

VIABILIDAD TÉCNICA PARA UNA RED DE SENSORES DE CAPTURA DE
VARIABLES DE TRÁFICO VEHICULAR EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ.

EDITH PAOLA ESTUPIÑAN CUESTA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ

2012

VIABILIDAD TÉCNICA PARA UNA RED DE SENSORES DE CAPTURA DE
VARIABLES DE TRÁFICO VEHICULAR EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ.

EDITH PAOLA ESTUPIÑAN CUESTA

Trabajo de profundización para optar por el título de Magister en Ingeniería Electrónica

Director: CESAR LEONARDO NIÑO BARRERA

Ingeniero Electrónico, Ph.D.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ

2012

RECTOR MAGNÍFICO:

P. JOAQUÍN EMILIO SÁNCHEZ GARCÍA S.J

DECANO ACADÉMICO:

Ing. LUIS DAVID PRIETO MARTINEZ, Ph.D

DECANO DEL MEDIO UNIVERSITARIO:

P. SERGIO BERNAL RESTREPO S.J.

DIRECTOR DE LA MAESTRÍA:

Ing.CESAR LEONARDO NIÑO BARRERA, Ph.D.

DIRECTOR TRABAJO DE GRADO:

Ing.CESAR LEONARDO NIÑO BARRERA, Ph.D.

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá, 14 de Noviembre de 2012

ARTÍCULO 23 DE LA RESOLUCIÓN No. 13 DE JUNIO DE 1946

“La Universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en sus proyectos de grado. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque los trabajos no contengan ataques o polémicas puramente personales. Antes bien, que se vea en ellos el anhelo de buscar la verdad y la justicia”.

DEDICATORIA

*A Dios, por ser mi fuente de fortaleza cada día,
por ser la fuerza que me impulsa a no desfallecer y a entregar lo mejor de mí.*

*A mi mamá por ser fuente de amor constante,
por siempre estar a mi lado y entregarme palabras de amor y aliento cuando lo necesito.*

Te amo mamá, doy gracias a Dios por tenerte en mi vida

A mi papá por ser un apoyo siempre, por amarme y siempre confiar en mí.

Infinitas Gracias.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por escucharme, protegerme y acompañarme siempre, por guiar mis causas y porque su Gracia siempre me lleva donde su voluntad lo permite.

A la Pontificia Universidad Javeriana, por acogerme y brindarme la formación para obtener este logro.

A Ing. Carlos Alberto Parra Rodríguez Ph.D., por su colaboración administrativa en el transcurso de mi formación académica.

Al Ing. Cesar Leonardo Niño Barrera Ph.D., tutor del trabajo, por dedicar su tiempo a la orientación impartida para la culminación de esta investigación y por sus grandes aportes y apoyo constante en este proceso.

Al Ing. Luis Carlos Trujillo Arboleda por dedicar parte de su tiempo a la asesoría en el desarrollo de este trabajo.

A mi hermana Viviana Estupiñán por regalarme una sonrisa en los momentos difíciles y por significar parte de la inspiración para terminar este proceso.

A Oscar Javier Contreras por su comprensión y apoyo incondicional en los momentos más importantes de mi vida.

A mis abuelos Bercelio, Eloisa, Juan y Josefina por contribuir en mi formación, y brindarme su amor.

Tabla de Contenido

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 11 |
| 2 | INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE REDES WLAN | 12 |
| 2.1 | Redes WSN (Redes inalámbricas de Sensores) | 12 |
| 2.2 | Redes VANET (Redes Ad- Hoc Vehiculares) | 13 |
| 2.3 | DISEÑO DE REDES INALÁMBRICAS | 13 |
| 2.4 | TIREM | 15 |
| 2.5 | SIG (SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA) | 15 |
| 2.5.1 | Raster | 17 |
| 2.6 | PREDICCIÓN DE UN EVENTO DE TRÁFICO VEHICULAR | 17 |
| 2.7 | HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN | 18 |
| 2.8 | VARIABLES DE DESEMPEÑO DE LA RED. | 20 |
| 2.8.1 | Throughput | 21 |
| 2.8.2 | Retardo | 21 |
| 3 | ESPECIFICACIONES | 22 |
| 3.1 | REQUERIMIENTOS | 23 |
| 3.1.1 | Metodología de Diseño | 25 |
| 4 | DESARROLLO | 26 |
| 4.1 | MODELO DE PROPAGACIÓN Y ESPECIFICACIONES DEL TERRENO | 27 |
| 4.2 | CARACTERIZACIÓN DE TRÁFICO DE DATOS | 28 |
| 4.2.1 | Distribución Estadística para el Arribo de Paquetes de Datos. | 28 |
| 4.2.2 | Definición de Parámetros de Distribución Estadística arribo de paquetes | 29 |
| 4.2.3 | Definición de Parámetros de Distribución Estadística para tamaño de paquetes | 30 |
| 4.3 | NODOS SENSORES 802.11p | 31 |
| 4.4 | DISEÑO FINAL | 34 |
| 4.5 | ESTUDIO ECONÓMICO | 37 |
| 5 | RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | 38 |
| 5.1 | ANÁLISIS RETARDO | 39 |
| 5.1.1 | Análisis retardo aplicación | 42 |
| 5.2 | ANÁLISIS CARGA DE DATOS | 43 |
| 5.3 | ANÁLISIS THROUGHPUT | 45 |
| 6 | CONCLUSIONES | 48 |
| 7 | REFERENCIAS | 50 |
| 8 | ANEXOS | 53 |

Lista de Figuras

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Aspectos principales a considerar en un diseño de red. Fuente: Elaboración propia basado en [11][12]. | 13 |
| 2 | Representación de datos de terreno para un SIG Raster y SIG Vectorial. Fuente: Elaboración propia basada en [19] | 16 |
| 3 | Nodos Wireless y sus Modulo de Nodos. Fuente: Elaboración propia | 20 |
| 4 | Diagrama de bloques de la descripción de la función red de sensores. Fuente: Elaboración propia | 23 |
| 5 | Diagrama de bloques de la descripción general del proyecto. Fuente: Elaboración propia | 24 |
| 6 | Metodología para el diseño de red propuesto. Fuente: Elaboración propia | 26 |
| 7 | Segmento Vial que cubrirá el diseño de red propuesto. Fuente: Google Earth | 26 |
| 8 | Perfil del terreno de la ciudad de Bogotá para el segmento vial donde estará ubicada la red 9 km aprox. Fuente: OPNET Modeler. | 28 |
| 9 | Identificación de procesos a modificar para los ajustes al estándar 802.11p. Fuente: Elaboración propia basada en Opnet Modeler | 33 |
| 10 | Intersección Vial. Ubicación de los sensores pertenecientes a un BSS sobre el segmento vial en particular. Fuente: Elaboración propia | 35 |
| 11 | Diseño de la red segundo nivel de concentración de información. Fuente: Elaboración propia | 36 |
| 12 | Diseño Final propuesto. Fuente: Elaboración propia | 36 |
| 13 | Retardo WLAN Escenario 1.Transmisión de una imagen de 60000 bytes. Fuente: Elaboración propia | 40 |
| 14 | Retardo WLAN Escenario 2. Transmisión de 300 imágenes. Fuente: Elaboración propia | 40 |
| 15 | Retardo WLAN escenario 3.Fuente: Elaboración propia | 41 |
| 16 | Retardo total de la red WLAN para los escenarios 1 y 2. Fuente: Elaboración propia. | 42 |
| 17 | Retardo a nivel de capa de aplicación en cada sensor de la red.Fuente: Elaboración propia. | 43 |
| 18 | Carga de Datos promedio por sensor Escenario 1.Transmisión imagen 60000 bytes con intervalo de arribo de paquetes de 3503.3 s. Fuente: Elaboración propia | 44 |
| 19 | Carga de Datos Promedio por sensor Escenario 2. Transmisión de una Imagen de 1382400 bytes con un intervalo de arribo de paquetes de 3503.3 s.Fuente: Elaboración propia | 44 |
| 20 | Carga de datos generada por sensor Escenario 3. 10 imágenes/s con un tamaño de imagen de 320X240. Fuente: Elaboración propia | 44 |
| 21 | Incremento de throughput en WLAN.Fuente: Elaboración propia | 46 |

Lista de Tablas

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Selección Simulador para el diseño de red | 19 |
| 2 | Entradas y salidas principales del proyecto | 25 |
| 3 | Intersecciones monitoreadas por los Sensores | 27 |
| 4 | Parámetros TIREM[40, 41, 42, 43] | 27 |
| 5 | Tamaños archivos definidos para la transmisión | 31 |
| 6 | Diferencias parámetros físicos estándar 802.11a y estándar 802.11p | 32 |
| 7 | Resumen de variables Modificadas | 34 |
| 8 | Principales parámetros diseño propuesto | 35 |
| 9 | Cotización Económica dispositivos de red 802.11p | 37 |
| 10 | Descripción De Simulaciones | 38 |
| 11 | Parámetros de configuración nodos de red | 39 |
| 12 | Resultados de simulaciones de escenarios propuestos | 45 |
| 13 | Resultados De Throughput WLAN | 46 |

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad la investigación de sistemas de transporte inteligente llamados por sus siglas en inglés ITS, ha permitido la inclusión de nuevas tecnologías de la comunicación e información para el monitoreo vehicular empleando herramientas y dispositivos electrónicos como sensores, que permiten la captura de información para posteriormente ser almacenada, transmitida y procesada sobre un punto específico. Estas investigaciones han cobrado relevancia en muchos de los orbes del mundo. Sin embargo para el caso específico de Colombia no se han realizado muchas investigaciones respecto a este tema.

Los sistemas de transporte inteligente en sus diferentes aplicaciones permiten analizar variables de tráfico vehicular como el conteo de vehículos, detección de infracciones, flujo vehicular y control en los semáforos[1]. Dependiendo del tipo de aplicación del ITS se selecciona la arquitectura de red y se estiman las características de la infraestructura necesaria para la implementación de un ITS. Las redes inalámbricas hacen parte fundamental de aplicaciones ITS.

Un ITS con algunas variables de este estilo está actualmente siendo estudiado en la Pontificia Universidad Javeriana(PUJ), sin embargo el sistema funciona como un nodo aislado que captura información relacionada con ciertas variables de tráfico vehicular[2]. Por esta razón nace la necesidad de integrar estos nodos y proponer el diseño de una red que se adapte a las características del ITS que se está trabajando en la PUJ. Este proyecto de profundización tiene como finalidad la evaluación de factibilidad de un diseño de red de sensores que realice la adquisición de variables de tráfico vehicular en un segmento vial de la ciudad de Bogotá. Este diseño propuesto será evaluado mediante simulación y los análisis serán realizados con los resultados entregados por la simulación. Para el diseño es necesario el estudio de requerimientos de la red y así lograr escenarios que se acerquen mucho más a la realidad. La correcta evaluación de este diseño sería una herramienta útil para el momento de una implementación real sobre el segmento vial.

2 INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE REDES WLAN

Para el desarrollo de sistemas ITS entre vehículos es importante conocer algunos conceptos que aclaran este tipo de aplicaciones. Las redes inalámbricas de área local (WLAN) están basadas sobre el estándar IEEE 802.11[3]. La arquitectura de 802.11 está diseñada para soportar una red donde la mayoría de toma de decisiones están basadas en las estaciones inalámbricas. Este estándar define los protocolos y la compatibilidad de las interconexiones de los equipos por un medio no guiado en redes de área local. Este estándar enfatiza en las dos primeras capas del modelo OSI; capa física (PHY) y la capa de control de acceso al medio (MAC) [4]. Dentro de los elementos básicos de una red WLAN están la estación y el conjunto básico de servicio o Basic Service Set (BSS). Los BSS son conjuntos de estaciones inalámbricas que se comunican entre sí. Cada estación debe estar asociada a un BSS para poder establecer la comunicación con otra estación del mismo BSS. Si un BSS incluye un punto de acceso (AP) se llama un BSS de infraestructura [5].

2.1 Redes WSN (Redes inalámbricas de Sensores)

Para las redes inalámbricas en general y en especial para las redes inalámbricas de sensores llamadas por sus siglas en inglés (WSN) los puntos finales o sensores son los encargados de definir la finalidad de la red. Para las WSN, los sensores de la red son los principales proveedores de información. El tipo de información entregada por el sensor se define por el tipo de sensor utilizado, la aplicación y los intereses de los usuarios. Una red de sensores consta de un gran número de nodos con capacidad de cálculo y comunicación desplegados en un espacio determinado. Generalmente las WSN manejan un enfoque jerárquico para el manejo de la información y usan un gran número de nodos de sensores para la detección exacta e incremento de las zonas de detección. Los nodos de una WSN pueden estar equipados con una gran variedad de sensores, tales como sensores de intensidad de luz, sensores de presencia, detectores de paso, sensores de gas, GPS, sensores de vídeo, sensores optoelectrónicos, sensores magnéticos e infrarrojos, entre otros[6].

Las redes de sensores son de gran utilidad para aplicaciones que impliquen monitoreo de eventos en diferentes ambientes. En aplicaciones ITS, el uso de estas redes se ha incrementado para el monitoreo y control de tráfico vehicular, debido a que estas redes permiten una recolección de datos mucho mayor respecto a otro tipo de redes. Estas redes permiten supervisar el estado del tráfico en los sitios de detección y obtener información de eventos vehiculares en carreteras y zonas de estacionamiento. La información recolectada por este tipo de redes es proporcionada en tiempo real y es utilizada para aplicaciones que impliquen monitoreo constante, indicación de señales de alarma o extracción de información estadística[7][8].

2.2 Redes VANET (Redes Ad- Hoc Vehiculares)

Una extensión de las redes inalámbricas son las redes VANET, para este tipo de redes los nodos sensores pueden estar ubicados en los vehículos que se encuentran en movimiento o sobre un segmento vial. Los componentes que generalmente son usados en redes VANET son enrutadores denominados RSU's (Road Side Units) que están ubicados en la vía sobre el camino que atraviesan los vehículos y OBU's (On Board Units) ubicados en los vehículos que permiten la comunicación de los vehículos con los enrutadores. Dentro de los limitantes de este tipo de redes se destacan los obstáculos encontrados en los segmentos viales [9]. Las redes VANET trabajan sobre el estándar 802.11p en la banda de frecuencia de 5.9 GHz y están diseñadas para trabajar en ambientes vehiculares. El estándar 802.11p opera con modulación OFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal), permite comunicaciones con velocidades de datos de 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbps y maneja un espaciamiento de canal de 10 MHz en la banda de 5 GHz [10].

2.3 DISEÑO DE REDES INALÁMBRICAS

El diseño de una red implica el estudio de diferentes aspectos para definir un diseño acorde a las necesidades de la aplicación. El diseño requiere tener en cuenta aspectos como: área geográfica de red, infraestructura, capacidad y rendimiento, aplicaciones, escalabilidad, redundancia, seguridad y monitoreo[11, 12]. En la figura 1 se resumen los aspectos más relevantes que deben tenerse en cuenta para el diseño

Figura 1. Aspectos principales a considerar en un diseño de red. Fuente: Elaboración propia basado en [11][12].



