP, "Prueba NCAP Ibiza." [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=8tZlzkAQuY0>.
- [53] Instituto Federal de Telecomunicaciones, "IFT mapas de cobertura." [Online]. Available: <http://cobeturamovil.ift.org.mx/>.
- [54] Arduino, "Blink Arduino." [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/tutorial/blink>.
- [55] Naylamp Mechatronics, "Tutorial MPU6050, Acelerómetro y Giroscopio." [Online]. Available:

https://naylampmechatronics.com/blog/45_Tutorial-MPU6050-Acelerómetro-y-Giroscopio.html.