

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de Telecomunicación

Simulador de Redes WMN para el despliegue de unidades SAR en áreas de crisis.

Autor: Francisco Fornés Rumbao

Tutor: José Manuel Fornés Rumbao

Dep. Ingeniería Telemática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2014



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Telecomunicación

Simulador de Redes WMN para el despliegue de unidades SAR en áreas de crisis.

Autor:

Francisco Fornés Rumbao

Tutor:

José Manuel Fornés Rumbao

Profesor titular

Dep. de Ingeniería Telemática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2014

Trabajo Fin de Grado: Simulador de Redes WMN para el despliegue de unidades SAR en áreas de crisis.

Autor: Francisco Fornés Rumbao

Tutor: José Manuel Fornés Rumbao

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2014

El Secretario del Tribunal

A Darío...

Agradecimientos

Quiero agradecer a los profesores, a todos los encontrados a lo largo de este largo camino, por haberme enseñado todo lo necesario para estar hoy aquí.

Gracias a mi empresa, Integrasys, por haberme permitido elegir la vida que he querido, y darme la estabilidad necesaria para formar mi familia.

Gracias a todos mis compañeros de trabajo, que me ayudaron en la realización de este proyecto, y de los que he aprendido mucho: Jose C., Jose S., Pedro R. y Javier V.

Gracias, a todos los que, de una manera u otra habéis estado a mi lado en todo este tiempo en la ESI, en especial, a compañeros como Marina, Cristina, Grande, David, Ale, Isidoro, Fran, Eu, ... y un largo etcétera. Gracias de todo corazón.

Gracias a mi familia, y especialmente a mi madre y hermano por ayudarme en todo momento, por apoyarme y darme ánimos. Sin vosotros, esto no habría sido posible.

Gracias a mi mujer, por haber estado a mi lado, por haberme comprendido, escuchado y aguantado cuando lo he necesitado.

Y especialmente gracias a Darío, mi pequeño, por regalarme una sonrisa, un beso, un abrazo, una palabra, cada vez que lo necesitaba, y por hacerme entender que debía acabar antes de que él fuera consciente del tiempo que no hemos disfrutado juntos mientras estudiaba.

Os quiero a todos.

Francisco Fornés Rumbao
Sevilla, 2014

Resumen

En situaciones de catástrofes, una tarea primordial de los servicios de rescate es la búsqueda de supervivientes en la zona del incidente. Esta es una tarea compleja y peligrosa, en la que muy frecuentemente, suele llevar a la pérdida de vidas de los propios servicios de rescate. La introducción de dispositivos de búsqueda no tripulados puede ofrecer una herramienta muy valiosa para salvar vidas humanas y acelerar el proceso de rescate. De esta forma, el proyecto Icarus se centra en el desarrollo de tecnologías de búsqueda y rescate no tripulada para detectar, localizar y rescatar humanos. En este contexto, existe una gran cantidad de investigaciones realizadas hacia el desarrollo de herramientas de búsqueda y rescate no tripulada (SAR), sobre todo dentro del contexto de los proyectos Europeos, como los proyectos View-Finder, Guardians, SGL for unmanned SAR, etc. Este esfuerzo en investigación contrasta con la realidad a pie de campo, donde las herramientas de búsqueda y rescate no tripuladas tienen gran dificultad para calar entre los usuarios finales.

El objetivo del presente trabajo, dado el marco situacional descrito anteriormente, es el desarrollo de un software de simulación que permita a los equipos de planificación de búsqueda y rescate el despliegue de una red mesh inalámbrica sobre un escenario virtual basado en un globo digital en 3D. Esta simulación permitirá a los equipos de planificación, entre otras cosas:

- Generación de escenarios de crisis, con posibilidad de edición de elementos específicos presentes en situaciones de crisis
- Despliegue virtual de nodos mesh, con distintos roles, para simular la topología de red a desplegar en el área de búsqueda y rescate.
- Realización de estudios de balance de enlace para detectar posibles fallos de comunicación y validar los enlaces de comunicaciones inalámbricos.
- Generación de grafos dinámicos de topología de red, grafos de tráfico y grafos de contienda.
- Detección de contiendas en canales de comunicación que permitan a los equipos de planificación analizar las posibles contiendas en las transmisiones de flujos de tráfico por parte de los nodos y la capacidad disponible en los canales.

Esta herramienta se integrará dentro de las herramientas de simulación desarrolladas en el marco del proyecto Icarus, y serán validadas mediante la realización de pruebas más exhaustivas a finales del año 2015.

Abstract

In the event of such large crises, a primordial task of the fire and rescue services is the search for human survivors on the incident site. This is a complex and dangerous task, which, too often, leads to loss of lives among the human crisis managers themselves. The introduction of unmanned search and rescue devices can offer a valuable tool to save human lives and to speed up the search and rescue process. Therefore, ICARUS concentrates on the development of unmanned search and rescue technologies for detecting, locating and rescuing humans. In this context, there is a vast literature on research efforts towards the development of unmanned search and rescue (SAR) tools, notably in the context of EU-sponsored projects such as View-Finder, Guardians, SGL for unmanned SAR, etc. This research effort stands in contrast to the practical reality in the field, where unmanned search and rescue tools have great difficulty finding their way to the end-users.

The main objective of the presented work, and due to the situational framework previously described, is the development of simulation software that allows SAR planning teams a WMN deployment over a virtual scenario based on a digital 3D globe. This kind of simulation will allow planning teams, among other things:

- Generation of crisis scenarios, with the possibility of editing specific elements present in these areas.
- Virtual deployment of mesh nodes, with different roles, in order to simulate the network topology to be deployed in SAR area.
- Link budget calculation to detect potential communication failures and validate links between wireless mesh nodes.
- Dynamic graphs generation, including network topology, traffic flows and contention graphs.
- Contention detection in communication channels allowing planning teams to analyze the potential contentions in traffic flow transmissions generated by the mesh nodes and to calculate the throughput available for each channel.

This simulation tool will be integrated with the different simulation tools developed inside Icarus project, and shall be validated by conducting more extensive tests late 2015.

| | |
|---|------------|
| Agradecimientos | i |
| Resumen | iii |
| Abstract | iv |
| Índice | v |
| Índice de Tablas | vii |
| Índice de Figuras | ix |
| Acrónimos | xi |
| 1 Introducción y declaración de objetivos | 1 |
| 1.1. Contexto y motivación | 1 |
| 1.2. Objetivos | 3 |
| 2 Redes Mesh Inalámbricas | 5 |
| 2.1. Redes WMN | 5 |
| 2.1.1 Arquitectura de Red | 7 |
| 2.1.2 Retos de diseño | 8 |
| 2.1.3 Bancos de pruebas físicos e Implementaciones | 10 |
| 2.1.4 Actividades de estandarización | 11 |
| 2.2. IEEE 802.11s | 12 |
| 2.2.1 Arquitectura 802.11s | 14 |
| 2.2.2 Búsqueda del mayor camino | 18 |
| 2.2.3 Búsqueda de caminos en el simulador mesh | 24 |
| 2.3. Esquemas de modulación | 25 |
| 2.3.1 Tasas de datos | 26 |
| 3 Balance de enlace | 29 |
| 3.1. Introducción | 29 |
| 3.1.1 Técnicas existentes de modelado en exteriores | 30 |
| 3.1.2 Modelo usado en el Simulador | 31 |
| 4 Detección de contiendas | 33 |
| 4.1. Control de admisión | 33 |
| 4.2. Modelo de red y suposiciones | 35 |
| 4.2.1 Grafo de contiendas | 35 |
| 5 Simulador de Redes WMN | 39 |
| 5.1. Objetivos | 39 |
| 5.2. Storyboard para la generación del escenario | 41 |
| 5.2.1 Día 1 | 41 |
| 5.2.2 Día 2, AM | 44 |
| 5.2.3 Día 2, PM | 50 |
| 5.3. Estructura del Simulador | 58 |
| 5.4. Estructura del código fuente | 59 |
| 5.5. Características del Simulador | 61 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.3.1 | Adición de nodos mesh al escenario | 61 |
| 5.3.2 | Adición de áreas de escombros al escenario | 65 |
| 5.3.3 | Adición de edificios al escenario | 67 |
| 5.3.4 | Propiedades de la Red Mesh | 68 |
| 5.6. | <i>Generación del escenario del Storyboard</i> | 71 |
| 5.7. | <i>Cálculo del balance de enlace desde el Simulador</i> | 73 |
| 5.8. | <i>Cálculo de contendas desde el Simulador</i> | 78 |
| 6 | Detalles de Implementación | 85 |
| 6.1. | <i>Globo digital 3D</i> | 85 |
| 6.2. | <i>Bases de datos externas</i> | 86 |
| 6.3. | <i>Detección de intersecciones con el terreno</i> | 86 |
| 6.4. | <i>GraphStream</i> | 88 |
| 6.5. | <i>JGraphT</i> | 89 |
| 7 | Anexo 2: Resultados Balance de Enlace | 91 |
| 7.1. | <i>Log completo de resultados de balance de enlace</i> | 91 |
| | Referencias | 155 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1: Esquemas de modulación MIMO | 28 |
| Tabla 2: Storyboard, Día 1 | 44 |
| Tabla 3: Storyboard, Día 2, AM | 50 |
| Tabla 4: Storyboard, Día 2, PM | 58 |
| Tabla 5: Relación tipo de nodo – interfaz en el simulador | 65 |
| Tabla 6: Resultados del balance de enlace para el ENDUR UAS actuando de transmisor | 78 |
| Tabla 7: Log completo de resultados de balance de enlace | 153 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Ilustración 1: Ilustración de una arquitectura WMN | 7 |
| Ilustración 2: Tipología básica mesh | 13 |
| Ilustración 3: Componentes de la arquitectura mesh | 18 |
| Ilustración 4: Terminología usada en la búsqueda de caminos | 19 |
| Ilustración 5: Uso de los mensajes PREQ y PREP para la búsqueda de caminos | 22 |
| Ilustración 6: Algoritmo de Dijkstra | 25 |
| Ilustración 7: Red WLAN multi-hop. Cada enlace se representa con un entero. | 34 |
| Ilustración 8: Ejemplo de topología WLAN con 6 enlaces | 36 |
| Ilustración 9: Grafo de contornos y cliques máximos para la topología de 6 enlaces. | 36 |
| Ilustración 10: Vista principal del Simulador de redes WMN | 39 |
| Ilustración 11: Escenario cargado en el Simulador de redes WMN | 40 |
| Ilustración 12: Mapa de Woodland | 42 |
| Ilustración 13: Localización del LEMA, Base de Operaciones y Área de Operación (ciudad de Focagne). | 44 |
| Ilustración 14: El ENDUR UAS escanea el área (aproximadamente 150x700m) y obtiene las siguientes conclusiones: la zona donde establecer una Base de Operaciones de avance (Forward BoO) y 2 áreas prioritarias de búsqueda: 2 bloques de apartamentos derruidos (S1) y un colegio (S2). | 45 |
| Ilustración 15: Sector S1: Capa amarilla: área de escaneo para la búsqueda de rutas. Capa morada: Área para la búsqueda de víctimas. | 48 |
| Ilustración 16: Sector S2: Capa amarilla: área de escaneo para la búsqueda de rutas. Capa morada: Área para la búsqueda de víctimas. | 49 |
| Ilustración 17: Diagrama de bloques del simulador | 59 |
| Ilustración 18: Diagrama de clases del simulador | 60 |
| Ilustración 19: Vista principal con escenario cargado del Simulador de redes WMN | 61 |
| Ilustración 20: Detalle de menú contextual para la adición de nodos | 62 |
| Ilustración 21: Cuadro de diálogo con las propiedades de un nodo mesh | 62 |
| Ilustración 22: Detalle de interfaces de un nodo mesh | 64 |
| Ilustración 23: Detalle de interfaces de un nodo mesh | 65 |
| Ilustración 24: Detalle de menú contextual para la adición de áreas de escombros | 66 |
| Ilustración 25: Propiedades de un área de escombros | 66 |
| Ilustración 26: Detalle de menú contextual para la adición de edificios | 67 |
| Ilustración 27: Propiedades de un edificio | 67 |
| Ilustración 28: Cuadro de diálogo de la red mesh | 69 |
| Ilustración 29: Sensitividad en recepción según el esquema de modulación | 70 |
| Ilustración 30: Escenario del Storyboard desplegado en el simulador | 71 |
| Ilustración 31: Detalle del sector S1 en el simulador | 72 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 32: Detalle del sector S2 en el simulador | 72 |
| Ilustración 33: Representación de todos los enlaces posibles entre los nodos | 73 |
| Ilustración 34: Detalle de menú contextual para el cálculo del balance de enlace (Link Budget) | 74 |
| Ilustración 35: Vista del simulador tras el cálculo del balance de enlace. | 74 |
| Ilustración 36: Detalle del sector S1 tras el cálculo del balance de enlace | 75 |
| Ilustración 37: Detalle de la barra de herramientas para mostrar la información obtenida en la realización del cálculo del balance de enlace | 75 |
| Ilustración 38: Ventana de información de resultados del balance de enlace | 76 |
| Ilustración 39: Detalle de la barra de herramientas para lanzar la herramienta de detección de contiendas | 78 |
| Ilustración 40: Ventana de grafos, detallando el grafo de conectividad | 79 |
| Ilustración 41: Ventana de grafos, detallando el grafo de tráfico, con tráfico generado “Todos con todos” | 80 |
| Ilustración 42: Ventana de grafos, detallando el grafo de contiendas, mostrando las contiendas y los cliques detectados en el canal 2 | 81 |
| Ilustración 43: Ventana de grafos, detallando el grafo de contiendas, mostrando las contiendas y los cliques detectados en el canal 3 | 81 |
| Ilustración 44: Ventana de grafos, detallando el grafo de contiendas, mostrando las contiendas y los cliques detectados en el canal 3, destacando uno de los cliques máximos para su identificación | 82 |
| Ilustración 45: Ventana de diálogo con información relativa a los identificadores de los enlaces | 83 |
| Ilustración 46: Ventana de grafos, detallando el grafo de tráfico y contiendas, mostrando la generación de tráfico de 1000 Kbps y la contienda generada | 84 |
| Ilustración 47: Ventana principal del programa WorldWind, distribuido junto con el SDK WorldWind | 86 |
| Ilustración 48: Cálculo de la línea de visión desde la cima del Monte Jackson (3064m), Glacier National Parc, Montana, EEUU. | 87 |
| Ilustración 49: Algoritmo de RayCasting para la detección de intersecciones con el terreno | 88 |
| Ilustración 50: Logotipo de la librería GraphStream | 88 |
| Ilustración 51: Ejemplo de grafo generado con la librería GraphStream | 89 |