A continuación se explican los principales aspectos para el diseño redes inalámbricas [13, 14]:

- **Área geográfica de red:** El estudio del área de red implica la planeación de la frecuencia de operación, estudio del terreno y cobertura de red. Se debe conocer el tipo de terreno para así evaluar las posibles interferencias. Lo recomendable es tener un mapa del terreno, para así realizar la posterior ubicación de los dispositivos.
- **Infraestructura de Red:** El diseño de red implica necesariamente la definición de una infraestructura y en conjunto la selección de dispositivos. La estructura definida debe soportar el crecimiento de la red, ajustarse a los cambios y tener disponibilidad de alimentación energética. La selección de los equipos deben tener en cuenta interoperabilidad, potencia de transmisión, ganancia de las antenas, tasa de transferencia máxima del dispositivo, modulación y frecuencia de operación. Se debe establecer un balance entre la cantidad de AP de la red en relación con la cantidad de estaciones que se planean cubrir. En promedio un AP puede albergar alrededor de 25 estaciones.
- **Capacidad y Rendimiento:** Es importante distinguir el número de usuarios que puede llegar a soportar la red y así definir su capacidad. Esto implica conocer el ancho de banda necesario por usuario. Para dar una aproximación del rendimiento total de la red se debe realizar una estimación de la carga de datos generada por cada dispositivo de la red.
- **Definición de Aplicaciones:** Se define el tipo y número de aplicaciones que debe soportar la red. Se recomienda así mismo definir el tipo de equipos que soportan estas aplicaciones. Las aplicaciones deben estar definidas en orden de prioridad de servicio y se debe contemplar que el diseño debe soportar el nivel más crítico de operación de la red.
- **Escalabilidad:** Para un diseño de red es importante que la solución sea capaz de adaptarse fácilmente a su crecimiento futuro, permitiendo modificar su configuración o su tamaño para ajustarse a los cambios que se presenten, esta característica hace a una red escalable. Contemplar que la red pueda escalar permite tener una idea de hasta qué punto puede crecer la red y qué soluciones pueden lograr esto para dar cabida a la ampliación futura.
- **Seguridad:** Para el diseño de la red, es importante la integración de la seguridad al diseño, definir niveles de seguridad dependiendo del nivel de acceso de los usuarios. La seguridad puede estar definida bajo varios aspectos: seguridad de dispositivos, seguridad de infraestructura y seguridad de los usuarios.
- **Monitoreo:** Debido a que cada entorno de red es diferente, se requiere definir patrones de tráfico en condiciones normales. Esto permite identificar los cambios en el tiempo, bien sean repentinos o graduales. Estos cambios, a su vez, pueden ser indicadores

de problemas potenciales en la red. Estos patrones de tráfico se obtienen por un constante monitoreo de la red. Las herramientas de monitoreo pueden demostrar que la infraestructura de red es adecuada y capaz de manejar las necesidades de los usuarios de la red. Las principales estadísticas recopiladas para el monitoreo de red hacen referencia a procesos como: Utilización del ancho de banda, intensidad de señal de los nodos, estaciones asociadas, redes y canales adyacentes detectados, retransmisiones, tasas de error y disponibilidad de aplicaciones. Otro tipo de estadísticas que son importantes para estimar el rendimiento de la red son: el throughput, los paquetes perdidos y el retardo. A medida que la red evolucione, es posible encontrar otros indicadores del rendimiento de la red que pueden ser útiles dependiendo del tipo de aplicaciones.

2.4 TIREM

TIREM (Terrain Integrated Rough Earth Model) es un modelo de propagación que calcula las pérdidas de propagación a lo largo de un camino sobre un terreno en frecuencias de operación entre 1 y 20.000 MHz [15]. TIREM dentro de sus cálculos requiere datos de las elevaciones del terreno especificadas por un conjunto de puntos discretos entre la trayectoria máxima de la antena transmisora y la antena receptora. Esta información de terreno es proporcionada por los datos digitales de elevación del terreno (DTED). El cálculo de la pérdida de trayectoria se determina también por los efectos de propagación de espacio libre, absorción de la reflexión, difracción, propagación por dispersión troposférica, efecto de atenuación, ionósfera y absorción debida a la lluvia. El modelo de propagación TIREM calcula las pérdidas de propagación basado en parámetros como el medio de transmisión, terreno y antenas. Para el medio de transmisión tiene en cuenta la refractividad de la superficie y la humedad. En el terreno, tiene en cuenta los datos de elevación, permitividad y conductividad. En antenas, toma en cuenta la altura, frecuencia de operación y polarización[16].

El modelo de propagación TIREM tiene la característica de operar como diferentes modelos dependiendo de la frecuencia de operación sobre la cual se estén calculando las pérdidas de propagación. Esto significa que el modelo TIREM examina el tipo de terreno y el perfil de elevación para automáticamente seleccionar el modelo óptimo para calcular las pérdidas de propagación a lo largo del camino. TIREM calcula el grado de obstrucción de la zona de fresnel y usa esto para hacer un ajuste proporcional a la cantidad de pérdidas en un camino. Adicionalmente el modelo de propagación ha sido probado bajo ambiente de redes inalámbricas MANET, permitiendo calcular las pérdidas de propagación para cada par de nodos dentro de una red [17].

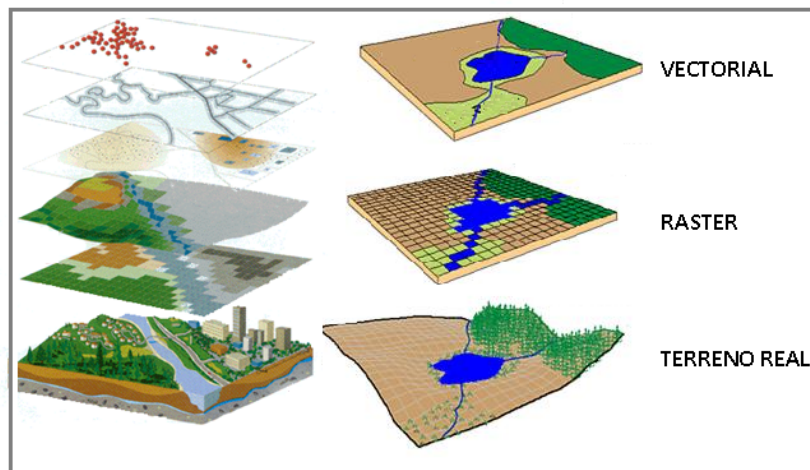
2.5 SIG (SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA)

Un SIG es un sistema informático utilizado para localizar y analizar las relaciones espaciales entre las características de la tierra. Estos sistemas permiten almacenar, procesar y presentar datos georreferenciados. Según NCGIA (National Centre of Geographic Information and

Analysis) “un SIG es un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión”[18]. Una etapa esencial en la construcción de un SIG es la elección del modelo de datos. En este proceso se crean una serie de reglas que permiten la traslación de la realidad espacial compleja a una representación sintética digital. Estas reglas son básicamente lo que se denomina modelo de datos.

En función de la forma de representar el espacio los SIGs se pueden clasificar en dos modelos o formatos: La SIG vectorial y SIG Raster [19]. La figura 2 muestra un ejemplo de los formatos usados en cada SIG. Los SIG Raster se representan como una estructura de datos en celdas regularmente espaciados formando una rejilla, donde el área geográfica es dividida en celdas identificadas por filas y columnas. Cada celda de la rejilla almacena información de las coordenadas de localización del terreno. Por su parte los SIG vectoriales implican el uso de vectores para representar un elemento geográfico. El vector de datos se caracteriza por el uso de puntos secuenciales o vértices para definir un segmento lineal. Cada vértice se compone de una coordenada X y una coordenada Y [20].

Figura 2. Representación de datos de terreno para un SIG Raster y SIG Vectorial. Fuente: Elaboración propia basada en [19]



Los SIG requieren de archivos con extensiones determinadas dependiendo el tipo de SIG usado. Estos archivos son creados principalmente por organismos cartográficos gubernamentales como el USGS (United States Geological Survey) o la NGA (National Geospatial-Intelligence Agency). Para los SIG Raster algunos de los formatos aceptados son GeoTIFF, USGS DEM, DEM, DTED, Arc ASCII Grid, GTOPO30 y ETOPO. Para los SIG Vectoriales son admitidos archivos con extensiones ESRI shapefiles, KML, VMAP0, DCW y GSHHS[21]. Estos archivos generalmente son llamados modelos de terreno y son una representación de la topografía digital de una zona terrestre creada a partir de los datos de altitud del terreno. Estos modelos muestran de forma matemática los valores de altura con

respecto al nivel del mar, que permiten caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Los modelos de datos de terreno son útiles para modelos de propagación que requieren especificaciones del terreno[22].

2.5.1 Raster

El modelo Raster representa la información geográfica dividiéndola en celdas o píxeles formando una matriz. Las celdas están referenciadas directamente por una columna y una fila que representan la posición espacial del dato a representar. Dentro de cada celda hay un valor temático asignado que puede ser una altura, un elemento topográfico o un cálculo estadístico. Entre menor sea el tamaño de la celda el cálculo computacional es mayor. Raster requiere de un modelo digital de terreno. Los modelos digitales de terreno son denominados DTED (Digital Terrain Elevation Data), DTM (Digital Terrain Model) o DTD (Digital Terrain Data). Para este tipo de formatos el valor temático es la altura del terreno y las columnas y filas son las coordenadas del mapa[23]. DTED es una Base de Datos de elevación de terreno proporcionada por la Agencia de Mapas e Imágenes Nacional de Estados Unidos. Esta base de datos representa una matriz de los datos de elevación de una porción de la superficie de la tierra. Los datos de elevación están espaciados a intervalos regulares con valores de elevación vertical en metros [24]. Uno de los SIG para realizar adquisiciones de los mapas de terreno es el NGA Raster Roam, que permite determinar la ubicación geográfica de la zona (latitud y longitud) y así poder obtener los modelos digitales de terreno para posteriormente ser usados[25].

2.6 PREDICCIÓN DE UN EVENTO DE TRÁFICO VEHICULAR

Un evento está definido como un conjunto de posibles resultados que se pueden dar en un espacio determinado. Para este caso los eventos se determinan sobre un segmento vial y son definidos como eventos de tráfico vehicular. Dentro de esta clase de eventos se pueden destacar: la aparición de un vehículo, cruce de vehículos, infracciones en la vía y detección de accidentes. La captura de estos eventos contribuyen al desarrollo de aplicaciones como el monitoreo de vías, sistemas de vigilancia ó automatización de peajes. El comportamiento del tráfico vehicular es un proceso de difícil predicción, que puede ser modelado como un proceso estocástico en función del tiempo y no como un proceso determinístico; porque en este tipo de procesos el comportamiento es afectado por diversos factores y tanto sus entradas como salidas cambian[26, 27]. Este fenómeno cambia en función de muchas variables donde principalmente se destacan el tiempo y el segmento vial analizado.

Para determinar un evento de tráfico vehicular sobre un segmento vial debe existir la presencia de vehículos sobre la vía. La probabilidad de encontrar un vehículo en la vía está sujeta a varias condiciones: La aparición de un vehículo es independiente de la aparición de otro vehículo, la variación del número de vehículos que pasa por un punto respecto a otro punto es independiente en un mismo intervalo de tiempo y el número de vehículos que pasa por el mismo punto en intervalos de tiempo distintos es independiente. Estas características

permiten definir que la aparición de un vehículo en la vía se modela como un proceso de poisson que obedece a la distribución de Poisson [28].

El proceso de Poisson es un proceso estadístico de conteo en un intervalo de tiempo de $[0, \infty]$, caracterizado por el arribo de eventos. En este proceso los intervalos de tiempo entre arribos se comportan como una distribución de tipo exponencial[29]. Este proceso se define por las ecuaciones (1-5) y esta descrito por 5 parámetros: $f_n(t)$ Función de densidad de probabilidad exponencial, $F_n(t)$ Función acumulativa de probabilidad exponencial, $P(\tau_1 > t)$ Probabilidad que la variable aleatoria τ_1 tome valores mayores a t , es decir que un evento ocurra en un tiempo posterior a t , λ Número promedio de tiempo de arribo de los eventos vehiculares y finalmente τ_n representa el tiempo transcurrido hasta el siguiente arribo de un evento.

$$f_n(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1)$$

$$F_n(t) = P(\tau_1 \leq t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$$P(\tau_1 > t) = 1 - F_n(t) \quad (3)$$

$$P(\tau_1 > t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t}) \quad (4)$$

$$P(\tau_1 > t) = e^{-\lambda t} \quad (5)$$

La variable aleatoria τ_1 representa el tiempo que transcurre desde el tiempo 0 hasta el siguiente arribo de un evento. Así mismo τ_2 es el tiempo entre el primer y segundo arribo de un evento. Las variables aleatorias $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4 \dots \tau_n$ son denominadas tiempos de arribo del proceso de poisson con distribución exponencial, independientes entre sí con una media aritmética definida en la ecuación (6). La media aritmética de la distribución exponencial μ_a es el recíproco del media aritmética de la distribución de Poisson λ [30].

$$\mu_a = \frac{1}{\lambda} \quad (6)$$

2.7 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

Para el diseño de red se requiere la selección de un simulador de red que permita modelar la red para posteriormente evaluar su rendimiento. La selección del simulador implicó tener en cuenta las necesidades del diseño de red. Esto significa que el simulador debe permitir la selección y configuración de un modelo de propagación, un modelo de datos del terreno y la inclusión de imágenes georreferenciadas del segmento vial. El simulador debe permitir el diseño de redes inalámbricas y la modificación de los parámetros del estándar IEEE802.11. Adicionalmente se busca un simulador que permita la recopilación de resultados, cuente con una interfaz gráfica y tenga la documentación necesaria para el manejo del mismo. Se estudiaron varios simuladores para la selección de uno de ellos. La comparación de los simuladores se ve en la tabla 1, allí se evaluaron algunas de las características mencionadas anteriormente.

En la tabla 1 se define si los simuladores evaluados cuentan o no con la característica y se establecen dos valores numéricos cero (0) y uno (1) para la evaluación. El cero (0) indica que el simulador no cuenta con esta característica y uno (1) que si cuenta con ella.