Acrónimos

| | |
|----------------|--|
| AC | Access Categories |
| AP | Access Point |
| API | Application Programming Interface |
| BE | Best Effort |
| BoO | Base Of Operation |
| BPSK | Binary Phase Shift Keying |
| BS | Base Station |
| C2 | Command And Control |
| C4I | Command, Control, Communications, Computers, and Intelligence |
| CDMA | Code Division Multiple Access |
| COM | Communication |
| CSMA/CA | Carrier Sense Multiple Acces/Collision Avoidance |
| CSMA/CD | Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection |
| EDCA | Enhanced distributed channel access |
| HWMP | Hybrid Wireless Mesh Protocol |
| ICARUS | Integrated Components for Assisted Rescue and Unmanned Search Operations |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IP | Internet Protocol |
| LAN | Local Area Network |
| LOS | Line Of Sight |
| LUGV | Large UGV |
| MAC | Media Access Protocol |
| MAP | Mesh Access Point |
| MBSS | Mesh Basic Service Set |
| MCCA | Mesh Coordinated Channel Access |
| MCF | Mesh Coordination Function |
| MCS | Modulation and Coding Scheme |
| MIMO | Multiple Input Multiple Output |
| MODCOD | Modulation and Coding |
| MR | Mesh Router |
| MSP | Mesh Station Portal |
| NLOS | Non Line Of Sight |
| OSOCC | On-Site Operations Coordination Center |
| PHY | PHYSical layer |

| | |
|-------------|---------------------------------|
| QAM | Quadrature Amplitude Modulation |
| QoS | Quality of Service |
| QPSK | Quadrature Phase Shift Keying |
| RC2 | Robot Command and Control |
| SAR | Search And Rescue |
| ST | Station |
| SUGV | Small UGV |
| TTL | Time To Live |
| UAS | Unmanned Aerial System |
| UAV | Unmanned Aerial Vehicle |
| UE | Unión Europea |
| UGV | Unmanned Ground Vehicle |
| USAR | Urban Search and Rescue |
| WiFi | Wireless Fidelity |
| WLAN | Wireless Local Area Network |
| WMN | Wireless Mesh Network |
| XML | Extensible Markup Language |

1 INTRODUCCIÓN Y DECLARACIÓN DE OBJETIVOS

“Si he conseguido ver más lejos, es porque me he aupado en hombros de gigantes.”

Isaac Newton

1.1. Contexto y motivación

En situaciones de catástrofes, una tarea primordial de los servicios de rescate es la búsqueda de supervivientes en la zona del incidente. Esta es una tarea compleja y peligrosa, en la que muy frecuentemente, suele llevar a la pérdida de vidas de los propios servicios de rescate. La introducción de dispositivos de búsqueda no tripulados puede ofrecer una herramienta muy valiosa para salvar vidas humanas y acelerar el proceso de rescate. De esta forma, el proyecto Icarus se centra en el desarrollo de tecnologías de búsqueda y rescate no tripulada para detectar, localizar y rescatar humanos. En este contexto, existe una gran cantidad de investigaciones realizadas hacia el desarrollo de herramientas de búsqueda y rescate no tripulada (SAR), sobre todo dentro del contexto de los proyectos Europeos, como los proyectos View-Finder, Guardians, SGL for unmanned SAR, etc. Este esfuerzo en investigación contrasta con la realidad a pie de campo, donde las herramientas de búsqueda y rescate no tripuladas tienen gran dificultad para calar entre los usuarios finales. Algunos de los cuellos de botella más notables a la hora de aplicar estas herramientas de búsqueda y rescate son:

- Tiempo de despliegue lento de las herramientas actuales para SAR no tripulada

- Autonomía limitada y autosostenibilidad de la generación actual de este tipo de herramientas, desde el punto de vista de la inteligencia de los robots y desde una perspectiva enfocada a la movilidad y la energía
- Colaboración limitada entre los dispositivos SAR
- Integración insuficiente de la generación actual de herramientas SAR en el equipamiento C4I usado por bomberos y servicios de rescate
- Soporte y entrenamiento insuficiente para que los usuarios finales puedan usar las herramientas SAR
- Problemas de interoperabilidad del equipamiento cuando se hace necesaria una colaboración entre equipos multi-nacionales en una situación de crisis

El proyecto Icarus aborda estas cuestiones, tratando de hacer de puente entre la comunidad investigadora y los usuarios finales, desarrollando un conjunto de herramientas de componentes integrados para la búsqueda y rescate no tripulada. El objetivo de este proyecto es desarrollar robots que tendrán como tarea principal recolectar datos. Los dispositivos SAR no tripulados se diseñarán de forma que sean los primeros exploradores del área devastada, así como servir de soporte in-situ que actuarán como protección para el personal humano.

Para no incrementar la carga cognitiva del personal encargado de gestionar la crisis, los dispositivos SAR no tripulados se diseñarán para navegar individualmente o cooperativamente y a seguir unas instrucciones de alto nivel desde la estación base.

Los robots se conectan de manera inalámbrica a la estación base y entre ellos, usando una red inalámbrica cognitiva auto-organizada de nodos de comunicación móviles que se adaptan al terreno.

Los dispositivos SAR no tripulados se equiparán con sensores que detectan la presencia de humanos, junto con una gran variedad de otros sensores. En la estación base, los datos se procesan y combinan con información geográfica, mejorando de esta forma la conciencia situacional del personal que lidera la operación, con datos procesados in-situ que pueden ayudar a la toma de decisiones.

La experiencia de la última catástrofe de Haití ha demostrado la importancia adquirida por el componente geográfico en la gestión de recursos humanos y técnicos en situaciones de crisis. De manera similar, ha resaltado que una distribución adecuada (a través de estándares interoperables) y una generación de mapas temáticos en tiempo real (edificios demolidos, puentes destruidos, etc.) permiten la optimización e interoperabilidad de estos recursos y acelera el acceso a las víctimas. Toda esta información se integrará con sistemas C4I existentes, usados por las fuerzas involucradas en las operaciones (por ejemplo, bomberos, rescatadores, policía, etc.).

Para el desarrollo del simulador propuesto en el presente Trabajo Fin de Grado, entre los muchos objetivos del proyecto Icarus, el que nos ocupa es el desarrollo de una red mesh inalámbrica (WMN) cognitiva y auto-

organizada que asegure la interoperabilidad de la red.

Los sistemas de comunicaciones en escenarios SAR es un tópico que está ganando mucha atención desde que las capacidades de las comunicaciones son claves para asegurar el despliegue eficiente y coordinado de los equipos de rescate.

Quizás, la cuestión mas importante a la que enfrentarse en este caso es cómo alcanzar la interoperabilidad entre un número de sistemas diferentes que vienen de diferentes fabricantes que deben trabajar juntos en la misma región sin un conocimiento previo del uso de frecuencias, información de planificación, etc. Hay una multitud de ejemplos donde las fuerzas publicas no han podido establecer y ejecutar sus sistemas de una manera interoperable después de un corte eléctrico, incluso para el tráfico de comunicaciones más básico posible, como la transmisión de voz, como ocurrió durante las horas después del ataque terrorista del 11S en Nueva York (los sistemas PMR del Departamento de Policía no se comunicaron bien con los sistemas de los departamentos de bomberos).

1.2. Objetivos

El objetivo del presente trabajo, dado el marco situacional descrito anteriormente, es el desarrollo de un software de simulación que permita a los equipos de planificación de búsqueda y rescate el despliegue de una red mesh inalámbrica sobre un escenario virtual basado en un globo digital en 3D. Esta simulación permitirá a los equipos de planificación, entre otras cosas:

- Generación de escenarios de crisis, con posibilidad de edición de elementos específicos presentes en situaciones de crisis (áreas de escombros y edificios derruídos), que pueden afectar a la calidad de las comunicaciones.
- Despliegue virtual de nodos mesh, con distintos roles, para simular la topología de red a desplegar en el área de búsqueda y rescate.
- Realización de estudios de balance de enlace para detectar posibles fallos de comunicación y validar los enlaces de comunicaciones inalámbricos.
- Generación de grafos dinámicos, incluyendo grafos de topología de red, grafos de tráfico y grafos de contienda.
- Detección de contiendas en canales de comunicación que permitan a los equipos de planificación analizar las posibles contiendas en las transmisiones de flujos de tráfico por parte de los nodos y la capacidad disponible en los canales.

Esta herramienta se integrará dentro de las herramientas de simulación desarrolladas en el marco del proyecto Icarus, y serán validadas mediante la realización de pruebas más exhaustivas a finales del año 2015.

2 REDES MESH INALÁMBRICAS

“Una ciudadanía que no entienda como opera la ciencia corre el peligro de caer en las redes de la ignorancia.”

Isaac Asimov

2.1. Redes WMN

WMN (Wireless Mesh Network, o Red Mesh Inalámbrica), es una tecnología inalámbrica muy prometedora para una multitud de aplicaciones emergentes y comercialmente interesantes, por ejemplo, redes domésticas de banda ancha, redes vecinales o comunitarias, gestión de red coordinada, sistemas de transporte inteligentes, etc. Está acaparando mucha atención como una posible vía para los proveedores de servicio de Internet (ISP) y otros usuarios finales para establecer el acceso de servicios de banda ancha inalámbrica robusta y fiable a un coste razonable. Las WMNs consisten básicamente en enrutadores mesh (Mesh Routers) y clientes mesh (Mesh Clients), tal y como se muestra en la figura X. En esta arquitectura, mientras los routers mesh forman el la parte principal de la red inalámbrica, los clientes mesh acceden a la red a través de los routers, así como directamente entre ellos a través de la malla.

De forma diferente a las redes inalámbricas tradicionales, la WMN de auto-organiza dinámicamente y se auto-configura. En otras palabras, los nodos en una red mesh automáticamente establecen y mantienen la conectividad de la red. Esta capacidad aporta muchas ventajas para los usuarios finales, como la baja inversión necesaria, un mantenimiento fácil, robustez, y una cobertura de servicio fiable. Además, con el uso de tecnologías avanzadas de radio, por ejemplo, múltiples interfaces de radio y antenas inteligentes, la capacidad de la red en las WMNs aumenta significativamente. Por otra parte, las funcionalidades de Gateway y Bridge en los routers mesh permiten la integración de redes mesh inalámbricas con varias redes inalámbricas existentes, como redes de sensores inalámbricas, WiFi y WiMAX. Consecuentemente, a través de una red mesh inalámbrica integrada, los usuarios finales pueden aprovecharse de la multitud de redes

disponibles. Algunos de los beneficios y características de las redes mesh inalámbricas son las siguientes:

- **Mayor fiabilidad:** En las WMNs, los routers mesh inalámbricos proporcionan caminos redundantes entre el emisor y el receptor de una conexión inalámbrica. Esto elimina los posibles fallos unitarios y los cuellos de botella, resultando en un incremento significativo de la fiabilidad de las comunicaciones. La robustez de la red frente a los problemas potenciales (fallos en los nodos, fallos en los enlaces debido a interferencias RF u obstáculos) se pueden también asegurar a través de la existencia de múltiples rutas alternativas posibles. Por lo tanto, al utilizar tecnologías WMN, la red puede operar de manera fiable a través de periodo de tiempo bastante extendido, incluso en presencia de fallos en la red o congestión de la misma.
- **Bajos costes de instalación:** Recientemente, el mayor trabajo para proporcionar conexión inalámbrica a los usuarios finales se realiza a través de puntos de acceso (AP) WiFi basados en el estándar 802.11. Para asegurar una cobertura casi completa, se requiere desplegar un gran número de puntos de acceso debido al rango de transmisión limitado de los APs. El inconveniente para esta solución son los elevados costes de infraestructura, dado que es necesario una conexión cableada de coste elevado para cada AP hacia el backbone de Internet. Por otro lado, construir una WMN disminuye los costes de infraestructura, dado que la red mesh requiere solo unos cuantos puntos de conexión a la red cableada. Por consiguiente, las WMNs pueden habilitar una implementación rápida y posibles modificaciones de la red a un coste razonable, lo que es una cuestión extremadamente importante en un mercado actual tan competitivo.
- **Gran área de cobertura:** Actualmente, las tasas de datos de las redes locales inalámbricas (WLANs) se han incrementado, por ejemplo, 54 Mbps para 802.11a y 802.11g, mediante la utilización de esquemas de modulación espectralmente eficientes. Aunque las tasas de datos de las WLANs se han incrementado, para una potencia de transmisión específica, la cobertura y conectividad de las WLANs han disminuido, ya que los usuarios finales cada vez se alejan más de los puntos de acceso. Por otro lado, las comunicaciones multicanal y multi-hop entre los routers mesh y los amplios rangos de transmisión de las torres WiMAX desplegadas en WMNs habilitan las comunicaciones a larga distancia sin una degradación significativa del rendimiento.
- **Conectividad de red automática:** Las WMNs se organizan y configuran automáticamente. En otras palabras, los clientes y routers mesh establecen y mantienen automáticamente la conectividad entre ellos, lo que posibilita los servicios de interconexión multi-hop perfectamente. Por ejemplo, cuando se añaden nuevos nodos a la red, estos nodos utilizan sus funcionalidades mesh para descubrir automáticamente los posibles routers y determinar los caminos óptimos hacia la red cableada. Además, los routers mesh existentes reorganizan la red considerando las nuevas rutas disponibles y, por tanto, la red se puede expandir fácilmente.

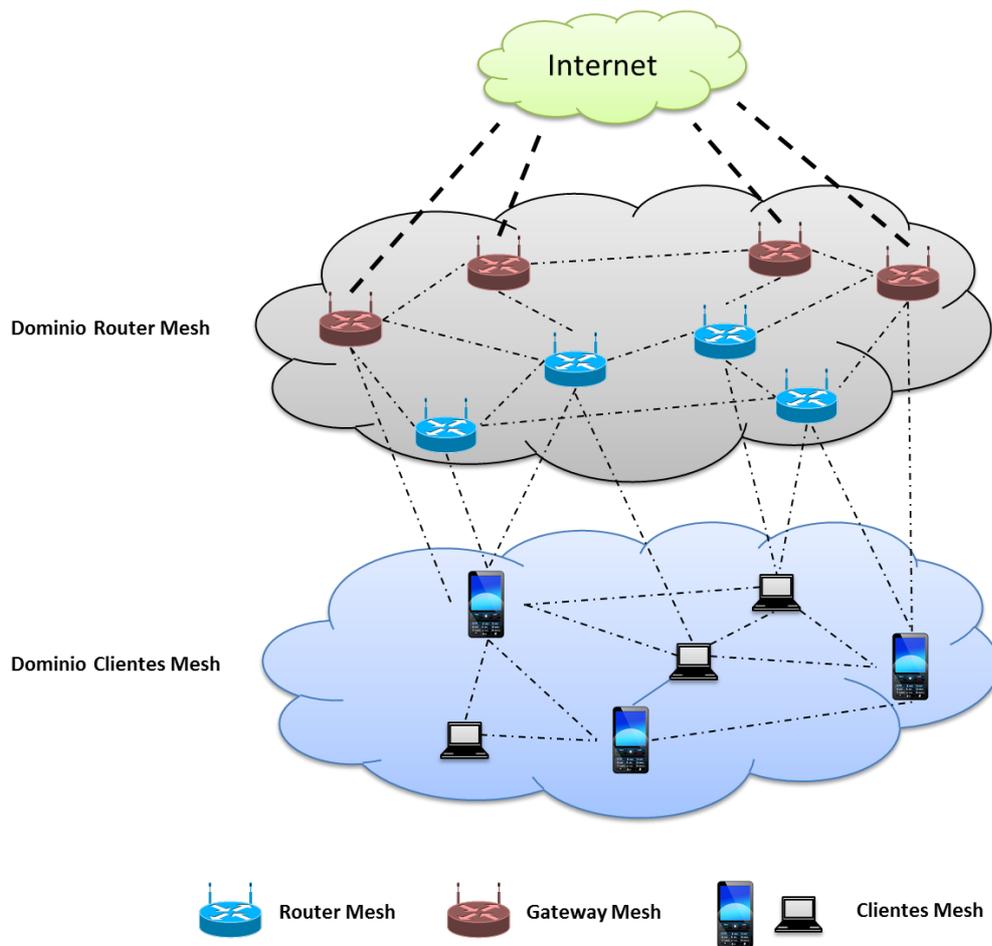


Ilustración 1: Ilustración de una arquitectura WMN

2.1.1 Arquitectura de Red

Una red mesh inalámbrica típica consiste en clientes y routers mesh, como se muestra en la figura anterior. En esta arquitectura, mientras que los routers estáticos forman el backbone de la red, los clientes mesh acceden a la red a través de los routers, así como entre ellos. A diferencia de una red ad-hoc tradicional, que es una red aislada autoconfigurada, la arquitectura de red mesh introduce una jerarquía con la implementación de routers mesh dedicados. En esta arquitectura de red integrada, algunos routers mesh también se suelen llamar Gateways, los cuales son routers especiales con una conexión a Internet de gran ancho de banda. Para ser más específico, los routers mesh contienen funcionalidades de enrutado avanzadas para soportar la red mesh. Esta característica es realista, dado que los routers mesh son nodos fijos, sin restricciones de alimentación (dado que se asume que están conectados a la red eléctrica), con múltiples interfaces inalámbricas con diferentes tecnologías de acceso.

A diferencia de los routers mesh, los clientes pueden ser nodos móviles, que normalmente usan baterías. Por

lo tanto, el consumo de los clientes mesh debe estar limitado. Esto se consigue reduciendo las funciones radio, por ejemplo, una única interfaz inalámbrica, ganancia de antena baja, y poca complejidad computacional. La tecnología elegida tanto para los routers como para los clientes mesh es la IEEE 802.11. La razón principal es la amplia disponibilidad de dispositivos 802.11, lo que permite un despliegue rápido de las WMNs usando soluciones comerciales. Sin embargo, si se quiere aprovechar esta oportunidad, las modificaciones necesarias por los routers y los clientes deben ser conscientes de las limitaciones existentes en el hardware.

2.1.1.1 Investigaciones abiertas

Aunque las redes mesh inalámbricas aportan numerosas ventajas en comparación con las redes tradicionales, existen muchas cuestiones que necesitan ser investigadas para la arquitectura de red:

- **Planificación de red:** En las WMNs, se necesita una planificación cuidadosa de los recursos hardware, sobre todo en términos de localización y número de interfaces y de las limitaciones de la tecnología. De hecho, existe una compensación entre el número de routers/interfaces, es decir, coste de la red, y el rendimiento general de la red, es decir, capacidad y fiabilidad de la red. También, la decisión de dónde colocar los routers también impacta directamente en la capacidad y topología de la red, y por tanto, debe ser investigado.
- **Abastecimiento de la red:** Se necesita desarrollar una herramienta de gestión de la red sofisticada para que tanto los routers como los clientes puedan establecer conexiones entre ellos y seguir de cerca cómo va cambiando el tráfico de la red y la movilidad de los usuarios.
- **Integración de la red:** Se necesita diseñar algún método de bajo coste para integrar tecnologías IEEE 802.11 y IEEE 802.15.4, así como IEEE 802.16 de forma que un router de una determinada tecnología puede tener interfaces adicionales de otra tecnología.