TABLA 1. Selección Simulador para el diseño de red

| Simulador/Característica | OMNET++ | | OPNET | | NCTUNS | | QUALNET | |
|----------------------------|---------|---|-------|---|--------|---|---------|---|
| Lenguaje Primitivo C++ | No | 0 | Si | 1 | No | 0 | No | 0 |
| Compatible IEEE802.11 | Si | 1 | Si | 1 | Si | 1 | Si | 1 |
| Operación con 802.11p | No | 0 | No | 0 | No | 0 | No | 0 |
| Interfaz Gráfica | Si | 1 | Si | 1 | Si | 1 | Si | 1 |
| Documentación disponible | Si | 1 | Si | 1 | Si | 1 | Si | 1 |
| Modelo de terreno de datos | No | 0 | Si | 1 | No | 0 | No | 0 |
| Visualización Resultados | Si | 1 | Si | 1 | No | 0 | Si | 1 |
| Total | 4 | | 6 | | 3 | | 4 | |

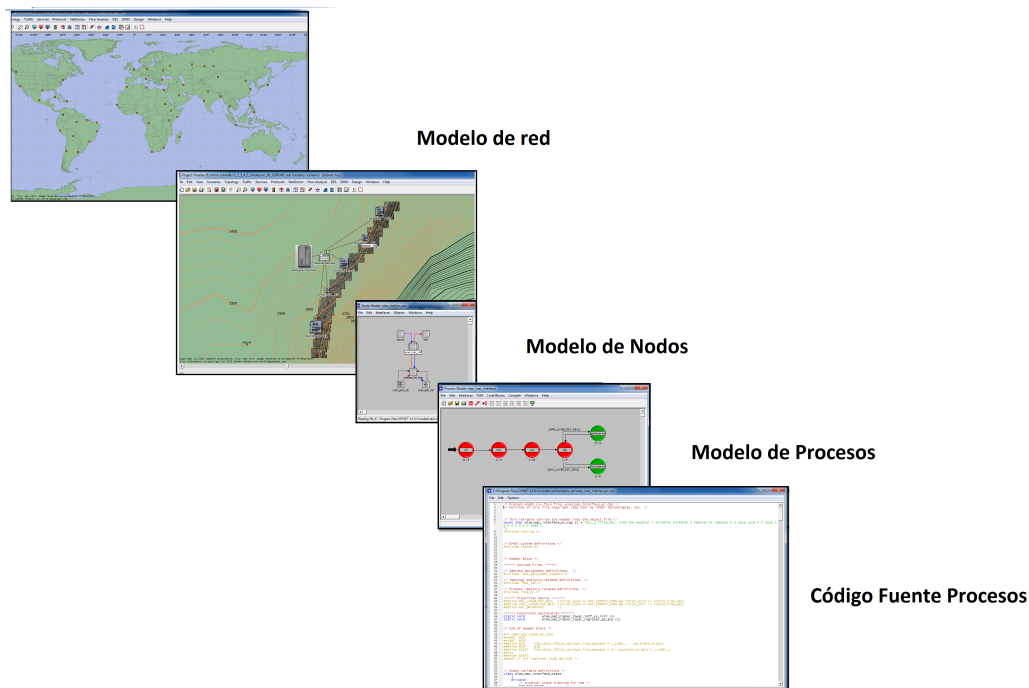
Una vez realizada la comparación y evaluación de los simuladores, se definió que la red propuesta será diseñada y simulada en el software de simulación OPNET MODELER 14.0 gracias a que cumple con la mayoría de características para realizar el diseño propuesto.

Este simulador permite al diseñador en el caso de las redes de telecomunicaciones realizar simulaciones de entornos de interés, permitiéndole la optimización de los recursos a su disposición para su posterior despliegue en un ambiente real. OPNET Modeler™ permite la configuración de requerimientos en una red de manera muy aproximada tanto para redes cableadas e inalámbricas. Es compatible con una amplia gama de tecnologías inalámbricas como MANET, IEEE 802.11 wireless LAN, WiMAX, Bluetooth y redes de satélites.

OPNET proporciona una interfaz con editor gráfico que permite la creación de modelos para diversas entidades de la red de capa física e incluye paquetes gráficos y bibliotecas para la representación de los escenarios de simulación y de los resultados obtenidos. El simulador define tres fases básicas del proceso de implementación. En primer lugar, elegir y configurar modelos de nodo para utilizar en las simulaciones. En segundo lugar, construir y organizar la red mediante la creación de conexiones para las entidades. En tercer lugar, seleccionar las estadísticas de tipo local o global para ser recopiladas durante las simulaciones. El anexo 1 describe las principales funciones utilizadas en OPNET para este diseño de red[31].

OPNET Modeler™ define una jerarquía de diseño para los dispositivos y permite la modificación de los atributos de los dispositivos. Esta jerarquía de diseño define 3 modelos. Modelo de red (redes y subredes), modelo de nodos (nodos y estaciones de trabajo) y modelo de procesos (funcionalidad de cada nodo). La figura 3 muestra esta jerarquía de los modelos.

Figura 3. Nodos Wireless y sus Modulo de Nodos. Fuente: Elaboración propia



En el modelo de red se permite la creación topologías y nodos. En el modelo de nodos se permite la edición de cada uno de los atributos de estos nodos, mostrando las conexiones internas y los procesos que maneja cada nodo. La especificación de las funciones y procesos capaces de desarrollar por cada nodo son definidos en el modelo de procesos. Estos modelos pueden ser editados en forma directa y paralela a la estructura real de la red, los equipos y los protocolos. En el modelo de procesos son establecidas maquinas de estados y transiciones generadas como respuesta al desarrollo de cada evento ejecutado en los nodos. Cada máquina de estado define variables que realizan llamados a determinadas librerías de OPNET según se requiera. Las librerías de Opnet están desarrolladas en el lenguaje primitivo C/C++, y se ajustan a los estándares que simula y al funcionamiento de los protocolos.

2.8 VARIABLES DE DESEMPEÑO DE LA RED.

Para realizar el análisis de rendimiento de la red es importante hacerlo a partir de determinadas variables de rendimiento también denominadas métricas. Las medidas de estas métricas son necesarias para comprender el comportamiento de una red de datos. Los análisis de estas variables ayudan a identificar las debilidades sobre la red y a determinar umbrales de comportamiento para determinar anomalías [32]. Existen muchas métricas de rendimiento empleadas para evaluar la red. Dentro de estas métricas se destacan: throughput, retardo, Jitter, tiempo de convergencia, ancho de banda y pérdida de paquetes [33, 34]. Para este caso el análisis de rendimiento se realizará sobre las variables de rendimiento de throughput y retardo.

2.8.1 Throughput

Throughput es una medida de transferencia de datos y representa la tasa máxima en la que ninguna de las tramas es descartada por un dispositivo. El Throughput está dado en Mbps[35]. El throughput está representado por la ecuación (7) y se obtiene de dividir la cantidad de datos (L) a transmitir en bits por el tiempo (t) que se toman estos datos en alcanzar su destino en una red de datos. El tiempo está dado en segundos (s).

$$T = \frac{L}{t} \quad (7)$$

Para el caso de evaluaciones de rendimiento a nivel de capa MAC en redes WLAN, el throughput se describe como el número total de bits enviados a la capa superior desde la capa MAC. El throughput total de la red es el número total de bits por segundo, enviado desde todos los nodos WLAN a las capas superiores[36].

El throughput también se relaciona con la carga de datos generada por cada dispositivo de la red en un tiempo determinado. La carga de datos se puede determinar a partir de parámetros de tráfico de los datos. La carga de datos C_d está dada la ecuación (8) y está descrita por dos parámetros: Media aritmética de la distribución de tamaño de los paquetes μ_T y la media aritmética de la distribución de arribo de paquetes μ_a . La C_d permite definir la carga de datos generada por un dispositivo terminal conociendo el comportamiento estadístico del tráfico de datos.

$$C_d = \frac{\mu_T}{\mu_a} \quad (8)$$

2.8.2 Retardo

El Retardo R corresponde al tiempo que toma un paquete en llegar a su destino final en una red de datos[37]. El retardo de un paquete de datos tiene en cuenta los retardos por transmisión, encolamiento, propagación y procesamiento en el destino. Para redes WLAN, el retardo *end to end* es el tiempo transcurrido desde que un paquete es generado por una aplicación hasta que se transmite con éxito en la WLAN[38]. En redes WLAN el retardo de acceso al medio MAC incluye el tiempo total desde que una estación empieza la contención del canal para la que la transmisión de datos empiece exitosamente, el tiempo de encolamiento y el tiempo de la transmisión del paquete. El retardo también representa el intervalo durante el cual las tramas de datos en una estación son transmitidas exitosamente[39].

El Retardo en redes 802.11 se puede dividir en tres partes:

- Retardo de Encolamiento R_q : Representa el intervalo de tiempo que va desde el momento en el paquete entra en la cola de emisor del enlace, hasta el tiempo en que el paquete se convierte en el primero de la cola del nodo.
- Retardo de Contención R_c : Es el intervalo entre el momento en que un paquete de datos llega al inicio de la cola y cuando el paquete es enviado al medio físico. Este

intervalo refleja el tiempo de espera cuando un nodo no puede para acceder al canal inmediatamente debido a otras transmisiones en su área de detección de portadora.

- Retardo de transmisión R_T : Es el intervalo de tiempo para transmitir el paquete completo, este retardo también incluye posibles retransmisiones en caso de colisiones.

Finalmente el retardo MAC para redes 802.11 se describe por los 3 parámetros mencionados anteriormente y se define en la ecuación (9).

$$R = R_q + R_c + R_T \quad (9)$$

3 ESPECIFICACIONES

El proyecto está enfocado en la propuesta de un diseño de red de sensores 802.11p que detecte eventos de tráfico vehicular sobre un segmento vial de la ciudad de Bogotá para posteriormente realizar un análisis del rendimiento de la red. El análisis será realizado a partir de las simulaciones en OPNET Modeler. En este contexto el primer paso para el diseño de red se enfoca en estudiar con detalle la finalidad del sistema. La red particularmente será una red de sensores que realicen la adquisición de eventos de tráfico vehicular sobre un segmento vial para luego transmitir la información y concentrarla en un punto central.

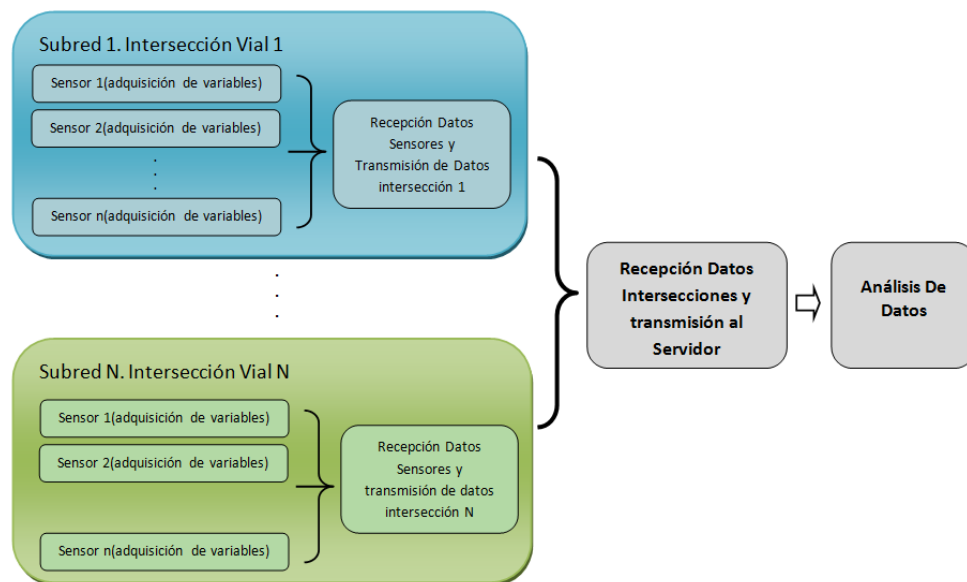
La elección de diseñar la red sobre 802.11p es debido a que este estándar está orientado hacia aplicaciones en ambientes vehiculares y está diseñado para ambientes inalámbricos de tipo Outdoor. Adicionalmente su alcance y potencia de transmisión son mayores respecto a los estándares 802.11 existentes y su frecuencia de operación no está siendo ampliamente utilizada en la actualidad, lo que contribuye a la disminución de interferencias, principalmente en estas características se fundamentan su elección.

Es importante determinar que eventos de tráfico vehicular serian relevantes de acuerdo a la finalidad del ITS. Luego de seleccionar el evento de tráfico vehicular, se deben caracterizar los datos del evento mediante distribuciones estadísticas y así lograr simular el tráfico de datos generado por este evento. La detección del evento seleccionado sobre el segmento vial se realizará mediante la captura de imágenes o videos en determinadas intersecciones viales. Para este diseño se simulará el envío de estas imágenes y videos desde cada uno de los nodos sensores mediante la configuración de distribuciones estadísticas que permitan caracterizar el tráfico de datos de la red. Para determinar los valores numéricos de las medias aritméticas de estas distribuciones estadísticas, se tienen en cuenta características propias del comportamiento de tráfico vehicular de Bogotá para luego establecer relaciones con el tráfico de datos de la red.

Una vez realizada la caracterización de datos y configurados en los nodos, la información se debe transmitir a un punto central. El punto central se encargará de organizar y darle sentido a la información recibida sobre el evento de tráfico vehicular. Un correcto análisis

de la información recibida en el punto central permitirá obtener resultados coherentes y determinar características particulares de la zona de la ciudad evaluada. La figura 4 permite ver el proceso que se debe efectuar para centralizar la información. En primer lugar se realiza la adquisición de los datos referentes a evento de tráfico vehicular, luego se envía la información hacia el nodo que generalmente es un AP al que pertenece el sensor. Una vez el AP tiene la información proveniente de los sensores asociados a él, este envía la información al nodo central. Este nodo central realiza el análisis de los datos y almacena la información. La recolección de toda la información permitirá determinar información y características del segmento de la vía que serán útiles para entidades encargadas del monitoreo y control del tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá.

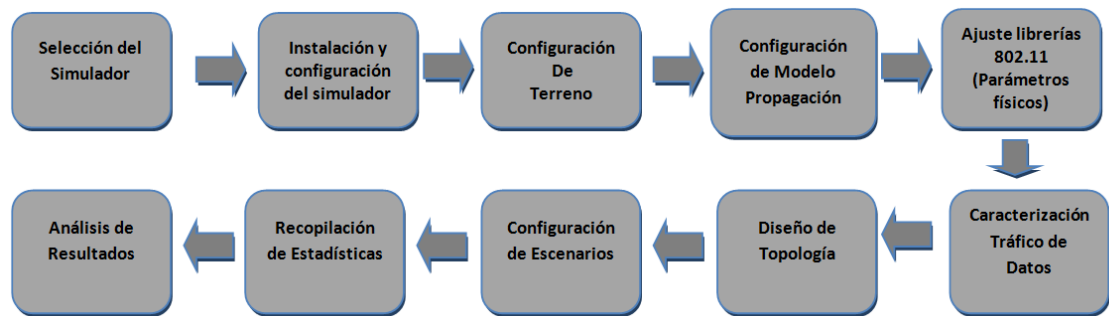
Figura 4. Diagrama de bloques de la descripción de la función red de sensores. Fuente: Elaboración propia



3.1 REQUERIMIENTOS

Una vez se detalla la finalidad del proyecto, el diseño implica la definición del medio de transmisión, datos del terreno, modelo de propagación, selección de dispositivos, configuración de topología, caracterización del tráfico de datos que se van a transmitir, estudio económico y selección de las estadísticas a recopilar para realizar el estudio de rendimiento del diseño de red propuesto. La figura 5 permite ver un diagrama de bloques que describe de manera general los pasos para el desarrollo de este proyecto de investigación.