2.1.2 Retos de diseño

Las características únicas de las redes WMNs suponen muchas cuestiones aún abiertas para el diseño de la arquitectura de la red y los protocolos de comunicación, desde la capa de aplicación hasta la capa física. Aunque existen avances recientes en las tecnologías de redes mesh, aún quedan muchos sin resolver: se deben mejorar los protocolos en todas las capas de comunicación, se necesitan nuevos algoritmos para una autoconfiguración más eficiente, y se debe asegurar la seguridad de la red. Los factores críticos que influyen en el rendimiento de la red se pueden resumir en los siguientes:

- **Tecnologías avanzadas de radio inalámbricas:** Recientemente, se han propuesto muchas soluciones para mejorar la capacidad de las WMNs. Algunos ejemplos típicos incluyen radios reconfigurables, frecuencias rápidas / radio cognitiva, antenas direccionales e inteligentes, sistemas MIMO, y

sistemas multicanal y multi-radio. Sin embargo, la complejidad y el coste de estas tecnologías son todavía demasiado altas para que sean aceptadas ampliamente en el mercado. Por lo tanto, todas estas tecnologías de radio inalámbricas requieren un diseño revolucionario de los protocolos de comunicación para facilitar el despliegue de las WMNs y la comercialización de los productos

- Interoperabilidad e Integración de redes Heterogéneas: Las tecnologías de red existentes tienen capacidades limitadas para integrar distintas redes inalámbricas. Por esto, para mejorar el rendimiento de las WMNs y proporcionar la interoperabilidad entre los productos de diferentes fabricantes, las capacidades de integración de múltiples interfaces inalámbricas y sus correspondientes funciones de Gateway/bridge de los routers de la red deben ser mejorados.
- Seguridad de la red: Los ataques DoS y las intrusiones en las WMNs pueden causar daños muy graves durante el despliegue de la red. Aunque existen muchos esquemas de seguridad propuestos para redes de área local inalámbricas y redes ad-hoc, la mayoría de estas soluciones de seguridad no son prácticas o tienen un rendimiento muy bajo debido a la falta de una autoridad de confianza centralizada para distribuir una clave pública en la arquitectura WMN. Consecuentemente, existe una necesidad para los nuevos esquemas de seguridad, desde una encriptación eficiente y mecanismos de autenticación hasta distribuciones de claves seguras, e incluso mecanismos de detección de intrusos.
- Escalabilidad: La red mesh desplegada debe ser capaz de soportar grandes topologías de red sin incrementar el número de operaciones de red exponencialmente. Además, el rendimiento de la red no debería degradarse según aumente el número de saltos entre el transmisor y el receptor. Para proporcionar escalabilidad en las WMNs, se necesita una MAC escalable, unos protocolos de la capa de transporte y enrutado con el mínimo de overhead.
- Requisitos heterogéneos de calidad de servicio (QoS): Los servicios de la red proporcionados por las WMNs pueden variar entre una transferencia de ficheros fiable hasta aplicaciones multimedia en tiempo real, como streaming de video. Por esto, además de las medidas tradicionales del caudal y latencia de la red, se deben considerar unas métricas más exhaustivas, como el jitter, la equidad de los nodos agregados y los ratios de pérdidas de paquetes.
- Conectividad dinámica de la red y Autoconfiguración: En las WMNs, para eliminar los fallos únicos y los cuellos de botella potenciales, el backbone de la red necesita proporcionar caminos redundantes entre el transmisor y el receptor, es decir, para la conectividad mesh. Sin embargo, la topología y conectividad de la red puede variar frecuentemente debido a los fallos de enrutado y el agotamiento de la energía. De esta forma, para aprovecharse de las ventajas de la conectividad mesh autónoma, se necesita una autoconfiguración eficiente de la red, control de la topología y algoritmos de gestión de potencia.
- Soporte para movilidad: Para soportar los clientes mesh móviles en las WMNs, es necesario diseñar una capa física avanzada y técnicas de creación de redes que se adaptan a las condiciones de

desvanecimiento rápido asociado a los usuarios móviles. Además de estas técnicas avanzadas, se necesita también algoritmos de handover de baja latencia y gestión de la posición para mejorar la calidad de servicio en movilidad.

- Herramientas de gestión de red: Para monitorizar el rendimiento general de la red y mantener las operaciones de red, se necesitan capacidades de gestión de red flexibles y escalables. Las principales características de la gestión de las WMNs son:
 - Suministro de ancho de banda
 - Instalación de políticas de seguridad y QoS
 - Soporte de SLAs
 - Identificación y resolución de fallos
 - Añadir y borrar entidades de red
 - Cambio en las funciones de red
 - Contabilidad, facturación y reporte

Todas estas características pueden automatizar la gestión de fallos en las WMNs y por lo tanto habilitar el despliegue rápido de la red.

2.1.3 Bancos de pruebas físicos e Implementaciones

Recientemente, se han realizado numerosos experimentos en el campo de las redes mesh inalámbricas (WMN), proporcionando una buena base para la implementación y evaluación de nuevas técnicas y protocolos. The Roofnet [1] es una red mesh experimental 802.11b/g desarrollada en el MIT, que proporciona acceso a Internet de banda ancha a usuarios de Cambridge. Hay actualmente unos 40 nodos activos en la red. Este proyecto se centra en el efecto de los protocolos de enrutado, densidad de los nodos, y mecanismos de tasas de transmisión en el rendimiento general de la red.

El proyecto TAPs [2] diseña una arquitectura de red mesh inalámbrica basada en Puntos de Acceso de Tránsito (TAPs).

Los puntos de acceso (TAPs) forman la columna de la red mesh a través de enlaces inalámbricos MIMO. El objetivo de este proyecto es el soporte eficiente de sistemas con múltiples antenas y múltiples interfaces a través del diseño hardware de los routers desplegados.

En el proyecto Hyacinth [3], los investigadores desarrollaron una arquitectura de red mesh inalámbrica multicanal, que se puede construir con tecnologías IEEE 802.11 a/b/g o IEEE 802.16a. En el proyecto actualmente hay desplegados 10 nodos equipados con múltiples radios 802.11. Los principales problemas de diseño de este tipo de arquitectura de red son: asignación de interferencia de canal y enrutado de paquetes.

El Broadband and Wireless Networking Laboratory (BWN-Lab), ubicado en el Instituto Tecnológico de Georgia, construyeron banco de pruebas de WMNs, incluyendo 15 routers mesh y 80 nodos sensores repartidos a lo largo del suelo de un edificio. En este banco de pruebas se investigan los efectos de localización del router, movilidad, fallos en los enlaces y otras cuestiones en el rendimiento general de la red. El banco WMN desplegado se integró también con redes de sensores y actuadores y se desarrollaron protocolos de comunicación adaptables para redes inalámbricas heterogéneas.

La red mesh inalámbrica Quail Ridge [4] se encuentra en Lake Berryssa, California. En este entorno exterior, dado que las medidas no son afectadas significativamente por interferencias de radios externas y otros ruidos electrónicos, es fácil investigar las variaciones de la calidad del enlace. Este banco de pruebas se ha usado para monitorizar la vida salvaje y soportar aplicaciones de audio y video.

El proyecto TheWINGS [5] también permite nuevas arquitecturas de red inalámbricas, en las que todos los nodos de la red se pueden mover con un mínimo efecto en el rendimiento de la red. Este proyecto se enfoca en una arquitectura inalámbrica móvil de dos niveles.

Además de todos estos proyectos de investigación, algunas compañías importantes, como IBM, Intel, Nokia y Microsoft, llevan a cabo numerosas pruebas de campo en distintos bancos de pruebas físicos [6]. En concreto, Microsoft está investigando los protocolos de la capa MAC y de enrutado con interfaces multi-radio y multicanal en sus 20 bancos de pruebas disponibles.

Algunas otras empresas también son muy activas en el campo de las redes mesh, a través del despliegue de varias redes municipales en distintas ciudades. Algunos ejemplos típicos son Strix Systemas [7], BelAir [8], Tropos [9] y Firetide [10].

Aunque todas estas medidas y experimentos proporcionan una percepción valiosa de las ventajas de las redes mesh inalámbricas, los experimentos y pruebas de campo más recientes muestran que el rendimiento de una red WMN está aún por debajo de lo que se espera de ellas. Consecuentemente, existe una necesidad de crear bancos de pruebas físicos a gran escala y nuevos protocolos de comunicaciones para las WMNs.

Además, se necesitan estándares internacionales para crear aplicaciones comerciales y servicios de cliente sobre las arquitecturas WMN.

2.1.4 Actividades de estandarización

Los estándares internacionales son cruciales para la industria, ya que proporcionan la interoperabilidad necesaria entre los productos de distintos fabricantes y facilitan la comercialización de los equipos. Dependiendo del tipo de red y de los requisitos de aplicación, existen varios grupos de estandarización, como el IEEE 802.11, IEEE 802.15 y el IEEE 802.16, que trabajan activamente en nuevas especificaciones para las

WMNs. En la siguiente sección se hablará más concretamente del estándar 802.11s, una enmienda de la especificación de la rama 802.11 para especificar las redes WMN.

2.2. IEEE 802.11s

Las especificaciones iniciales para el estándar más popular para las WLANs se completó por parte del IEEE en 1999, y luego se fue extendiendo en 2003. Toda la familia de estándares IEEE 802.11 se especifican para comunicaciones de un solo salto (one-hop), haciéndolos inadecuados para operaciones multihop, multicanal y multi-radio. Por lo tanto, el IEEE creó un nuevo grupo de trabajo, el grupo 802.11s, para la instalación, configuración y operación de las redes mesh basadas en la familia 802.11.

En 2003, el grupo de trabajo de la 802.11 definió el concepto de Sistema de Distribución Inalámbrica (WDS – Wireless Distribution System), como un mecanismo para comunicaciones inalámbricas usando el formato de trama de 4 direcciones (802.11 def 3.170) entre los puntos de acceso. Pero el grupo de trabajo no pudo ir más allá de esta definición simple, e indicó que el estándar describía ese formato, pero no describía cómo se usaría.

El uso de redes inalámbricas realmente ofrecía una serie de ventajas:

- El primer beneficio obviamente era el aumento en la flexibilidad del enlace inalámbrico sobre uno cableado. Cuando todos los puntos de acceso se conectan a un switch, necesitas tantos puertos como puntos de acceso se tengan, y todos los puntos de acceso deben estar en un rango de 100 m del switch. Con los enlaces inalámbricos, se necesita un punto de acceso primario que se conecta al switch y éste a la red cableada, pero otros APs se pueden conectar también usando ese punto de acceso primario, incluso si están a kilómetros del switch e incluso si se encuentran sobre objetos móviles (trenes, grúas, etc.). El beneficio de la flexibilidad también radica en los caminos usados por el enlace inalámbrico. Con un cable Ethernet, solo hay un camino posible entre el AP y el switch, mientras que en un enlace inalámbrico cualquier AP puede estar dentro del rango de uno o más APs, pudiendo elegir el mejor camino. Los múltiples AP interiores a la red mesh forman lo que se llama el backhaul, dado que los datos de múltiples usuarios se distribuyen dentro de la red hacia los puntos de distribución principales de la red cableada.

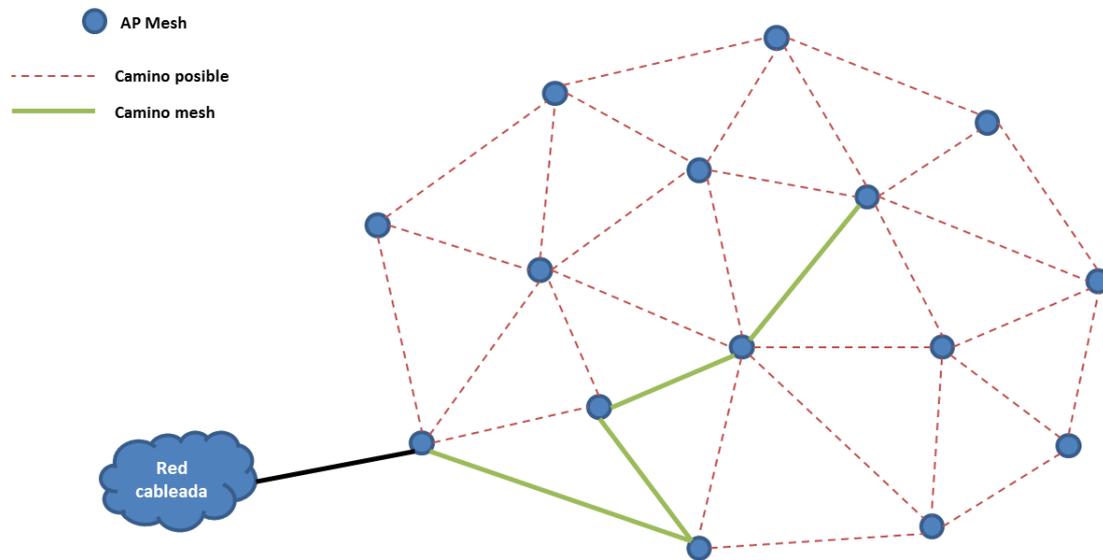


Ilustración 2: Tipología básica mesh

- El segundo beneficio es que una red así se forma automáticamente. Si se incluye un algoritmo dentro del AP para detectar el mejor camino hasta la red cableada, construir o expandir la red puede ser tan simple como añadir nuevos puntos de acceso y asegurarse de que están dentro del rango de otros puntos de acceso.
- El tercer beneficio es que una red así se repara sola. Si un punto de acceso tiene varios caminos posibles hasta la red cableada, y el AP es capaz de seleccionar automáticamente el mejor camino, eliminar un punto de acceso en la red simplemente forzaría a que otros puntos de acceso encontraran el nuevo mejor camino hacia la red cableada, sin la necesidad de tener que enviar a un ingeniero a que reemplace el punto de acceso.

Estos beneficios hicieron que muchos fabricantes empezaran a diseñar e implementar soluciones mesh desde 2003. Sin embargo, junto con estos beneficios se observan algunas cuestiones delicadas:

- ¿Cómo puede un AP descubrir otros puntos de acceso?
- ¿Cómo encuentra un AP el mejor camino a la red cableada?
- ¿Cómo deben los puntos de acceso formar la red? En otras palabras, ¿qué mecanismo debería usar un AP para prestar su enlace para que otro transmita datos a la red cableada?
- ¿Cómo prevenir que algunos puntos de acceso no deseados se unan a la red?
- ¿Cómo asegurar las comunicaciones entre los AP para prevenir interceptaciones no deseadas, robo de datos o el secuestro de la red?

Todas estas cuestiones no se respondían en el estándar 802.11, incluso en su versión del 2007. El concepto de red mesh no se encuentra por ningún lado en los estándares 802.11. Una red así no es un IBSS (Internet Base Station Service). Una IBSS implica estaciones que forman una red sin conectividad a un sistema de distribución. Tampoco es una red de infraestructura, dado que ningún punto de acceso es el punto central de las comunicaciones para las distintas estaciones. Esta falta de definición provocó conflictos entre los distintos fabricantes.

Cada fabricante que implementaba una solución propietaria encontraba distintas respuestas a algunas de esas cuestiones.

Cuando se implementa una red WMN hoy en día, se sabe que no habrá interoperabilidad entre los puntos de acceso de distintos fabricantes. El fabricante usará términos propios y específicos, formatos de trama, e intercambio de funciones, haciendo que la comparación entre fabricantes sea muy complicada. Tampoco se sabe si el fabricante ha encontrado respuestas a todas las cuestiones anteriores.

Existía una necesidad de encontrar un framework que proporcionara una terminología clara, lista de características y comportamientos que se pudieran integrar en el estándar 802.11. Este esfuerzo se inició en 2003 mediante la creación del ya mencionado grupo de estudio IEEE 802.11 para redes mesh, formado finalmente en Julio de 2004. Se tardó más de 7 años en encontrar una enmienda para el estándar. La enmienda fue aprobada finalmente en Julio de 2011 y publicada a finales de 2011 bajo el nombre de 802.11s.

Esta enmienda es clave para entender las redes WMN, ya que define los distintos protocolos y funcionalidades, mientras que deja un amplio espacio para implementaciones propietarias.

2.2.1 Arquitectura 802.11s

2.2.1.1 Definiciones

A continuación se detallan algunas definiciones necesarias para entender la arquitectura definida en la 802.11s:

- **Station:** Cualquier dispositivo que contiene una interfaz MAC (medium access control) y y capa física (PHY) compatible con IEEE 802.11 hacia el medio inalámbrico (WM).
- **AP:** Cualquier entidad que tiene la funcionalidad de una estación (STA) y proporciona acceso a los servicios de distribución, a través del medio inalámbrico para las STAs asociadas.
- **Mesh facility:** Conjunto de funciones mejoradas, reglas de acceso al canal, formatos de trama, métodos de autenticación, y objetos usados para proporcionar transferencia de datos entre las

estaciones autónomas (STAs) que pueden no estar en comunicación directa entre ellas a través de una única instancia del medio inalámbrico.

- **Mesh station:** Una STA con QoS que implementa una mesh facility.
- **Mesh gate:** Cualquier entidad que tiene funcionalidad de STA y proporciona acceso a uno o más sistemas de distribución, a través del medio inalámbrica para el conjunto de servicios mesh básicos (MBSS).
- **Mesh BSS (MBSS):** Un conjunto de servicios básicos (BSS) que forma una red de estaciones mesh STAs. Un MBSS contiene cero o más Mesh gates.
- **Portal:** El punto lógico en el que se proporciona el servicio de integración.
- **Mesh coordination function (MCF):** Una función de coordinación que combina aspectos de métodos de acceso programados y basados en contención. El MCF incluye la funcionalidad proporcionada tanto por el EDCA (enhanced distributed channel access) como por el MCCA (MCF controlled channel access).
- **Mesh coordination function (MCF) controlled channel access (MCCA):** Una función de coordinación para el MBSS.
- **Precursor:** Una estación mesh STA vecina en el camino mesh hacia la estación destino, que identifica la STA como el siguiente salto STA.
- **Source:** Una STA desde la que un MSDU (MAC service data unit) se introduce en el MBSS. Una STA de origen puede ser una STA mesh que es origen de un MSDU o un proxy gate que recibe un MSDU desde una STA fuera del MBSS y lo redirecciona a un camino mesh.

2.2.1.2 Descripción de la arquitectura

Dado que las redes mesh son diferentes a las tradicionales, la enmienda 802.11s cambia el nombre y la funcionalidad de algunos componentes de la infraestructura inalámbrica. Nada cambia en la estación cliente inalámbrica (como un portátil o un teléfono móvil). Un cliente inalámbrico puede asociarse a un punto de acceso BSS normalmente, sin necesidad de saber si el AP se conecta a una red cableada directamente o a través de una red mesh. En la siguiente figura, las estaciones clientes H, I, K, L, N, O, Q, y R no necesitan ninguna funcionalidad específica de la 802.11s para conectarse a sus respectivos puntos de acceso.

En la figura, los nodos A, B, C, D, E, F, G, J, y M son estaciones mesh. La mayoría son puntos de acceso, pero C y D son dos estaciones que no son AP que integran funcionalidades mesh (802.11s). Una MBSS es una LAN 802.11 formada por estaciones autónomas. Estas estaciones establecen enlaces inalámbricos punto a punto y se transfieren mensajes mutuamente. En este sentido, el MBSS está más cerca de un IBSS que de un BSS estándar. Una diferencia importante con un IBSS, no obstante, es que los mensajes se pueden transferir

entre estaciones que no están directamente comunicadas unas con otras a través de otras estaciones del MBSS, usando el backhaul de la red. Todas las estaciones aparecen como un grupo de dispositivos de capa 2. Las estaciones en un BSS mesh pueden ser fuentes, sumideros o propagadores del tráfico. En la siguiente ilustración, la estación B puede ser una estación mesh fuente (envía tráfico pero no retransmite tráfico de otra estación mesh), o un sumidero (recibe tráfico pero no envía ni redirecciona nada), dependiendo de la dirección del tráfico. A, C, D, E y G pueden ser simplemente propagadores, sin enviar o recibir tráfico por sí mismos.

La enmienda 802.11s establece que una estación mesh no es miembro de un IBSS o una infraestructura BSS, y en consecuencia, las estaciones mesh no se comunican con estaciones que no son mesh. Esto puede ser algo confuso: ¿cómo se conecta entonces una red cableada con otros dispositivos 802.11? La razón detrás de esto es que en la enmienda 802.11s, una “estación mesh” es una función. En un uso normal, una “estación” es típicamente un único dispositivo físico, pero en términos de 802.11, una “estación” es un subconjunto de funciones para un dispositivo. Un punto de acceso puede integrar las funciones de una estación mesh para comunicarse con otras estaciones mesh, pero también integran una función AP para las asociaciones con los dispositivos 802.11.

El MBSS se puede interconectar con infraestructuras BSS a través del sistema de distribución (DS). Luego, las estaciones mesh se pueden comunicar con estaciones normales a través del DS. Por lo tanto, se introduce un componente lógico de arquitectura para integrar el MBSS con el sistema de distribución, el mesh gate.

Los datos se mueven entre el MBSS y DS a través de uno o más mesh gates.

El término DS es fundamental para entender los roles de un Portal y un Gate. El DS es un componente lógico que gestiona el mapeo de direcciones hacia el destino. Osea, distribuye tramas desde una interfaz hacia otra. Esta distribución puede ser por ejemplo de una trama de un cliente en la banda de 2.4GHz hacia un cliente en la banda de los 5GHz, o de un cliente 2.4GHz hacia un MBSS en la banda de los 5GHz. En cualquier caso, es importante entender que el DS es un constructor lógico y no necesariamente un medio separado, como Ethernet.

El estándar 802.11-2007 define el AP como una estación que proporciona acceso a los servicios de distribución, a través de un medio inalámbrico (WM), para estaciones asociadas. En otras palabras, el AP es el punto central de tránsito para estaciones clientes conectadas a la célula del AP, y entrega tramas 802.11 enviadas por estas estaciones. En la siguiente ilustración, J, M, P y S son APs.

El AP puede entregar tramas a otras estaciones en la célula o a la red cableada. J, M y P también entregan el tráfico de sus estaciones asociadas al sistema de distribución, mientras que S solo entrega el tráfico inalámbrico a otras estaciones en la célula. La función de un AP que ejecuta esta traducción entre la red inalámbrica y la cableada (como el M y P) se llama Portal. El Portal es una función. Es solo el punto lógico

donde los MSDUs inalámbricos son traducidos desde y hasta redes no 802.11 (802.11-2007).