Figura 5. Diagrama de bloques de la descripción general del proyecto. Fuente: Elaboración propia



Dentro de los requerimientos para el diseño se destacan que la comunicación sea de tipo inalámbrica ya que la finalidad de la red es realizar una evaluación sobre el estándar 802.11 para ambientes vehiculares y que exista centralización de la información, para esto se requiere la existencia de un punto central donde se administre y manipule la información proveniente de los sensores. Una vez se propone un diseño de red, se requiere realizar la evaluación del diseño.

Para realizar esta la evaluación se definen 3 escenarios. Los dos primeros escenarios evalúan el rendimiento de la red WLAN a nivel de capa física y de capa de acceso al medio del modelo OSI para cada nodo sensor de la red. El escenario 1 evalúa la transmisión de una imagen mediante la configuración de parámetros de tráfico. El escenario 2 evalúa el rendimiento realizando la transmisión de 300 imágenes que equivalen a una transmisión de video de 30 segundos y el escenario 3 evalúa el rendimiento a nivel de aplicación en tiempo real. La aplicación seleccionada es la transmisión de vídeo desde cada uno de los nodos sensores. Las simulaciones de los escenarios permiten determinar el comportamiento de este tipo de red para el segmento vial, a partir del análisis de los parámetros de carga de datos y retardo para cada nodo de la red y a nivel global de la red ver el comportamiento del throughput. En la tabla 2 se detallan los principales parámetros de configuración que son definidos como entradas iniciales de las simulaciones y así mismo la salida esperada en el desarrollo del proyecto.

En cuanto a las especificaciones de software, la simulación fue llevada a cabo en un computador Lenovo Intel(R) Core™ i3 M370 @ 2.40GHz, 4GB de RAM, sistema operativo Microsoft Windows 7 Professional Versión 2009.

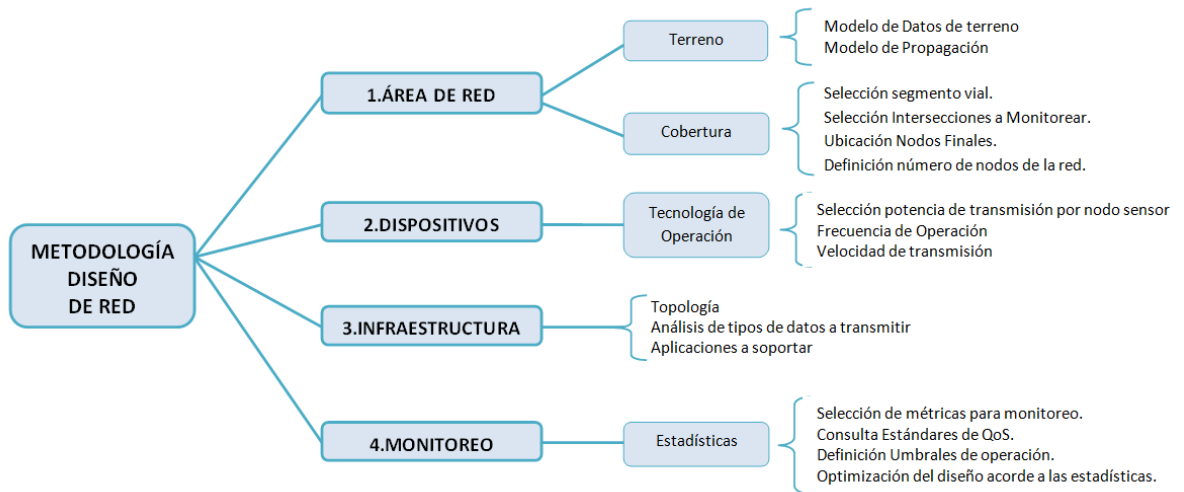
TABLA 2. Entradas y salidas principales del proyecto

| Entradas: Parámetros para la configuración de la red | | Salidas |
|--|--|---|
| Modelo | Mapas de terreno | Estadísticas de Simulación y análisis de Resultados respecto a Retardo Carga de datos y Throughput. |
| | Mapas de elevación Líneas de terreno | |
| | Configuración Parámetros Modelo de Propagación | |
| Nodos | Ajustes al estándar 802.11p | |
| | Número de nodos por segmento de red | |
| | Topología | |
| | Distancia entre nodos y Access Point | |
| | Altura respecto al suelo | |
| Datos | Configuración de los nodos respecto al terreno. | |
| | Distribución de probabilidad de arribo de paquetes. | |
| | Distribución tamaño de paquetes en bytes. | |
| | Configuración el perfil de la aplicación de vídeo para asociar al sensor | |

3.1.1 Metodología de Diseño

Para realizar el diseño de la red se tomaron en cuenta los lineamientos de diseño definidos en la sección 2.3. Estos lineamientos están definidos en guías de diseño y despliegue de redes inalámbricas. A continuación, la figura 6 describe los pasos que serán seguidos para este diseño de red. Se destacan 4 aspectos principales: Área geográfica, Dispositivos, Infraestructura y Monitoreo. Respecto al área se define el segmento vial, segmentos de monitoreo, ubicación de los nodos sensores, número total del sensores, modelo de propagación y datos del terreno. Para los dispositivos se selecciona todo lo referente a parámetros físicos. La infraestructura implica definir la topología de acuerdo a la aplicaciones a soportar y al tipo información a transmitir. El monitoreo define las métricas tomadas en cuenta para ver el comportamiento del diseño de red propuesto.

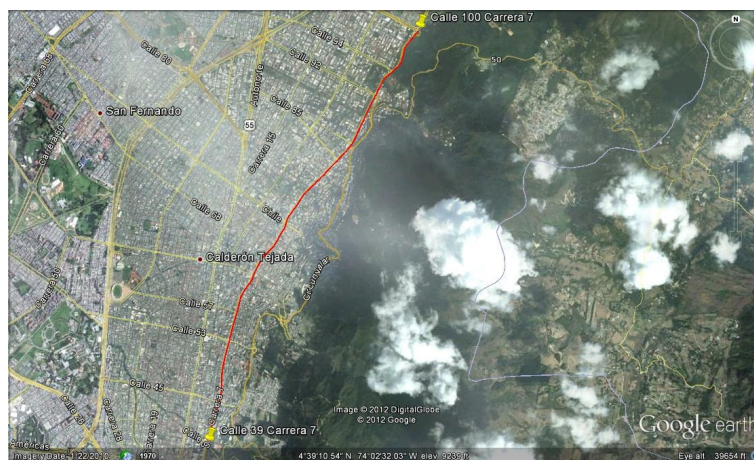
Figura 6. Metodología para el diseño de red propuesto. Fuente: Elaboración propia



4 DESARROLLO

Este diseño de red cubre un segmento vial de longitud aproximada de 6867.10m y está comprendido sobre la carrera séptima entre las calles 39 y 100. La selección del segmento vial se fundamenta en que el ITS actualmente desarrollado en la PUJ analiza eventos de tráfico vehicular sobre un punto de la carrera séptima de la ciudad de Bogotá y así mismo la finalidad de esta investigación es la integración de nodos sobre este mismo segmento vial. El segmento que cubre la red se ve en la Figura 7.

Figura 7. Segmento Vial que cubrirá el diseño de red propuesto. Fuente: Google Earth



La finalidad de la red es la detección de eventos de tráfico vehicular, por esta razón se definió que los sensores estarán ubicados sobre determinadas intersecciones viales. La tabla 3 muestra las intersecciones seleccionadas. Se define una BSS por cada intersección dentro de la red. Cada BSS está compuesta por un Access Point (AP) que brinda conectividad inalámbrica a los sensores. La ubicación exacta de los sensores fue tomada de mapas satelitales de Google Earth así mismo la distancia de los sensores respecto al AP. El diseño fue modelado en el software OPNET MODELER 14.0 para posteriormente ser simulado. La ubicación de los sensores se puede consultar en el anexo 2.

TABLA 3. Intersecciones monitoreadas por los Sensores

| No | Intersección | Sensores/AP |
|----|--------------|-------------|
| 1 | Calle 39 | 4 |
| 2 | Calle 45 | 4 |
| 3 | Calle 53 | 4 |
| 4 | Calle 59 | 4 |
| 5 | Calle 63 | 4 |
| 6 | Calle 67 | 4 |
| 7 | Calle 72 | 4 |
| 8 | Calle 77 | 3 |
| 9 | Calle 82 | 4 |
| 10 | Calle 85 | 3 |
| 11 | Calle 92 | 4 |
| 12 | Calle 94 | 4 |
| 13 | Calle 100 | 3 |

4.1 MODELO DE PROPAGACIÓN Y ESPECIFICACIONES DEL TERRENO

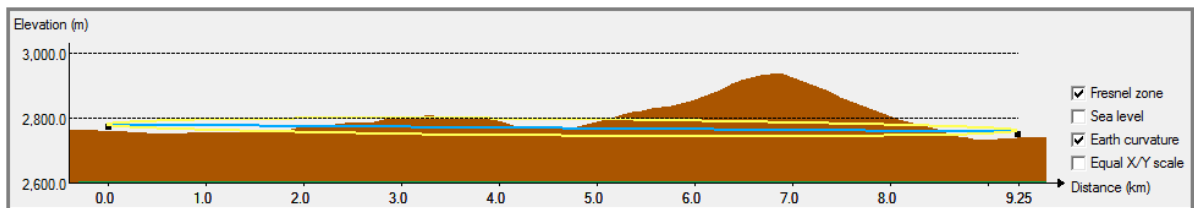
El modelo de propagación seleccionado fue TIREM y se definen los parámetros necesarios para este modelo de propagación de acuerdo al área geográfica. La tabla 4 muestra estos valores de acuerdo al terreno de la ciudad de Bogotá. Los valores de estos parámetros fueron tomados de recomendaciones definidas en la Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU en el Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (UIT-R).

TABLA 4. Parámetros TIREM[40, 41, 42, 43]

| Parámetro | Valor Definido |
|---|-------------------|
| Conductividad sobre la superficie de la tierra | 2.5 Siemens/metro |
| Refractividad | N=360 hPa/K2 |
| Humedad | 20 Gramos/m3 |
| Permitividad Relativa en función de la frecuencia | 18 ^t |
| Frecuencia de Operación | 5.8-5.9GHz |

El modelo de propagación requiere la especificación de los modelos de terreno para realizar sus cálculos. Para este caso se trabajó el modelo de datos de terreno de tipo DTED. Los datos del mapa de terreno especifican las coordenadas geográficas de la ciudad de Bogotá: Latitud Norte 4°35'56"57 y Longitud Oeste de Greenwich 74°04'51"30 como centro del mapa. Adicionalmente se incluye el mapa del segmento vial con las respectivas calles y carreras para realizar una ubicación más real de los sensores. Una vez se realizaron las configuraciones de TIREM y del terreno en la Figura 8 se muestra la vista del perfil del terreno del segmento vial y se verifica que el terreno este con la altitud respecto a nivel del mar. La configuración del módulo TMM de OPNET que permite la configuración del modelo de propagación y la descripción del modelo de terreno se ven en el anexo 1.

Figura 8. Perfil del terreno de la ciudad de Bogotá para el segmento vial donde estará ubicada la red 9 km aprox. Fuente: OPNET Modeler.



4.2 CARACTERIZACIÓN DE TRÁFICO DE DATOS

Para poder modelar un tráfico de datos que se acerque a las características de la red es importante definir los eventos de tráfico vehicular que serán analizados en la red para así mismo determinar el tiempo de llegada de los paquetes que contienen la información respecto al evento y así mismo el tamaño de los paquetes. Para este caso en particular los eventos se reducen a un evento; “*detección de infracciones de tránsito dentro de la vía*”. El tipo de datos transportado por la red serán imágenes en ráfagas en periodos de tiempo definidos o vídeo que permitirán la identificación del evento. Esta información será generada por los puntos finales de la red y enviada hacia los nodos de control. Para la caracterización del tráfico de datos de la red se debe definir una distribución estadística tanto para el intervalo de tiempo de generación de tráfico como para el tamaño de los paquetes de datos.

4.2.1 Distribución Estadística para el Arribo de Paquetes de Datos.

En la caracterización del evento de tráfico vehicular se busca modelar la probabilidad de encontrar un vehículo sobre la vía y que este vehículo sea un infractor, por medio de la distribución de probabilidad de poisson. La decisión de seleccionar esta distribución está fundamentada en las características de esta distribución y en los antecedentes recogidos enfocados a modelos de eventos de tráfico vehicular[44, 45].

Esta distribución modela la ocurrencia de una infracción en un área y tiempo determinado $a(x, t)$, con una media $\lambda(x, t)$. La probabilidad de predecir una infracción está dada por

la ecuación (10) y descrita por los siguientes parámetros: m representa el número de infracciones en la vía. $a(x, t) = m$ es el número de infracciones en la vía en un espacio y tiempo determinado. $P[a(x, t) = m]$ define la probabilidad que ocurran m infracciones durante un intervalo de tiempo y λ es el número promedio de infracciones durante el intervalo de tiempo t . Esto se relaciona directamente con las ecuaciones (1) y (5).

$$P[a(x, t) = m] = \frac{\lambda(x, t)^m e^{-\lambda}}{m!} \quad (10)$$

Para tomar la distribución de poisson y poder modelar la ocurrencia de una infracción se hacen las siguientes consideraciones [28]:

- La ocurrencia de infracciones es constante en tiempo, cuando los intervalos de tiempos son pequeños.
- La ocurrencia una infracción de tránsito en la vía es independiente de otra.
- El paso de vehículos corresponde a un proceso aleatorio.
- El número de vehículos que pasan por un punto en un intervalo de tiempo dado es independiente del número de vehículos que pasan por otro punto durante el mismo intervalo.
- Determinar que una infracción ocurra en un intervalo de tiempo prolongado puede ser expresado como una distribución de poisson con un nuevo parámetro $\lambda(x, t)$ resultado de la suma de los parámetros individuales $\lambda(x, t)$ de cada uno de los intervalos de observación en tiempos pequeños. Esto obedece al siguiente enunciado: *“Sea X una variable aleatoria independiente con distribución de probabilidad de poisson λ_1 en un tiempo t_1 y un tiempo t_2 una nueva distribución de poisson λ_2 . La suma de estas distribuciones independientes está dada por una nueva distribución de poisson $\lambda_1 + \lambda_2$ ”*. El anterior enunciado es generalizado en la ecuación (11).

$$\sum_{i=1}^m \chi \sim Poisson_{i=1}^m \sum \lambda_i \quad (11)$$

Esta distribución de probabilidad permite determinar la probabilidad que este sea un infractor en la vía. Para esta distribución se debe determinar el valor de la media aritmética λ , para posteriormente hallar el valor de la media aritmética de la distribución exponencial μ_a mediante la ecuación (6) y así definir el tiempo de arribo de los eventos.