Un AP normalmente ejecuta las funciones de un Portal. M y P son APs y Portals. Cuando se produce una traducción entre un BSS mesh y un DS que no es mesh, esta función se llama Mesh gate. El mesh gate es el punto lógico donde los MSDUs se traducen desde y hasta un formato 802.11 que no es mesh. Normalmente, se necesitan otras funciones para completar la traducción. Por ejemplo, si una trama que viene de un MBSS se envía a una célula 802.11 (BSS), la función del AP se preocupa de reenviar la trama a las estaciones inalámbricas en la célula. Si una trama que viene de un MBSS se envía a una red que no es 802.11, la función Portal se preocupa de reenviar la trama a la red cableada. Un único dispositivo puede ser el punto central de una célula (AP), conectar sus clientes inalámbricos a la red cableada (Portal), mientras que participa en un BSS mesh y conecta otras estaciones mesh al DS (Mesh gate):

- J es un AP porque conecta sus estaciones inalámbricas asociadas, una estación mesh porque participa en el MBSS y un mesh gate porque traduce entre el MBSS y el DS.
- M es un AP porque conecta sus estaciones inalámbricas asociadas, un Portal porque conecta sus clientes inalámbricos a un DS que no es 802.11, una estación mesh porque participa en el MBSS, y también un mesh gate porque conecta el MBSS al DS.
- F es una estación mesh porque participa en el MBSS, y también un mesh gate y un portal porque conecta el MBSS a un DS que no es 802.11. F no es un AP dado que no tiene estaciones asociadas.

Un mesh gate es un elemento importante de una red mesh, y se identifica como tal con las otras estaciones mesh en el MBSS.

Desde la perspectiva de cualquier estación mesh en una red mesh, la siguiente estación mesh en un camino hasta la estación destino se llama “precursor” de la estación. E es un precursor de J o D, el siguiente salta en el camino a la estación F.

Para que las estaciones que participan en un MBSS sean capaces de detectarse mutuamente, deben estar en el mismo canal (esto será muy importante para el simulador que explicaremos más adelante). El acceso al canal es un componente clave de la infraestructura mesh, y por lo tanto se crea una nueva función de coordinación para las redes mesh. La MCF (mesh coordination function) es una función de coordinación que combina aspectos de los métodos de acceso programados y basados en contienda. El MCF integra elementos de EDCA 802.11e y HCCA para formar la función de coordinación mesh MCCA (mesh controlled channel access).

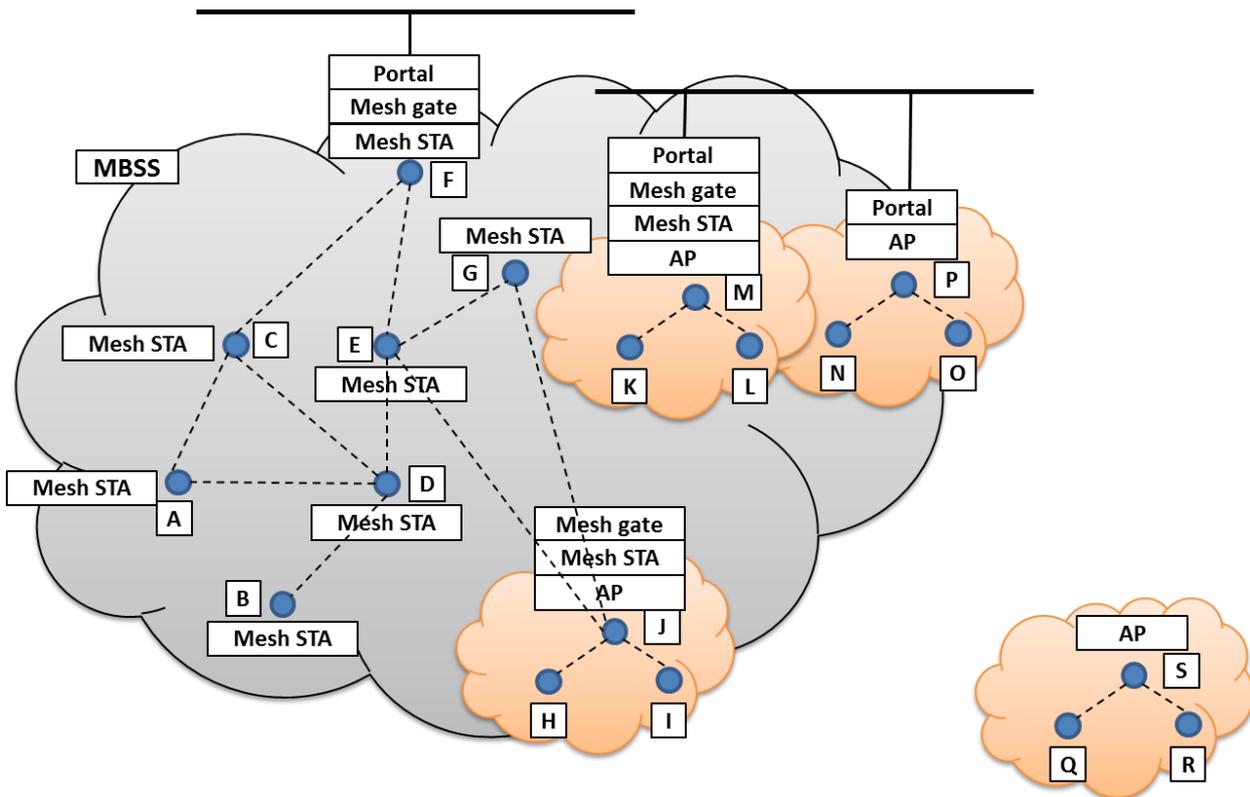


Ilustración 3: Componentes de la arquitectura mesh

2.2.2 Búsqueda del mayor camino

Buscar el camino para alcanzar un destino dado se llama Selección de Camino (o Path Selection) en la 802.11s. Este destino normalmente será una red cableada, pero puede ser también cualquier otra dirección MAC alcanzable a través del MBSS.

Se puede usar un método propietario para la búsqueda y selección de caminos (y así se hará en el simulador), pero las estaciones mesh que implementen la 802.11s deben también soportar el protocolo de selección de caminos por defecto, el Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP). HWMP proporciona tanto un método proactivo como reactivo para la selección del camino. Una estación mesh que necesita transmitir una trama hacia un destino desconocido puede descubrir dinámicamente el mejor camino hacia el destino. Las estaciones mesh pueden también descubrir el MBSS y determinar los mejores caminos hasta cualquier punto de la red mesh antes de enviar ninguna trama.

Se usa una terminología específica para describir el rol de cada estación mesh en el proceso de determinación del camino, lo que se ilustra en la siguiente figura. Supongamos que una estación mesh A necesita enviar una trama a una estación mesh D. D puede no ser la dirección MAC de destino final de la trama (DA), pero puede ser la última estación mesh en el MBSS para acceder al DA. D puede ser un mesh gate/portal y DA puede ser una red cableada. D puede ser un AP y DA puede ser una estación inalámbrica

adjunta a la célula de D. Como tal, a A se le llama el Path Originator. A no está directamente en el rango de D, y necesitará enviar una trama de descubrimiento de camino a su vecino B. Desde el punto de vista de A, B es el Next Hop (siguiente salto). Desde el punto de vista de B, A es el Precursor, ya que B recibe la trama de A. A será el Path Originator para todas las estaciones mesh en el camino hacia D. A D, la estación que necesitar ser descubierta, se le llama el Path Target.

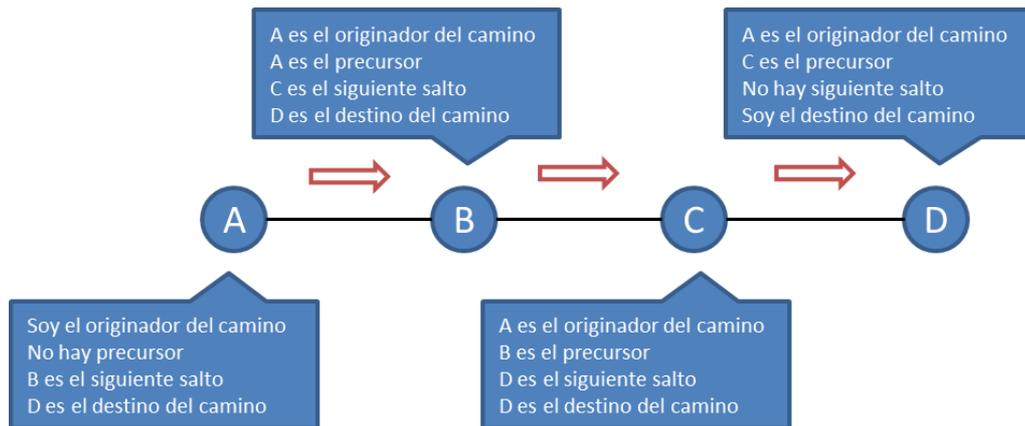


Ilustración 4: Terminología usada en la búsqueda de caminos

Las tramas específicas usadas para el descubrimiento del camino son las **HWMP Mesh Path Selection frames**. Éstas son tramas de acción, de categoría 13 (mesh), y cuyo subtipo es 1 (HWMP Mesh Path Selection). Esta trama contiene varios elementos de información (Information Elements). Todos estos elementos son opcionales, y su presencia depende del tipo de acción que deba ejecutar la trama:

- **Path Request element** (elemento opcional 3)
- **Path Reply element** (elemento opcional 4)
- **Path Error element** (elemento opcional 5)
- **Root Announcement element** (elemento opcional 6)

El descubrimiento de caminos se basa en Path Requests (PREQ) y Path Replies (PREP). Supongamos que una estación mesh A necesita descubrir el camino hasta una estación mesh D. La estación A envía tramos PREQ a todas las estaciones dentro de su rango. El elemento PREQ se inserta en una trama HWMP Mesh Path Selection, con solo el elemento 3 fijado. El elemento PREQ puede variar entre 37 y 352 bytes, y contiene varios subcampos de importancia:

- La dirección MAC del originador del PREQ (en este ejemplo, la estación A). Esta dirección MAC se transmitirá junto con la trama de acción, de forma que todas las estaciones en el camino sepan qué estación originó la petición.
- Un número de secuencia HWMP, que identifica de manera única la petición enviada por el origen, y se mantiene intacto según se vaya transmitiendo la trama. Cada estación puede comprobar este número y verificar que la petición fue recibida ya (evita bucles) o es una nueva.
- Un ID del descubrimiento de camino, que es un número fijado por el origen, y se mantiene intacto. Se usa para identificar de manera única el camino que el originador está intentando construir.
- Un TTL (Time To Live) y un LT (Life Time), que se usan para prevenir bucles no deseados. Se permite que el PREQ realice un número de saltos (TTL). Cada estación en el camino decrementa este valor en 1. El LT funciona de la misma manera, pero se expresa en TUs.
- El número de saltos desde el origen. Este campo se incrementa en cada estación en el camino, de forma que cada estación pueda determinar el número de saltos necesarios para llegar al origen. También se usa para prevenir bucles.
- Una métrica. Este componente muestra la métrica total hasta el origen, y se modifica en cada estación en el camino. Cada estación que recibe el PREQ determina su métrica hacia el origen tomando el valor de este campo y añadiendo su propia métrica a la estación emisora.
- Un contador de destino. El originador puede necesitar descubrir una estación con una dirección MAC específica, o puede descubrir de manera proactiva varios de sus vecinos. La estación puede usar el proceso PREQ para descubrir hasta 20 estaciones.
- Para cada estación destino, los subcampos del elemento PREQ indican la dirección destino, y un HWMP Sequence Number de destino específico. Este número es el último número HWMP conocido hasta el destino, y no se usa si no se ha usado un HWMP previo para descubrir a ese objetivo.

Una estación que recibe una trama HWMP Mesh Path Selection conteniendo un PREQ puede rechazarla en algunos casos (principalmente cuando la estación que recibe no tiene información acerca de la dirección MAC destino que se necesita descubrir). La estación que no tiene ningún camino hacia el destino responde con un mensaje Path Error (PERR), que identifica la dirección destino, el número de secuencia HWMP y una razón por la que la ha rechazado.

Cuando una estación tiene un camino hacia el destino, la estación acepta la trama y responde con una trama que contiene un elemento Path Reply (PREP). El elemento PREP se almacena en una trama HWMP Mesh Path Selection, con solo el elemento 4 fijado. El elemento PREP puede tener un tamaño que varía entre 31 y 37 bytes, y contiene varios subcampos importantes:

- La dirección MAC destino, y el número de secuencia HWMP asociado. Esto es útil, ya que el PREQ se puede usar para descubrir varias direcciones MAC. Estos dos subcampos identifican el objetivo y el mensaje usado para descubrirlo.
- El contador de saltos hasta el destino. Este elemento crítico permite al originador saber cómo de lejos está el objetivo.
- La métrica hasta el destino. Esta información se combina con el contador de saltos por el originador para determinar el mejor camino hasta el objetivo.
- Un TTL y un LT, similares a los del PREQ. Estos dos campos se fijan por parte de la estación que responde, y son cambiados por cada estación en el camino de vuelta hacia el origen.

Con este proceso, el originador obtiene la información que necesita para determinar el mejor camino hacia su destino. Usando el ejemplo de la siguiente figura podemos entender mejor el concepto. Supongamos una estación A que intenta descubrir el camino hasta la estación H. La estación A manda un mensaje PREQ, que se recibe en todas las estaciones en el rango de A (B, D y E). Todas las estaciones examinan el PREQ y deciden aceptarlo. Dado que A está intentando descubrir H (H es la dirección destino), B, D y E no pueden responder con un PREP. Solo el destino final puede hacerlo. Por lo tanto, B, D y E tienen que reenviar el PREQ, después de decrementar el TTL y el LT y cambiar el contador de saltos y la métrica.

B, D y E reenvían el mensaje dentro de su radio, así que C, F y G reciben el PREQ. En este ejemplo, A también recibirá el reenvío del PREQ por parte de B, D y E. Incluso D recibirá también el reenvío por parte de B y E. Tanto A como D descartarán este mensaje identificando los valores del número de secuencia HWMP, TTL y LT.

Siguiendo el mismo proceso, E enviará el mensaje, que será recibido y enviado por G, I, K, J y finalmente por H. En la cadena, F recibe el PREQ tres veces, una de D, otra de J y otra de C. Supongamos que F recibe el PREQ primero de C. F reenvía el PREQ. Cuando F reenvía el PREQ de D, la nueva trama contiene el mismo número de secuencia pero un contador de saltos mejor (F-D-A en vez de F-C-B-A). F aprende que hay un camino mejor a A y reenvía la segunda trama. Si el PREQ de D se recibe antes que el de C, F descartaría el segundo.

Al final, H recibe el PREQ. H es el destino y responde con un PREP. El PREP se envía de vuelta a través del mejor camino hacia A. Si H recibe el PREQ de J primero, H puede responder a J, pero eventualmente, como H recibe un mejor PREQ, la información del PREP será reenviada a través de F, D y A, y de esta forma A aprenderá el mejor camino hasta H.

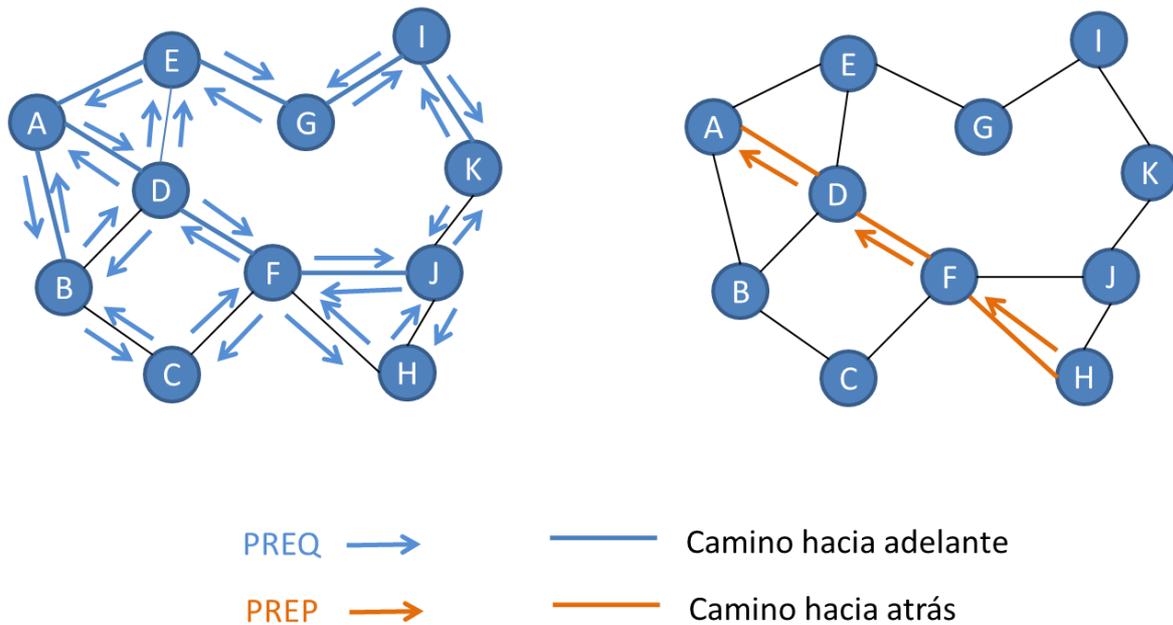


Ilustración 5: Uso de los mensajes PREQ y PREP para la búsqueda de caminos

Una estación en el camino (por ejemplo, D) puede recordar que está en el mejor camino entre A y H, y que el siguiente salto de H es F, y que el precursor es A.

La enmienda 802.11s se construyó para que el MBSS sobreviviera a la inestabilidad de los enlaces 802.11. Si se interrumpe un camino (una estación en el camino entre el origen y destino pierde el camino hacia el destino), se genera un PERR y se propaga hacia el origen, permitiendo iniciar una nueva búsqueda.

El descubrimiento se puede hacer dinámicamente. En la mayoría de los casos, el descubrimiento es proactivo. Cuando una estación mesh empieza, se empareja con sus vecinos e inmediatamente empieza a difundir mensajes PREQ usando la dirección de difusión como dirección MAC destino. Todas las estaciones responderán, permitiendo a la estación descubrir su MBSS. Este proceso puede ser intenso si todas las estaciones intentan descubrir todos los posibles caminos hacia las otras estaciones. Ésta es una de las ventajas de la 802.11s: no se necesita crear una jerarquía para el MBSS y cada estación mesh puede descubrir a las otras dinámicamente.

Muchas veces, este proceso es demasiado para algunas implementaciones, así que se puede organizar el MBSS designando algunas estaciones como Root Mesh APs. Estos son normalmente los gates/portals, pero se pueden usar otras estaciones. Esta configuración es común porque en la mayoría de los casos, las estaciones mesh intentarán encontrar una forma de reenviar tramas hacia la red cableada, o a una estación de importancia.

Una estación configurada como Root Mesh AP empieza enviando mensajes Root Announcement (RANN). El elemento RANN se transmite en una trama HWMP Mesh Path Selection, mide 21 bytes, y contiene varios subcampos importantes:

- La dirección MAC del Root Mesh AP
- Un bit que indica si el Root Mesh es un Gate
- Un número de secuencia HWMP
- Un intervalo, indicando (en TUs) con qué frecuencia se están enviando los RANN
- Un TTL, que se decrementará en cada estación, para prevenir bucles.
- Un contador de saltos y una métrica, modificada por las estaciones que reenvían el RANN para que cada estación sepa la distancia al Root Mesh.

El Root Mesh propaga periódicamente un elemento RANN en la red. La información que contiene el RANN se usa para diseminar las métricas del camino a otras estaciones para llegar al Root Mesh, pero la recepción del RANN en sí no establece un camino. Tras la recepción de un RANN, cada estación mesh que tiene que crear o refrescar un camino hacia el Root Mesh envía individualmente un PREQ al Root Mesh, a través de la estación desde la cual recibió el RANN. El Root Mesh envía un PREP en respuesta a cada PREQ.

Los PREQs individuales crean el camino inverso desde el Root Mesh hacia el origen, mientras que el PREP crea el camino desde el origen hasta el Root Mesh.

Hay que destacar que el mensaje RANN indica si el Root Mesh es un Gate. Un Gate que no es Root Mesh AP puede informar también al MBSS, usando una trama Gate Announcement. Este proceso es similar al RANN tanto en lógica como en comportamiento, anunciando al Gate en vez de al Root.

2.2.2.1 La métrica mesh

Hay 2 elementos claves en todos los mensajes citados anteriormente usados para la búsqueda de caminos: el contador de saltos y la métrica.

El contador de saltos simplemente cuenta el número de estaciones entre la estación origen y destino. Este elemento por sí solo no es suficiente para determinar el mejor camino. Al igual que para una red cableada, un camino de dos saltos puede ser mejor que el de un solo salto más lento. La métrica se usa para complementar al contador de saltos. Con la 802.11s, la métrica es una combinación de tasa de datos y tasa de errores. Supongamos 2 estaciones, A y B, que se comunican a 1 Mbps. Supongamos que la trama usada para muestrear la métrica es de 1024 bytes (8192 bits). La determinación de la métrica primero determinará el tiempo que se tarda en transmitir la trama: 144 μ s para enviar el preámbulo PLCP y 48 μ s para la cabecera PLCP. La carga útil es de 8192 bits, tardando 8192 μ s en transmitirse a 1 Mbps. El tiempo de transmisión de datos es por lo tanto de 8416 μ s.

Este valor se convierte posteriormente a unidades de 0.01 TU (10.24 μ s). Esto determina la métrica del

enlace, en este caso 822 ($8416 / 10.24 = 821.75$, redondeado a 822). Este cálculo implica que la calidad del enlace es perfecta, y que no hay pérdidas. En realidad, normalmente siempre hay pérdidas, y la tasa de errores se debe incorporar a la métrica. Si la tasa de errores hacia el vecino es del 0%, la métrica es 822. Si la tasa de errores es del 80%, la métrica será 4110 (es decir, $821.75/(1-0.8)$, redondeado).

Cuando se intenta determinar el camino hacia la estación H anterior, cada estación añade su propia métrica antes de reenviar el PREP. F añade su métrica F-H antes de reenviar el PREP a D. D añade la métrica D-F al reenviar el PREP a A. De esta forma, la métrica vista por A será el total de todas las métricas a H.

La métrica descrita es el mecanismo por defecto para la determinación del mejor camino en la 802.11s, llamada Airtime link metric. La presencia del contador de saltos permite a los fabricantes combinar tanto el contador de saltos como la métrica en sus propias soluciones para la búsqueda de caminos.

2.2.3 Búsqueda de caminos en el simulador mesh

En el simulador desarrollado presentado en este trabajo se ha utilizado otro algoritmo para buscar el camino óptimo. Podemos decir que es un procedimiento propietario, que como ya hemos mencionado, encaja también en el modelo 802.11s. En concreto, para la búsqueda de caminos se ha utilizado una librería Java llamada JGraphT, que se describirá más adelante. Esta librería utiliza el ya conocido algoritmo de Dijkstra para la búsqueda de caminos.

El algoritmo de Dijkstra es un algoritmo para la determinación del camino más corto dado un vértice origen al resto de vértices en un grafo con pesos en cada arista. Su nombre se refiere a Edsger Dijkstra, quien lo describió por primera vez en 1959.

La idea subyacente en este algoritmo consiste en ir explorando todos los caminos más cortos que parten del vértice origen y que llevan a todos los demás vértices; cuando se obtiene el camino más corto desde el vértice origen, al resto de vértices que componen el grafo, el algoritmo se detiene.