4.2.2 Definición de Parámetros de Distribución Estadística arribo de paquetes

Para este evento vehicular, la media aritmética está relacionada al promedio de infracciones en un tiempo determinado para la ciudad de Bogotá. De acuerdo con la información recolectada en relación al tránsito en Bogotá y a los estudios realizados por la secretaria de movilidad, se determina que la mayoría de las infracciones cometidas por los conductores en la ciudad están asociadas a situaciones como parquear los vehículos en sitios prohibidos,

cruzar los semáforos en rojo, no acatar las señales de tránsito, transitar en el sentido contrario de la vía, llevar sobrecupo de pasajeros, no respetar el paso de los peatones y conducir en estado de embriaguez. Bogotá cuenta con una extensión total de 1.775,98 km^2 , donde 307,3 km^2 hacen referencia al área urbana; 170,45 km^2 al área suburbana y 1.298,15 km^2 de área rural[46]. El área de interés para la detección de infracciones hace referencia al área urbana. El promedio de infracciones de tránsito en Bogotá fue tomado de datos entregados por la secretaria de movilidad de Bogotá. Respectivamente el promedio de infracciones detectadas en Bogotá de enero a julio del 2011 fue de 25560 comparendos. Las 25560 infracciones representan en promedio unas 0.33 infracciones por segundo[47].

El proceso de detección de infracciones de manera automática en la ciudad de Bogotá se realiza utilizando cámaras con dispositivos de reconocimiento de caracteres (placa del vehículo) y cámaras tipo domo. Los diferentes dispositivos electrónicos están dispuestos en la vía y en su mayoría son administrados por una persona encargada de detectar la infracción y registrarla. La información detectada es transmitida al SIMUR (Sistema Integrado de Información sobre Movilidad Urbano Regional) para su procesamiento y notificación al infractor. Este proyecto inicio en enero de 2011 y actualmente cuenta con 67 cámaras de vigilancia monitoreadas por la policía, ubicadas en distintos puntos de la ciudad y 12 cámaras ubicadas en distintos puntos de la carrera Séptima.[48].

De acuerdo con la secretaria de movilidad de Bogotá, el número de intersecciones semaforizadas es 1156 dentro de la malla vial de Bogotá con 15.657,7 km/carril por intersección[49, 50]. Con el número de intersecciones semaforizadas y el área urbana se define que el área que cubre una intersección vial es de 0.265 km^2 . Por otro lado la detección de una infracción en toda el área urbana de Bogotá es aproximadamente 0.33 infracciones por segundo, para hacer una aproximación más real de este promedio se establecen dos relaciones. La primera relación entre el número de infracciones por segundo y el área urbana total de Bogotá y la segunda la relación entre el área que cubre una intersección semaforizada en Bogotá y el número promedio de infracciones por segundo. Estas relaciones determinan que el promedio de infracciones por segundo (λ) en una intersección vial en la ciudad de Bogotá es 2.85×10^{-4} . Mediante la ecuación (6) se define que la media aritmética de la distribución exponencial que describe del arribo de los paquetes que identifican una infracción de tránsito (μ_a) es de 3503.03 segundos. La configuración de estos parámetros de tráfico en OPNET se ven en el anexo 1.

4.2.3 Definición de Parámetros de Distribución Estadística para tamaño de paquetes

El envío de los paquetes está relacionado con que ocurra la detección del evento de un infractor en la vía, esto implica determinar el tamaño de los paquetes de datos que son enviados. Cuando se realiza la detección de un evento en la red, el nodo final envía determinada información para ser analizada. El tipo de información transmitida son imágenes o vídeo[51]. Las imágenes para este tipo de aplicaciones tienen un tamaño de 640x480 píxeles con una profundidad por píxel de 24 bits. Para el caso del vídeo se manejan

imágenes de 320x240 píxeles con una profundidad de 24 bits por píxel. Por esta razón se define un estimado del tamaño por imagen en bits mediante la ecuación (12). La secuencia de imágenes es siempre la misma lo que permite concluir que el tamaño de la información enviada será igual cada vez que sea detectado un evento sobre la vía. De acuerdo a las características de la red se define que la distribución será de tipo constante. Esto implica que el valor de la variable aleatoria siempre es el mismo en este caso el tamaño de los paquetes.

En el escenario 1 se transmite una imagen con una relación de compresión de 16:1. Para el escenario 2 se envía un archivo que equivale al tamaño de un vídeo con duración de 30 segundos enviando 10 imágenes por segundo, es decir 300 imágenes con una relación de compresión de 50:1. Para el envío de las imágenes de los escenarios 1 y 2 se aplicó el proceso de compresión digital porque es fundamental para los procesos de transmisión y almacenamiento de contenidos multimedia. Las relaciones de compresión utilizadas son las tasas de compresión más comúnmente usadas tanto para la transmisión de imágenes como de video[52]. La tabla 5 muestra los tamaños en bits de estas imágenes. La configuración de estos parámetros de tráfico para definir el tamaño del paquete en OPNET Modeler se ven en el anexo 1.

$$Tamaño\ Imagen(bits) = Pixeles\ Horizontales * Pixeles\ Verticales * Profundidad / Pixel(bits) \quad (12)$$

TABLA 5. Tamaños archivos definidos para la transmisión

| Pixeles Horizontales | Pixeles Verticales | Tamaño Imagen(bits) | Tamaño Imagen (Bytes) | Factor de compresión | Tamaño archivo (Bytes) |
|----------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
| 640 | 480 | 7372800 | 921600 | 1:16 | 60000 |
| 320 | 240 | 1843200 | 230400 | 1:50 | 1382400 |

4.3 NODOS SENSORES 802.11p

Para poder realizar el diseño de red acorde con el estándar 802.11p, fueron estudiados los estándares IEEE802.11a e IEEE802.11p. El estudio del estándar 802.11a está fundamentado en que los parámetros de operación del estándar 802.11p en su capa física difieren poco de los parámetros del estándar 802.11a. Se realizó una comparación de los parámetros físicos de cada estándar destacando sus diferencias. Adicionalmente se verificó que los parámetros generales definidos por la capa MAC concuerden con el estándar IEEE802.11. Las diferencias principales entre los parámetros de la capa física del estándar 802.11a y el estándar 802.11p se ven en la tabla 6.

TABLA 6. Diferencias parámetros físicos estándar 802.11a y estándar 802.11p

| Parámetros Físicos | | 802.11a | 802.11p |
|-------------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|
| Alcance | | 300 metros | 1000 metros |
| Frecuencia de Operación | | 5.15 a 5.25GHz | 5.855 a 5.925 GHz |
| | | 5.25 a 5.35GHz | |
| | | 5.725 a 5.825 GHz | |
| Ancho de banda de canal | | 20 MHz | 10 MHz |
| Espaciamiento de Subportadora | | 0.3125 MHz | 0.15625 MHz |
| Modulación OFDM (PHY) | Duración Símbolo | 4 μ s | 8 μ s |
| | Tiempo Guarda | 0.8 μ s | 1.6 μ s |
| | Duración de Preámbulo | 16 μ s | 32 μ s |
| Slot time | | 9 μ s | 13 μ s |
| SIFS | | 16 μ s | 32 μ s |

Los ajustes fueron realizados a los procesos definidos para la operación de los nodos inalámbricos 802.11 en las librerías del módulo Wireless Suite de OPNET. Los parámetros físicos que se ven en la tabla 6 fueron modificados en las librerías definidas por el simulador para la operación del estándar 802.11a. Para identificar las librerías que deben ser modificadas, fue examinado tanto el nodo estación “*Station*” como el nodo estación de trabajo “*Workstation*” en sus capas internas. La figura 9 permite ver la identificación de uno de los procesos de operación modificados en el nodo.

En el proceso para la modificación de los procesos, inicialmente se examina el nodo a nivel de módulos y se identifican los módulos que definen la operación de las capas física y MAC de los nodos. En este caso se identifica el módulo *wireless_lan_mac*. La operación de este módulo la define el proceso *Wlan_dispatch*. Una vez se identifica el proceso se debe buscar en las librerías del simulador este proceso para ser modificado. La modificación requiere previos permisos de administrador, una vez realizado esto, se realizan los respectivos ajustes. Para este caso en particular, la figura 9 muestra la modificación de la frecuencia de operación de los canales según lo determina el estándar IEEE 802.11p. La tabla 7 muestra todas las variables modificadas en las librerías de OPNET. Esta tabla permite ver los valores previos y posteriores a la modificación de acuerdo con los parámetros definidos en la tabla 6.

Figura 9. Identificación de procesos a modificar para los ajustes al estándar 802.11p. Fuente: Elaboración propia basada en Opnet Modeler

The figure illustrates the process of identifying and modifying processes in Opnet Modeler for 802.11p standard adjustments. It consists of three main parts:

- Node Model Diagram:** A window titled "Node Model: wlan_station_adv" showing a network diagram with components like "source", "sink", "wlan_mac_rf", "wlan_mac", "wlan_port_n0", and "wlan_port_n1".
- Attributes Window:** A window titled "(wlan_mac) Attributes" showing a table of attributes and their values:

| Attribute | Value |
|--------------------------------------|------------------|
| name | wireless_lan_mac |
| process model | wlan_dispatch |
| icon name | processor |
| Wireless LAN | |
| Wireless LAN Address | promoted |
| Wireless LAN Wireless LAN Parameters | promoted |

- C Code:** A Notepad++ window showing the C code for "wlan_dispatch.pr.c". The code includes headers, defines global variables, and sets up arrays for 802.11a channels and data rates. Key lines are highlighted with orange boxes:

```

1  /* Process model C form file: wlan_dispatch.pr.c */
2  /* Portions of this file copyright 1992-2007 by OPNET Technologies, Inc. */
3
4  /* This variable carries the header into the object file */
5  const char wlan_dispatch_pr_c [] = "MIL_3_Tfile_Hdr_140A 30A modeler 7 5009AE35 5009AE35 1 PaOskar-PC PaOskar 0 0 none none 0 0 none 0 0 0 0 0 0 0 18a9 3";
6  #include <string.h>
7
8  /* OPNET system definitions */
9  #include <opnet.h>
10
11 /* Header Block */
12
13 #include "wlan_support.h"
14
15 /** Define the WLAN global variables, which are declared in wlan_support.h. */
16
17 /* Global linked list of AP position info. */
18 WlanT_AP_Position_Info* global_ap_pos_info_head = OPC_NIL;
19
20 /* Global variable to keep note of the nature of the subnet. */
21 /* This variable is initialized to not set. */
22 WlanT_Bss_Identification_Approach bss_id_type = WlanC_Not_Set;
23
24 /* Read-only array of the minimum frequencies of the 12 operational 802.11a */
25 /* WLAN channels. */
26 double WLANC_11a_CHNL_MIN_FREQ_ARRAY [WLANC_11a_OPER_CHNL_COUNT] =
27 {5850.0, 5860.0, 5870.0, 5880.0, 5890.0, 5900.0, 5910.0};
28
29 /* Read-only arrays for mandatory 802.11a and 802.11g data rates. */
30 double WLANC_11a_MANDATORY_DRATE_ARRAY [3] = {54000000.0, 24000000.0, 12000000.0};
31 double WLANC_11g_MANDATORY_DRATE_ARRAY [7] = {54000000.0, 24000000.0, 12000000.0, 6000000.0, 5500000.0, 2000000.0, 1000000.0};
32
33 /* Reset one of the packet field index global variables so its value can be */

```

TABLA 7. Resumen de variables Modificadas

| Librería | Variable Modificada | Valor Previo | Valor Actual | Ruta |
|--------------------|--|--|--|---|
| Wlan_propdel.ps.c | MAX_DISTANCE | 300 m. | 1000 m. | C:\Program Files\OPNET\14.0.A\models\std\wireless_lan |
| Wlan_support | WLANC_11a_CHNL_BANDWIDTH | 20MHz | 10MHz | C:\Program Files\OPNET\14.0.A\models\std\include |
| | WLANC_11a_CHNL_SPACING | 20MHz | 10 MHz | C:\Program Files\OPNET\14.0.A\models\std\include |
| | WLANC_11a_FIRST_CHNL_MIN_FREQ 5170 | 5170 MHz | 5850 MHz | C:\Program Files\OPNET\14.0.A\models\std\include |
| Wlan_dispatch.pr.c | WLANC_11a_CHNL_MIN_FREQ_ARRAY [WLANC_11a_OPER_CHNL_COUNT] | 5170 MHz 5190 MHz 5210 MHz 5230 MHz 5250 MHz 5270 MHz 5290 MHz 5310 MHz | 5850 MHz 5860 MHz 5870 MHz 5880 MHz 5890 MHz 5900 MHz 5910 MHz | C:\Program Files\OPNET\14.0.A\models\std\wireless_lan |
| Wlan_mac.pr.c | slot_time | 9E-06 | 13E-06 | C:\Program Files\OPNET\14.0.A\models\std\wireless_lan\wlan_mac.pr.c |
| Wlan_mac.pr.c | sifs_time | 16E-06 | 32E-06 | C:\Program Files\OPNET\14.0.A\models\std\wireless_lan\wlan_mac.pr.c |

4.4 DISEÑO FINAL

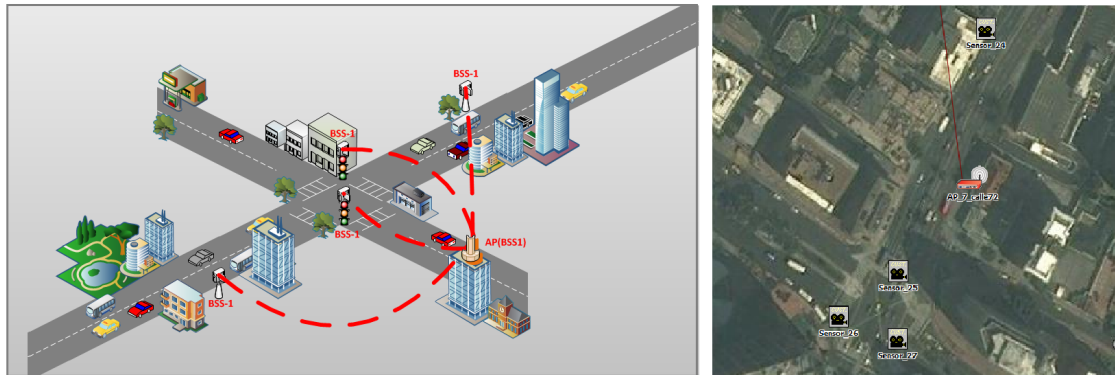
Una vez se realizó la configuración de todos los requerimientos para el diseño se presenta la propuesta final de la red. Este diseño empieza por el despliegue en primer nivel. Este nivel está compuesto por las 13 intersecciones destacadas sobre el segmento vial. Cada intersección formará un BSS, esto implica que el AP y los sensores estarán identificados por su BSS correspondiente. Dado el caso que se desee la integración de un nuevo sensor solo bastará con integrarlo a la red con su respectivo BSS. La Figura 10 muestra una de estas subredes. El número de sensores por intersección en promedio es de 4 y la altura de los nodos sensores está entre 7 y 20 m de acuerdo al Estándar 802.11p. La Figura 11 muestra la integración de estas subredes. En este nivel están los AP y Bridges y es considerado el segundo punto de concentración de información y finalmente la capa de administración

donde se encuentran los servidores de almacenamiento. El diseño final propuesto se ve en la Figura 12 y la tabla 8 sintetiza las principales características del diseño de red propuesto de acuerdo con la metodología de diseño de la sección 3.

TABLA 8. Principales parámetros diseño propuesto

| Características Diseño de red propuesta | |
|---|--------------------------------------|
| Modelo de Datos | Raster DTED |
| Modelo de Propagación | TIREM |
| Segmento Vial | Carrera 7 Calle 39-calle 100 |
| Número de Intersecciones Monitoreadas | 13 |
| Número total de sensores | 48 |
| Potencia Transmisión | 0.022 Watts |
| Frecuencia de Operación | 5.855 a 5.925 GHz |
| Velocidad de Transmision | 54 Mbps |
| Topología | Estrella |
| Aplicaciones | Transmisión de datos y Video |
| Estadísticas Seleccionadas | Throughput, retardo y carga de datos |
| Optimización Rendimiento | Reacomodación geográfica de la red |

Figura 10. Intersección Vial. Ubicación de los sensores pertenecientes a un BSS sobre el segmento vial en particular. Fuente: Elaboración propia



- La información de los nodos sensores finalmente se concentra en un punto central.

Adicionalmente se realizó un estudio de las especificaciones de los equipos y se definieron las principales características de acuerdo a los requerimientos y especificaciones del estándar 802.11p. Esta información puede ser consultada en el anexo 3.

4.5 ESTUDIO ECONÓMICO

Una vez se estudiaron las características de los equipos que conformaran la red, se seleccionaron que tipo de dispositivos se adaptan a estas necesidades y operan bajo el estándar 802.11p y se realizó un estudio económico para tener un estimado de cuánto costaría la implementación de esta red. La búsqueda de dispositivos está basada en el anexo 3. La tabla 9 muestra esta estimación económica para el estándar 802.11p. Adicionalmente se realizó una comparación con otros tipos de soluciones que brinden estas mismas características de monitoreo. Esta evaluación comparativa se ve en el anexo 4.

TABLA 9. Cotización Económica dispositivos de red 802.11p

| Referencia | Equipo | Descripción | Cantidad | Precio Total |
|-------------------|--|-------------|------------|---------------|
| Sensor | Loco Mate™ OBU Es un dispositivo integrado con GPS que soporta 802.11p. Soporta 5.9 GHz con un espaciamiento de canal de 10 MHz | 48 | \$2.225 | US\$ 106.800 |
| Access Point | Loco Mate™ RSU Este dispositivo brida acceso inalámbrico en un rango de frecuencias de 5.70 to 5.925 GHz con un espaciamiento de canal de 10 y 20 MHz | 13 | \$3.000 | US\$39.000 |
| Brigde | Wireless Bridge Outdoor. Este dispositivo esta diseñado para ambientes vehiculares. Operan en un rango de frecuencias de 5.70 to 5.925 GHz con un espaciamiento de canal de 10 y 20 MHz. | 5 | \$3.000 | US\$15.000 |
| Transmisor Optico | LightPointe FlightStrata G –Operación Multimodo. Throughput: 155 Mbps hasta 1.25 Gbps. | 5 | \$16.900 | US\$84.500 |
| Servidor | Servidor de almacenamiento Dell Ref. Poweredge T620 | 2 | \$6.647,80 | US\$13.295,6 |
| Total | | | | US\$258.595,6 |

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para realizar la evaluación del diseño propuesto se evaluaron los tres escenarios mencionados anteriormente. Se realizaron medidas de carga de datos, throughput y retardo para realizar las evaluaciones. La tabla 10 define las características de los parámetros de tráfico configurados de cada uno de los escenarios y la tabla 11 los parámetros de configuración de los nodos sensores. El valor de tiempo activo del nodo sensor es un tiempo importante para las simulaciones ya que como el arribo de un evento está dado cada 3503.3 segundos, el tiempo de operación debe ser mayor y permitir la estabilidad del sensor. Este valor fue configurado en 1000000 segundos.

TABLA 10. Descripción De Simulaciones

| Parámetros | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 |
|------------------------------------|--|---|---------------------|
| Porcentaje de compresión | 80% | 50% | NA |
| Relación de compresión. | 16:1 | NA | NA |
| Dimensiones de la Imagen | 640x480 | 320x240 | 320x240 |
| Profundidad de píxel | 24 bits | 24 bits | 24 bits |
| Perfil Asociado | NA | NA | Vídeo |
| Formato Imagen | PNG | PNG | NA |
| Códec | No Aplica | MPEG-4 | MPEG-4 |
| Tamaño Imagen | 921600 Bytes | 69120000 Bytes | 46080 Bytes |
| Imagen Comprimida | 60000Bytes | 1382400 Bytes | 17280 Bytes |
| Formato compresión | JPG | No Aplica | NA |
| N° de Imágenes transmitidas | 1 Imagen | 300 Imágenes | 10 Imágenes/segundo |
| Distribución de Arribo de paquetes | Función Exponencial $\mu = 3503.03$ | Función Exponencial $\mu = 3503.03$ | NA |
| Distribución de Arribo de paquetes | Función de tipo constante con media aritmética de 60.000 bytes | Función de tipo constante con media aritmética de 1382400 bytes | NA |
| Carga de Datos | 137.01bps | 3156.79 bps | NA |

TABLA 11. Parámetros de configuración nodos de red

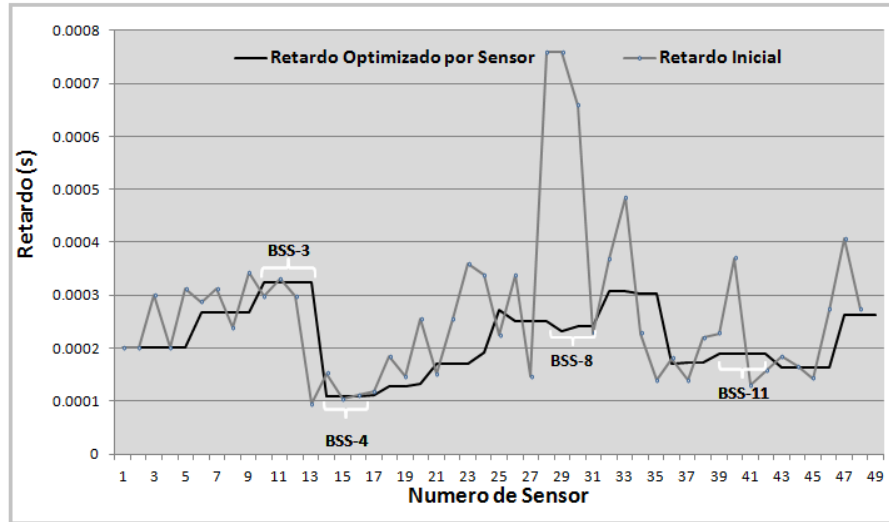
| Parámetros físicos Nodo | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 |
|-------------------------|--|-------------|-------------|
| Tipo de nodo | Station | Station | Workstation |
| Capas OSI | Física y Enlace de datos | | 7 Capas |
| Velocidad de Tx. | 54 Mbps | | |
| Identificador BSS | De acuerdo a la intersección correspondiente | | |
| Función AP | Desactivada | | |
| Modulación | OFDM | | |
| Altitud | Relativa al terreno | | |
| Potencia de Tx (W) | 0.020 | | |

Una vez realizadas las simulaciones de los escenarios se recopilan los resultados a nivel de WLAN por sensor respecto al retardo y la carga de datos enviados por sensor. Las simulaciones por escenario fueron realizadas 10 veces por escenario. Las simulaciones se pueden consultar en el anexo 7 mediante el simulador OPNET.

5.1 ANÁLISIS RETARDO

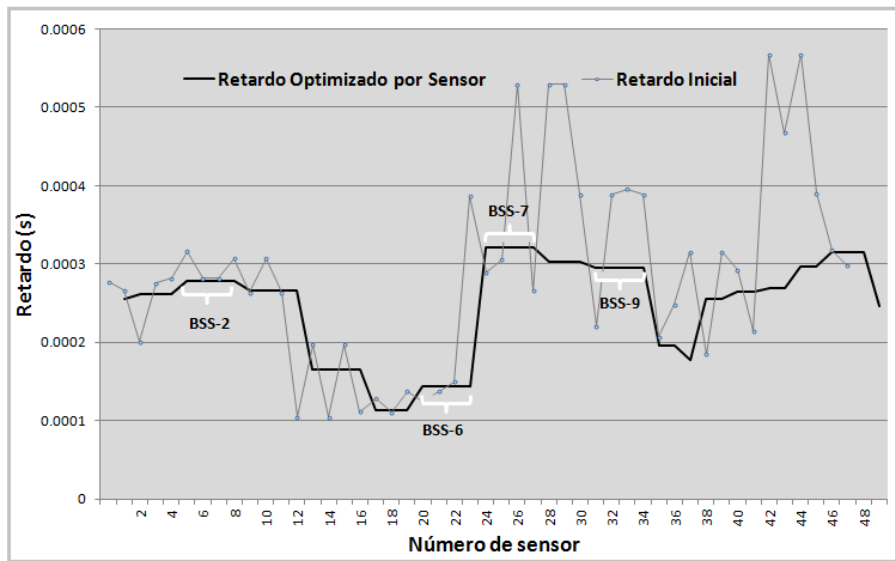
Los resultados de las medidas de esta variable para el escenario 1 se ven en la Figura 13. El retardo de los 48 sensores esta en un intervalo de 0.0001 y 0.0003 segundos. Este resultado es el producto de 480 mediciones de 10 simulaciones con un tiempo estimado por simulación de 5 horas. El retardo inicial hace referencia a los resultados sin optimizar este parámetro. El retardo promedio por sensor muestra el resultado posterior realizando una optimización de la ubicación geográfica de los sensores sobre la vía de monitoreo. Se puede resaltar que el retardo presenta ciertas variaciones por BSS, de igual manera el retardo por BSS o por grupo de sensores de una intersección no presenta cambios tan fuertes. A medida que se realizaron las pruebas se fueron modificando las posiciones de los sensores para obtener una mejor estabilidad del retardo de los sensores y no ver cambios tan relevantes. Estos cambios lograron disminuir la varianza del retardo de los 48 sensores y mejorar el rendimiento de la red.

Figura 13. Retardo WLAN Escenario 1. Transmisión de una imagen de 60000 bytes. Fuente: Elaboración propia



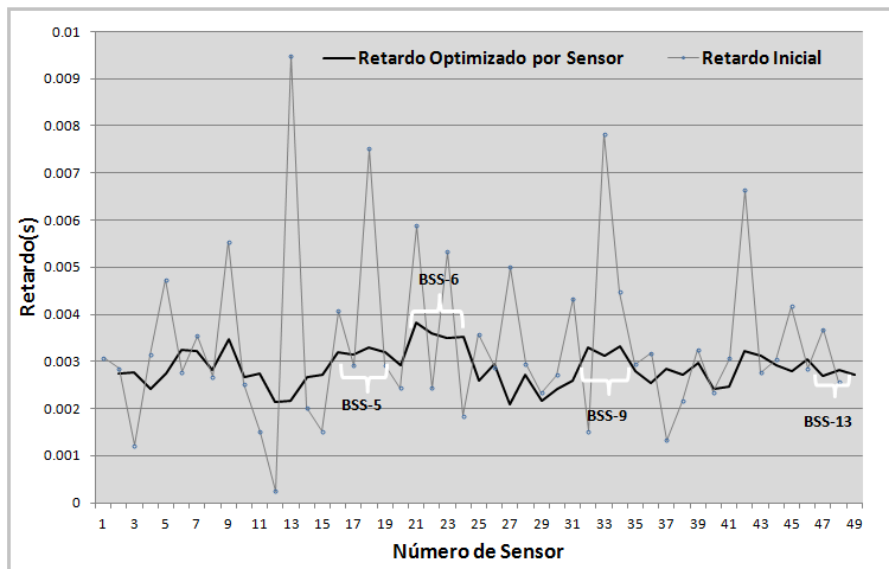
Para el Escenario 2 los resultados de retardo se ven en la Figura 14. Se presentan variaciones entre BSS pero sigue manteniéndose estable para el grupo de sensores que hacen parte de una BSS en particular y muestra que el retardo está entre 0.0001 y 0.0004 segundos. La variación de retardo entre los escenarios 1 y 2 no es muy grande y los cambios de retardo entre sensores no son considerablemente grandes.

Figura 14. Retardo WLAN Escenario 2. Transmisión de 300 imágenes. Fuente: Elaboración propia



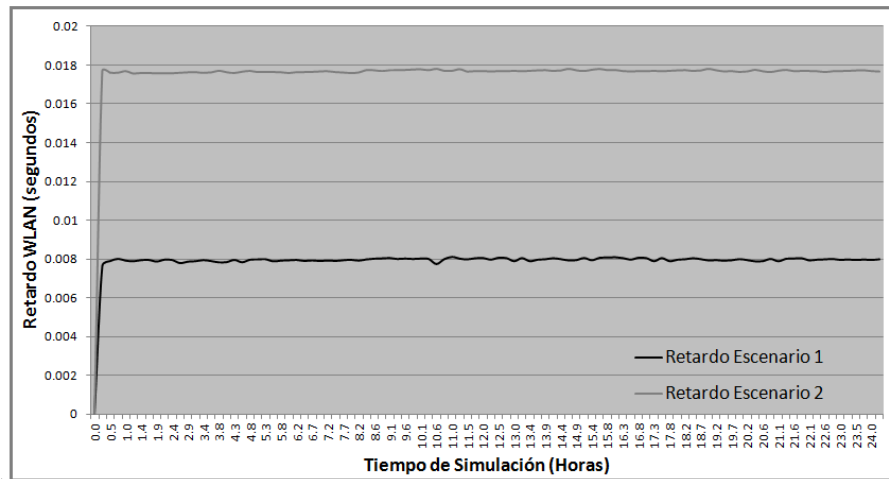
En el Escenario 3, los resultados de retardo se ven en la Figura 15. En este escenario son utilizados Nodos *Workstation* que permiten asociar a los sensores un perfil que previamente tiene definida una aplicación de video en tiempo real. El retardo se incremento y está en un rango de 0.002 y 0.0045 s. El retardo promedio de los sensores fue incrementado en una relación de 12 veces respecto a los escenarios 1 y 2 es decir que representa un incremento de 92.12%. La variación de retardo es mucho más notoria en este escenario tanto para los BSS como para los sensores que hacen parte de los BSS. El anexo 5 muestra los datos obtenidos de las simulaciones para cada uno de los sensores.

Figura 15. Retardo WLAN escenario 3. Fuente: Elaboración propia



Finalmente el retardo WLAN total de la red para los escenarios 1 y 2 se ven en la figura 16. Para el escenario 1 el retardo total es de 0.008 s y para el escenario 2 de 0.018 s. Para el escenario 2, el retardo se duplicó respecto al escenario 1, debido al incremento del tamaño del paquete. El retardo promedio para todos los sensores en los tres escenarios se resumen en la Tabla 12.

Figura 16. Retardo total de la red WLAN para los escenarios 1 y 2. Fuente: Elaboración propia.



5.1.1 Análisis retardo aplicación

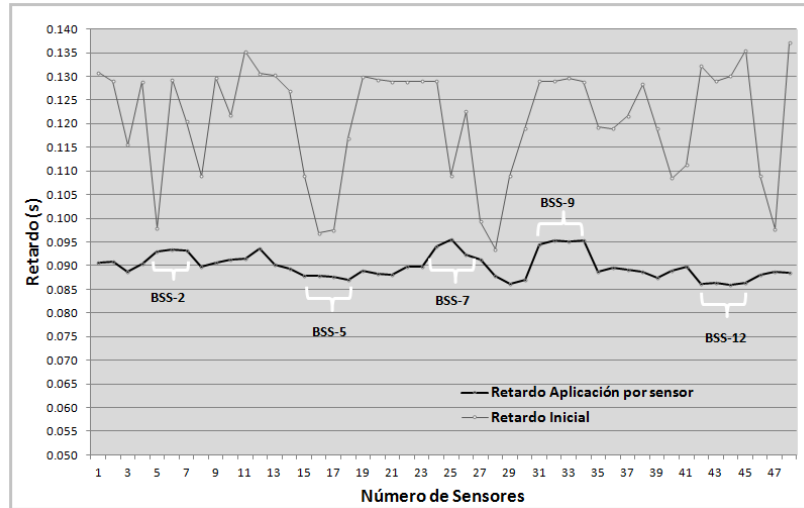
El tiempo de transmisión denominado también retardo es un parámetro de gran importancia para determinadas aplicaciones. Aplicaciones que involucren la transmisión de voz, vídeo, videotelefonía tienen alta sensibilidad a que los equipos terminales difieran considerablemente en el funcionamiento de la aplicación. Aplicaciones que involucran tareas de gran interacción pueden experimentar degradaciones incluso con retardos del orden de 200 *ms*[53].

Para el caso del escenario 3 se evaluó la transmisión de vídeo en tiempo real. La aplicación fue configurada en cada uno de los nodos sensores para evaluar el retardo. Para el caso de esta aplicación fueron definidos límites de operación para que esta aplicación sea considerada aceptable. En la recomendación ITU-T G.1010 y en la especificaciones 3GPP TS 22.105 y 3GPP TS 23.107 se definen estos límites para redes inalámbricas. Estas recomendaciones y especificaciones ofrecen descripciones de los servicios multimedia y respectivas clasificaciones de acuerdo a sus características funcionales. La aplicación de vídeo se clasifica en la clase de streaming ya que esta en un constante flujo de datos en una dirección y cuentan con pocos periodos de silencio[54].

Los límites están basados en la percepción del usuario de las degradaciones de un servicio de extremo a extremo y no dependen de ninguna tecnología específica para su validez. Esta característica significa que el modelo se puede aplicar independientemente de la tecnología de transporte ya sea IP, ATM, alámbrica e inalámbrica. Al definir unos límites de operación se puede determinar cuándo el usuario percibe las aplicaciones como aceptables. Para aplicaciones en tiempo real el retardo admitido está entre 20 y 300 *ms*. Una vez conocidos los límites para este tipo de aplicaciones se realizaron las pruebas a nivel de la aplicación de vídeo[55]. La figura 17 muestra que el retardo está en un rango de 85 y 95

ms. El retardo promedio de los 48 sensores esta en 89.9 ms.

Figura 17. Retardo a nivel de capa de aplicación en cada sensor de la red.Fuente: Elaboración propia.



5.2 ANÁLISIS CARGA DE DATOS

La carga de datos se determina mediante los parámetros de tráfico de datos. La carga de datos C_d está dada la ecuación (8) y mediante esta ecuación se determina la carga de datos esperada como se muestra a continuación:

$$\text{Escenario 1 } C_d = \frac{60.000(8bits)}{3503.3s} = 137 \text{ bps y } \text{Escenario 2 } C_d = \frac{1382400(8bits)}{3503.3s} = 3156 \text{ bps.}$$

En el escenario 1 la carga de datos de los 48 sensores está entre 136 y 146 bps como se ve en la Figura 18. Para el escenario 2 la carga de datos fue modificada y el valor de la distribución de tamaño de paquetes es de 1382400 bytes por paquete. Esto representa un incremento 95.65% sobre el tamaño del paquete respecto al escenario 1, también se puede decir que se presentó un incremento 23.04 veces respecto al valor previo. Estas modificaciones lograron que la carga datos de los sensores estuviera entre 3150 y 3350 bps para los 48 sensores como se ve en la Figura 19.

En el escenario 3 se maneja una carga de datos muy grande en comparación con las dos simulaciones anteriores. Para esta simulación no se trabaja con ráfagas de datos sino con una aplicación de video en tiempo real. La carga promedio de todos los sensores está entre 775000 y 825000 bps como se ve en la Figura 20.

Figura 18. Carga de Datos promedio por sensor Escenario 1. Transmisión imagen 60000 bytes con intervalo de arribo de paquetes de 3503.3 s. Fuente: Elaboración propia

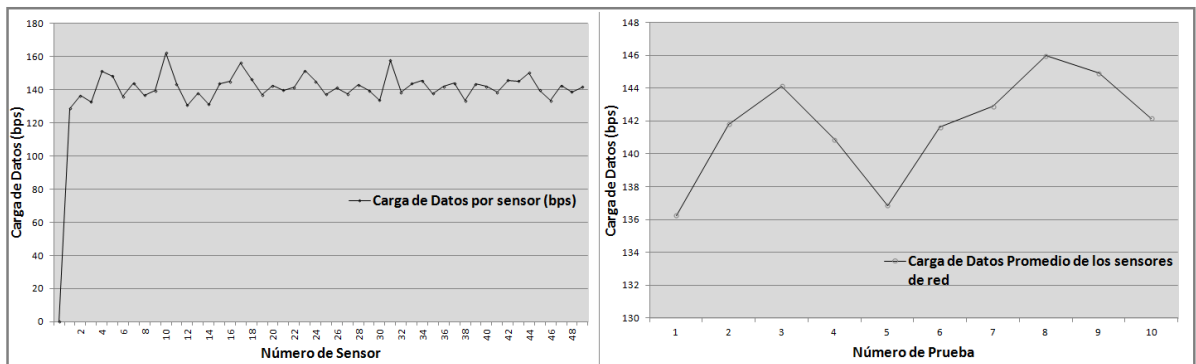


Figura 19. Carga de Datos Promedio por sensor Escenario 2. Transmisión de una Imagen de 1382400 bytes con un intervalo de arribo de paquetes de 3503.3 s. Fuente: Elaboración propia

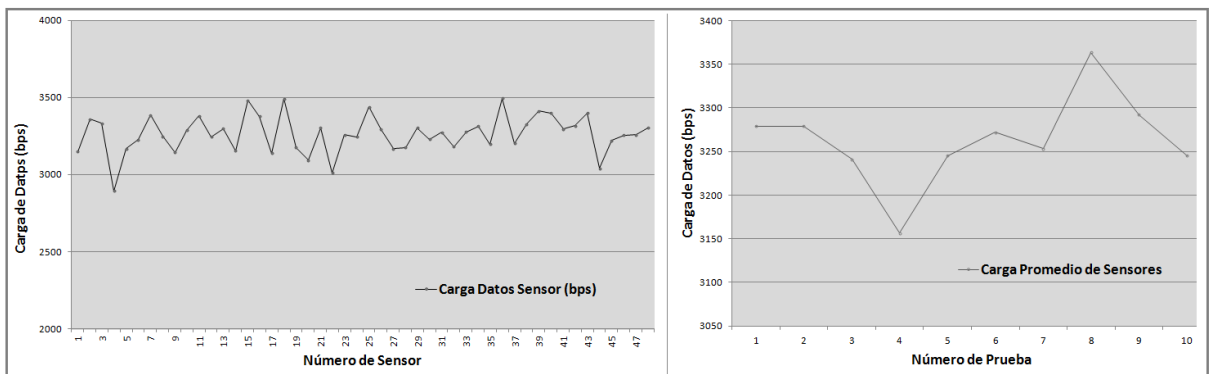
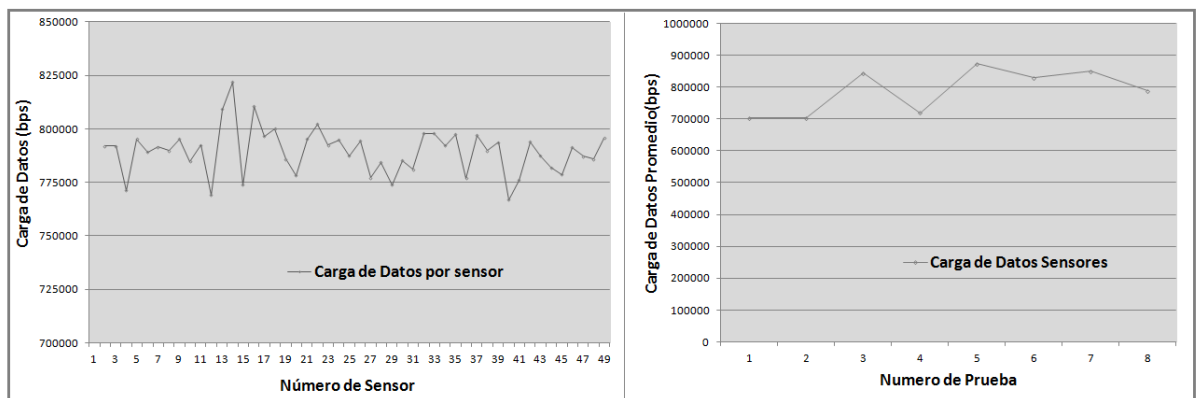


Figura 20. Carga de datos generada por sensor Escenario 3. 10 imágenes/s con un tamaño de imagen de 320X240. Fuente: Elaboración propia



En el escenario 1 la carga de datos esperada es de 137 bps y la carga promedio obtenida promedio fue de 142 bps. En el escenario 2 la carga de datos esperada es de 3156 bps y el valor promedio obtenido fue de 3262 bps. Esto arroja un error relativo de 3.521 % y de 3.249 % respectivamente. Finalmente la Tabla 12 muestra los resultados respecto a retardo promedio y carga de datos, se calcula la varianza y desviación estándar. El anexo 6 muestra los datos obtenidos de las simulaciones para cada uno de los sensores

TABLA 12. Resultados de simulaciones de escenarios propuestos

| | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Retardo Promedio sensores | 0.0002165 | 0.0002470 | 0.002961 |
| Varianza | 4.2615E-09 | 4.24E-09 | 2.910E-05 |
| Desviación Estandar | 6.5280E-05 | 6.5115E-05 | 0.0005394 |
| Carga de Datos (bps) | 142 | 3263 | 789471 |
| Varianza | 47 | 15040 | 116288322 |
| Desviacion Estandar | 6.8692 | 122.6390 | 10783.7063 |

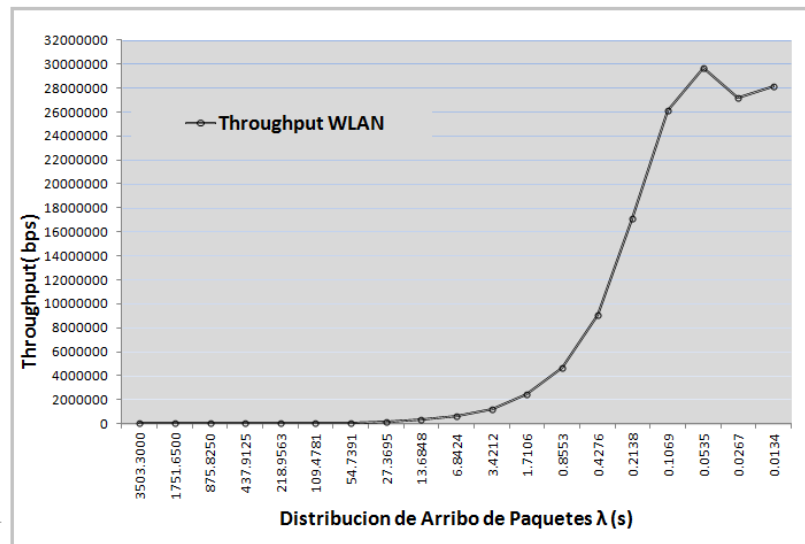
5.3 ANÁLISIS THROUGHPUT

El throughput es una medida relevante que permite definir el comportamiento de los sensores respecto al envío de datos. El análisis se realizó a partir de la modificación de la distribución μ_a del escenario 2 ya que este escenario evalúa a nivel de capa física y MAC y su carga de datos es mayor en comparación con el escenario 1. El parámetro μ_a fue modificado para los sensores de una BSS. La finalidad es determinar el máximo throughput que es posible alcanzar por BSS en la red para una correcta operación. La tabla 13 muestra los valores definidos en las simulaciones y los resultados y la Figura 21 muestra los resultados gráficos. Además se muestra que una vez es configurado μ_a con un valor de 0.1069 segundos o menos, el comportamiento del throughput no cambia considerablemente. Por esta razón se define que para tener un comportamiento adecuado en cuanto a throughput se refiere, un arribo de paquetes en este intervalo de tiempo o menor sería apropiado para el rendimiento de la red. Para valores altos de μ_a la carga de datos no se incrementa considerablemente. A partir μ_a en 1.7106 segundos se ven un crecimiento considerable en el rendimiento de la red.

TABLA 13. Resultados De Throughput WLAN

| Simulación | μ_a | Carga de datos bps | Throughput WLAN bps |
|------------|-----------|--------------------|---------------------|
| 1 | 3503.3000 | 3156.80 | 14391 |
| 2 | 1751.6500 | 6313.59 | 15920 |
| 3 | 875.8250 | 12627.18 | 18218 |
| 4 | 437.9125 | 25254.36 | 23236 |
| 5 | 218.9563 | 50508.72 | 32579 |
| 6 | 109.4781 | 101017.44 | 50558 |
| 7 | 54.7391 | 202034.88 | 88647 |
| 8 | 27.3695 | 404069.76 | 175421 |
| 9 | 13.6848 | 808139.53 | 312021 |
| 10 | 6.8424 | 1616279.05 | 619272 |
| 11 | 3.4212 | 3232558.10 | 1189926 |
| 12 | 1.7106 | 6465116.20 | 2420962 |
| 13 | 0.8553 | 12930232.41 | 4709050 |
| 14 | 0.4276 | 25860464.82 | 9026770 |
| 15 | 0.2138 | 51720929.64 | 17096516 |
| 16 | 0.1069 | 103441859.28 | 26161412 |
| 17 | 0.0535 | 206883718.55 | 29633717 |
| 18 | 0.0267 | 413767437.10 | 27152689 |
| 19 | 0.0134 | 827534874.20 | 28165120 |

Figura 21. Incremento de throughput en WLAN. Fuente: Elaboración propia



Una vez definida la máxima carga de datos por BSS, se definió que la carga de datos promedio por sensor es de 104.065.505 bps y que el tráfico promedio enviado es 9.174.282 bps. Al configurar un solo sensor con un $\mu_a = 0.1069$ en un BSS y los demás con un $\mu_a = 3503.3$ se evidencia que este sensor es el que más contribuye carga al BSS y contribuye al incremento del throughput total de la red. El BSS al que pertenece el sensor genera un throughput de 8.189.189 bps y el throughput global de la red es de 8.228.976 bps donde se ve verifica lo anteriormente dicho.

6 CONCLUSIONES

Este trabajo de investigación presentó una propuesta de red con las características físicas de operación del estándar 802.11p mediante el simulador OPNET Modeler. Una vez propuesto el diseño se realizó la evaluación del rendimiento de la red. Los análisis de los resultados obtenidos permitieron determinar que para los escenarios 1 y 2 el retardo por sensor no tiene variaciones significativas, pero el retardo total de la red si presenta un aumento debido al incremento de la carga de datos. Para el escenario 2 la carga de datos se incrementa en relación al escenario 1 y para estos dos escenarios se realiza el envío de datos por ráfagas en determinados intervalos de tiempo, y así mismo se incrementa el tiempo de simulación.

La variación de retardo para los tres escenarios no es considerablemente grande como se ve en la tabla 12, esto gracias a la reubicación de los sensores en la red por BSS por que el retardo disminuye y se logra mejoramiento del rendimiento de la red prediciendo así en cuanto puede cambiar el retardo por sensor para implementaciones reales. El aumento del tamaño de los paquetes en los escenarios 1 y 2 contribuyó a que se realizará más fragmentación del paquete, lo que genera encolamientos de los paquetes en el emisor. Esto también generaba que el tiempo de simulación aumentara considerablemente. Es importante destacar que el retardo de la red aumenta a medida que el número de nodos incrementa en la red y el retardo de los nodos aumenta entre mayor sea la distancia entre el nodo sensor y el AP.

El análisis de Throughput es uno de los parámetros más importantes del rendimiento de la red por que permite ver el comportamiento de la red a medida que incrementa la carga de datos por los nodos. Para el caso de usar parámetros de tráfico en la generación de datos es posible determinar hasta qué punto puede ser aceptable el envío de paquetes para tener un comportamiento adecuado en cuanto a throughput se refiere.

El throughput se incrementa en relación al aumento del tamaño de la carga de datos y a la frecuencia de envío de los datos por los nodos sensores. El máximo throughput alcanzado por BSS es de 28.16 Mbps con una velocidad de transmisión configurada en 54 Mbps. En el escenario 3 se presentan incrementos considerables en cuando a retardo en la aplicación, throughput y retardo WLAN debido a fue simulada una aplicación en tiempo real pero se mantiene dentro de los estándares regulatorios 3GPP. Se puede concluir que la posibilidad de implementar una red de nodos 802.11p sobre la carrera séptima entre la calle 39 y la calle 100 es posible de acuerdo a los resultados obtenidos.

La caracterización del tráfico permitió ajustar el evento de tráfico vehicular “*detección de infracciones de tránsito dentro de la vía*” de acuerdo a las características de la ciudad de Bogotá y mediante el proceso de poisson. Los parámetros que definen estas características tienen la posibilidad de ser modificados para el caso de trabajos futuros que impliquen nuevas evaluaciones de la red.

OPNET permite realizar simulaciones muy ajustadas a la realidad ya que permite simular un terreno con sus irregularidades, definir un modelo de propagación y configurar los nodos de la red de acuerdo a las características de aplicaciones determinadas. El simulador permite que los parámetros sean configurados y modificados a nivel de software para caracterizar bien la capa física y de enlace de datos de los nodos. Para esto se requiere el conocimiento de los módulos que brindan los servicios para realizar las configuraciones correctas de estas aplicaciones. OPNET también permite la integración de datos obtenidos de software adicionales. Para el caso de los modelos de datos de terreno permite la inclusión de directorios de archivos obtenidos por Sistemas de información geográfica determinados y de mapas de ubicación geográfica. Estas características de OPNET permiten hacer mucho más real un escenario de red para poder realizar una mejor evaluación y con mayor exactitud.

7 REFERENCIAS

Referencias

- [1] European Telecommunications Standards Institute. ETSI EN 302665 V.1.1. Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture communications Architecture.
- [2] Henao, A.; Benavides, F.; Quiroga, J. “Adquisición Automática de Variables de tráfico en una Intersección Vehicular”. XIV Simposio de tratamiento de señales, imágenes y visión artificial – STSIVA 2009.
- [3] IEEE 802.11, IEEE Standard for Information technology—Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications 2007.
- [4] Jiaqing, S; Ljiljana T. Enhancements and Performance Evaluation of Wireless Local Area Networks. Communication Networks Laboratory. Simon Fraser University Burnaby, BC, Canada.Y.
- [5] Opnet Modeler Technologies, Inc. Wireless LAN Model User Guide 2007.
- [6] Yong-Sik C, Young-Jun J, Sang-Hyun. A study on sensor nodes attestation protocol in a Wireless Sensor Network. ISBN 978-89-5519-146-2
- [7] Chinrungrueng, J; Sununtachaikul U, Triamlumlerd T. A Vehicular Monitoring System with PowerEfficient Wireless Sensor network. Intertional Conference on ITS Telecommunications Proceedings 2006.
- [8] T. Semertzidis K. Dimitropoulos A. Koutsia N. Grammalidis. Video sensor network for real-time traffic monitoring and surveillance.IET Intelligent Transport Systems 2009
- [9] Misra, S.; Woungang, I.; Misra CH. —Guide to Wireless Ad Hoc Networksll Capitulo 20 Vehicular Ad Hoc Networks, Año 2009. Editorial Springer ISBN 978-1-84800-327-9.
- [10] IEEE 802.11p. IEEE Standard—Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments
- [11] Wireless Networking in the Developing World. A practical guide to planning and building low-cost telecommunications infrastructure. Second Edition
- [12] Cisco on Cisco Best Practices. Wireless Network Design Considerations.2008
- [13] Secure Edge Networks Enterprise wireless network design guide 2012 .
- [14] Secure Edge Networks. Wireless Network Design and Outdoor Site Surveys 2012.

- [15] Mohammad, S. Soumen, K. Performance of Modeling wireless networks in realistic environment. International Journal of Computer Networks (IJCN), Volume (2): Issue (1)
- [16] Brian B. Luu, R. George T. A Technique for determining radio-signal propagation in an emulated wireless environment. Military Communications Conference. IEEE MILCOM 2008.
- [17] Terrain Model Module. OPNET Modeler, OPNET University Program [Online] Disponible: http://www.opnet.com/solutions/network_rd/modeler_wireless.html
- [18] National Center for Geographic Information and Analysis [En línea] Disponible en:<http://www.ncgia.ucsb.edu/>
- [19] A.M. Jiménez, “Sistemas y Análisis de la Información Geográfica (ArcGIS)”
- [20] Buckley D. Raster data formats. Fort Collins, Colorado [En línea] Disponible en:http://bgis.sanbi.org/gis-primer/page_17.htm
- [21] Introduction to GIS. Department of Geomatics, The University of Melbourne. 2000 <http://www.geogra.uah.es/gisweb/1modulosespanyol/IntroduccionSIG/GISModule/GISModule.htm>
- [22] Diseño y desarrollo de una aplicación en ArcGIS del modelo de propagación COST 231
- [23] Introducción a SIG [En línea] Disponible en:<http://www.geogra.uah.es/gisweb/>
- [24] US GeoData: Digital Elevation Models Fact Sheet, U.S. Geological Survey, ERDAS Field Guide, ERDAS Inc., 4th Edition.
- [25] NGA Raster Roam [En línea] Disponible en: http://geoengine.nga.mil/geospatial/SW_TOOLS/NIMAMUSE/webinter/rast_roam.html
- [26] Vreeken J. Wiering M., Veenen J. and Koopman A., Intelligent Traffic Light Control, Tech. report, institute of information and computing sciences, utrecht university, 2004.
- [27] Araujo, E. Araujo, A. Buitrago, P. Diseño de un sistema de monitoreo y control del tráfico. Centro de Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres CENDITEL. Grupo de Modelado y Simulación. 2010.
- [28] Poisson Process. Probability and random Processes for Electrical and Computer Engineers. Gubner, J. Cambridge university press.
- [29] CAL, Rafael; CÁRDENAS, James. Ingeniería de tránsito, fundamentos y aplicaciones. Universidad del Valle, Méjico, 2003. p 284.
- [30] Daniel, L. Use of Poisson distribution in Highway Traffic. Columbia University.

- [31] Opnet Application and Network performance. Documentation [En línea] Disponible en: <http://www.opnet.com/>
- [32] Shufen, L. Lu, H. Xinjia, Z. Study of Network Performance Measurement Based on SNMP. The 8th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design Proceedings.2003.
- [33] Y. T. Dong, Y. Zhang L. Network Performance Measurement And Analysis. Part 1: A server-Based Measurement Infrastructure.
- [34] Mohammad, N. Md. Ahsan Simulation-Based Comparative Study of EIGRP and OSPF for Real-Time Applications. September 2010
- [35] S. Bradner, J. McQuaid. RFC1242. Benchmarking Terminology for Network Interconnection Devices Harvard University July 1991
- [36] M, Fazeli; H, Vaziri. Assessment Of Throughput Performance Under OPNET Modeler Simulation Tools In Mobile Ad Hoc Networks (MANETs). 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks
- [37] C, Sarr; L, Isabelle. Estimating Average End-to-End Delays in IEEE 802.11 Multihop Wireless Networks.
- [38] G, Almes. S, Kalidindi. M, Zekauskas. RFC2679 A One-way Delay Metric for IPPM.1999
- [39] G, Wang; Y, Shu; L, Zhang. Delay Analysis of the IEEE 802.11 DCF. The 14" IEEE 2003 International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communication Proceedings
- [40] Union Internacional de Telecomunicaciones, sector de la Radiocomunicaciones- ITU-R. Recomendación UIT-R P. 527-3.Características eléctricas de la superficie de la tierra.
- [41] Union Internacional de Telecomunicaciones, sector de la Radiocomunicaciones- ITU-R. Recomendación UIT-R P.453-9. Índice de refracción radioeléctrica: su fórmula y datos sobre la refractividad (Cuestión UIT-R 201/3).
- [42] Union Internacional de Telecomunicaciones, sector de la Radiocomunicaciones- ITU-R. Recomendación UIT-R P.836-3 Vapor de agua: densidad en la superficie y contenido de una columna de aire.
- [43] Union Internacional de Telecomunicaciones, sector de la Radiocomunicaciones- ITU-R. Recomendación UIT-R P. 527-3.Características eléctricas de la superficie de la tierra.
- [44] Ivan Wang-Hei Ho., Kin K. Leung., John W. Polak. , Stochastic Model and Connectivity Dynamics for VANETs in Signalized Road Systems. IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, VOL. 19, NO. 1, FEBRUARY 2011

- [45] Massey W., Whitt W., A stochastic Model to capture space and time dynamics in wireless communication systems. Probability in the Engineering and informational sciences 1994.
- [46] Geografía Bogotana. Bogotá una ciudad andina. [En línea] Disponible en: <http://www.bogota.gov.co/portel/libreria/php/01.270701.html>
- [47] Secretaria de Movilidad de Bogotá. Movilidad lo hacemos todos. “2.963 comparendos impuestos con dispositivos móviles de detección electrónica”. [En línea] Disponible en: <http://www.movilidadbogota.gov.co/?pag=766>
- [48] Secretaria de Movilidad de Bogotá. Detección electrónica de infractores: una realidad en las calles de Bogotá. Disponible en: <http://www.movilidadbogota.gov.co/?pag=604>
- [49] Secretaria de movilidad de Bogotá. Evolución intersecciones semaforizadas en Bogotá. Reporte anual de movilidad 2009.
- [50] Información general de la malla vial de Bogotá. Inventario y diagnóstico de la malla vial de Bogotá. Enero 2010. [En línea] Disponible en: www.idu.gov.co
- [51] Doñate; R. Lloret; J. Jimenez; J. Estudio de Códecs de compresión MPEG-4 para su aplicación a la videovigilancia
- [52] Kane Computing Ltd. Compression Ratio Rules of Thumb. London 2010.
- [53] UIT-T. G.114. Serie G: Sistemas y Medios de transmisión, sistemas y redes digitales
- [54] Technical Specification Group Services and System Aspects; Services and service capabilities (Release 10)3GPP TS 22.105 V10.0.0 3rd Generation Partnership Project (3GPP TM) multimedia service
- [55] Technical Specification Group Services and System Aspects; Quality of Service (QoS) concept and architecture. 3GPP TS 23.107 3rd Generation Partnership Project (3GPP TM)

8 ANEXOS

- Anexo 1. Descripción OPNET Modeler, Configuración Módulo TMM y Módulo Wireless Suite.
- Anexo 2. Ubicación Sensores sobre el segmento Vial.
- Anexo 3. Especificaciones Equipos.
- Anexo 4. Comparaciones Económicas.
- Anexo 5. Medidas obtenidas de las simulaciones respecto al retardo(Incluidos CD).

Anexo 6. Medidas obtenidas de las simulaciones respecto a la Carga de Datos.(Incluidos CD)

Anexo 7. Simulaciones OPNET modeler.(Incluidos CD)