El algoritmo es una especialización de la búsqueda de costo uniforme, y como tal, no funciona en grafos con aristas de coste negativo (al elegir siempre el nodo con distancia menor, pueden quedar excluidos de la búsqueda nodos que en próximas iteraciones bajarían el costo general del camino al pasar por una arista con costo negativo).

Teniendo un grafo dirigido ponderado de N nodos no aislados, sea x el nodo inicial, un vector D de tamaño N guardará al final del algoritmo las distancias desde x al resto de los nodos.

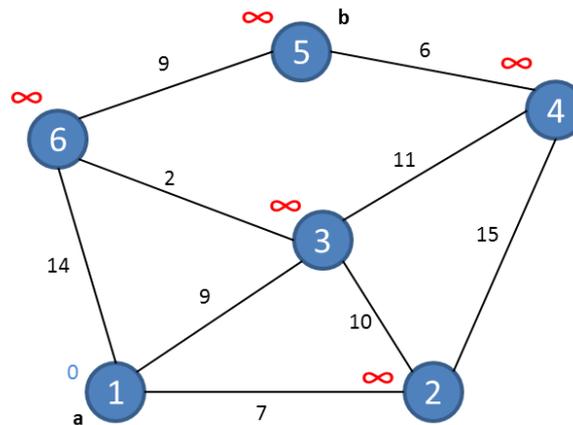


Ilustración 6: Algoritmo de Dijkstra

1. Se inicializan todas las distancias en D con un valor infinito relativo ya que son desconocidas al principio, exceptuando la de x que se debe colocar en 0 debido a que la distancia de x a x sería 0.
2. Sea $a = x$ (tomamos a como nodo actual).
3. Recorremos todos los nodos adyacentes de a, excepto los nodos marcados, llamaremos a estos nodos no marcados v_i .
4. Si la distancia desde x hasta v_i guardada en D es mayor que la distancia desde x hasta a, sumada a la distancia desde a hasta v_i ; esta se sustituye con la segunda nombrada, esto es, si $(D_i > D_a + d(a, v_i))$ entonces $D_i = D_a + d(a, v_i)$
5. Marcamos como completo el nodo a.
6. Tomamos como próximo nodo actual el de menor valor en D (puede hacerse almacenando los valores en una cola de prioridad) y volvemos al paso 3 mientras existan nodos no marcados.

Una vez terminado al algoritmo, D estará completamente lleno.

Aunque este método en general funciona bastante bien, una futura mejora para el simulador sería el cálculo de métricas y la asignación de pesos en los enlaces según estas métricas.

2.3. Esquemas de modulación

Para el desarrollo del simulador, se va a tener en cuenta el estándar 802.11n.

IEEE 802.11n es una propuesta de modificación al estándar IEEE 802.11-2007 para mejorar significativamente el rendimiento de la red más allá de los estándares anteriores, tales como 802.11b y 802.11g, con un incremento significativo en la velocidad máxima de transmisión de 54 Mbps a un máximo de 600 Mbps. Actualmente la capa física soporta una velocidad de 300Mbps, con el uso de dos flujos espaciales en un canal de 40 MHz. Dependiendo del entorno, esto puede traducirse en un rendimiento percibido por el usuario de

100Mbps.

El estándar 802.11n fue ratificado por la organización IEEE el 11 de septiembre de 2009.

El IEEE 802.11n está construido basándose en estándares previos de la familia 802.11, agregando Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) y unión de interfaces de red (Channel Bonding), además de agregar tramas a la capa MAC.

MIMO es una tecnología que usa múltiples antenas transmisoras y receptoras para mejorar el desempeño del sistema, permitiendo manejar más información (cuidando la coherencia) que al utilizar una sola antena. Dos beneficios importantes que proporciona la 802.11n son la diversidad de antenas y el multiplexado espacial.

La tecnología MIMO depende de señales multirruta. Las señales multirruta son señales reflejadas que llegan al receptor un tiempo después de que la señal de línea de visión (line of sight, LOS) ha sido recibida. En una red no basada en MIMO, como son las redes 802.11a/b/g, las señales multirruta son percibidas como interferencia que degradan la habilidad del receptor de recobrar el mensaje en la señal. MIMO utiliza la diversidad de las señales multirutas para incrementar la habilidad de un receptor de recobrar los mensajes de la señal.

Otra habilidad que provee MIMO es el Multiplexado de División Espacial (SDM). SDM multiplexa espacialmente múltiples flujos de datos independientes, transferidos simultáneamente con un canal espectral de ancho de banda. SDM puede incrementar significativamente el desempeño de la transmisión conforme el número de flujos espaciales es incrementado. Cada flujo espacial requiere una antena discreta tanto en el transmisor como el receptor. Además, la tecnología MIMO requiere una cadena de radio frecuencia separada y un convertidor de analógico a digital para cada antena MIMO lo cual incrementa el costo de implantación comparado con sistemas sin MIMO.

La segunda tecnología incorporada al estándar 802.11n es el Channel Bonding, también conocido como 40 MHz o unión de interfaces de red, la cual puede utilizar dos canales separados, que no se solapen, para transmitir datos simultáneamente. La unión de interfaces de red incrementa la cantidad de datos que pueden ser transmitidos. Se utilizan dos bandas adyacentes de 20 MHz cada una, por eso el nombre de 40 MHz. Esto permite doblar la velocidad de la capa física disponible en un solo canal de 20 MHz.

Utilizar conjuntamente una arquitectura MIMO con canales de mayor ancho de banda, ofrece la oportunidad de crear sistemas muy poderosos y rentables para incrementar la velocidad de transmisión de la capa física.

2.3.1 Tasas de datos

Si asumimos los mismos parámetros de operación de una red 802.11g que alcanza 54 Mbps (en un canal

único de 20 MHz con una antena), una red 802.11n puede alcanzar 72 Mbps (con los mismos parámetros y un intervalo de guarda de 400 ns). La velocidad puede crecer hasta los 150 Mbps si no hay emisiones interferentes en la cercanía usando dos canales de 20 MHz, en el modo 40 MHz. Si se usan más antenas, la 802.11n puede llegar a 288 Mbps en el modo 20 MHz con 4 antenas, o 600 Mbps en el modo 40 MHz, usando 4 antenas y un intervalo de guarda de 400 ns. Dado que la banda de 2.4 GHz está cada vez más congestionada en la mayoría de las áreas urbanas, las redes 802.11n normalmente consiguen aumentar la velocidad en el modo 20 MHz usando más antenas que en el modo 40 MHz, dado que el modo 40 MHz requiere un espectro relativamente más libre, lo que suele estar disponible solo en áreas rurales, alejadas de las ciudades. Por lo tanto, los instaladores de este tipo de redes deberían seleccionar routers y clientes inalámbricos con el mayor número de antenas posible, y asegurarse de que el ancho de banda de la red es satisfactorio incluso en el modo 20 MHz.

Una tasa de datos de hasta 600 Mbps se consigue solo con el máximo de cuatro flujos espaciales usando un canal de 40 MHz. Se han definido varios esquemas de modulación y tasas de codificación (modcods) en el estándar, y se representan por el valor del índice de la tabla MCS (Modulation and Coding Scheme), mostrada a continuación:

| MCS Index | Number of spatial streams | Modulation (Stream 1/ 2/ 3/ 4) | Coding rate | N _{BPSCS(SS)} | N _{ES} | | N _{SD} | | N _{CBPS} | | Data Rate (in Mbps) (GI = 800ns) | | Data Rate (in Mbps) (GI = 400ns) | |
|-----------|---------------------------|---------------------------------|-------------|------------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-------------------|-------|----------------------------------|-------|----------------------------------|-------|
| | | | | | 20MHz | 40MHz | 20MHz | 40MHz | 20MHz | 40MHz | 20MHz | 40MHz | 20MHz | 40MHz |
| | | | | | 0 | 1 | BPSK | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 52 | 108 | 52 |
| 1 | 1 | QPSK | 1/2 | 2 | 1 | 1 | 52 | 108 | 104 | 216 | 13.0 | 27.0 | 14.4 | 30.0 |
| 2 | 1 | QPSK | 3/4 | 2 | 1 | 1 | 52 | 108 | 104 | 216 | 19.5 | 40.5 | 21.7 | 45.0 |
| 3 | 1 | 16-QAM | 1/2 | 4 | 1 | 1 | 52 | 108 | 208 | 432 | 26.0 | 54.0 | 28.9 | 60.0 |
| 4 | 1 | 16-QAM | 3/4 | 4 | 1 | 1 | 52 | 108 | 208 | 432 | 39.0 | 81.0 | 43.3 | 90.0 |
| 5 | 1 | 64-QAM | 2/3 | 6 | 1 | 1 | 52 | 108 | 312 | 648 | 52.0 | 108.0 | 57.8 | 120.0 |
| 6 | 1 | 64-QAM | 3/4 | 6 | 1 | 1 | 52 | 108 | 312 | 648 | 58.5 | 121.5 | 65.0 | 135.0 |
| 7 | 1 | 64-QAM | 5/6 | 6 | 1 | 1 | 52 | 108 | 312 | 648 | 65.0 | 135.0 | 72.2 | 150.0 |
| 8 | 2 | BPSK | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 52 | 108 | 104 | 216 | 13.0 | 27.0 | 14.4 | 30.0 |
| 9 | 2 | QPSK | 1/2 | 2 | 1 | 1 | 52 | 108 | 208 | 432 | 26.0 | 54.0 | 28.9 | 60.0 |
| 10 | 2 | QPSK | 3/4 | 2 | 1 | 1 | 52 | 108 | 208 | 432 | 39.0 | 81.0 | 43.3 | 90.0 |
| 11 | 2 | 16-QAM | 1/2 | 4 | 1 | 1 | 52 | 108 | 416 | 864 | 52.0 | 108.0 | 57.8 | 120.0 |
| 12 | 2 | 16-QAM | 3/4 | 4 | 1 | 1 | 52 | 108 | 416 | 864 | 78.0 | 162.0 | 86.7 | 180.0 |
| 13 | 2 | 64-QAM | 2/3 | 6 | 1 | 1 | 52 | 108 | 624 | 1296 | 104.0 | 216.0 | 115.6 | 240.0 |
| 14 | 2 | 64-QAM | 3/4 | 6 | 1 | 1 | 52 | 108 | 624 | 1296 | 117.0 | 243.0 | 130.3 | 270.0 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|--------|-----|---|---|---|----|-----|-----|------|-------|-------|-------|-------|
| 15 | 2 | 64-QAM | 5/6 | 6 | 1 | 1 | 52 | 108 | 624 | 1296 | 130.0 | 270.0 | 144.4 | 300.0 |
| 16 | 3 | BPSK | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 52 | 108 | 156 | 324 | 19.5 | 40.5 | 21.7 | 45.0 |
| 17 | 3 | QPSK | 1/2 | 2 | 1 | 1 | 52 | 108 | 312 | 648 | 39.0 | 81.0 | 43.3 | 90.0 |
| 18 | 3 | QPSK | 3/4 | 2 | 1 | 1 | 52 | 108 | 312 | 648 | 58.5 | 121.5 | 65.0 | 135.0 |
| 19 | 3 | 16-QAM | 1/2 | 4 | 1 | 1 | 52 | 108 | 624 | 1296 | 78.0 | 162.0 | 86.7 | 180.0 |
| 20 | 3 | 16-QAM | 3/4 | 4 | 1 | 1 | 52 | 108 | 624 | 1296 | 117.0 | 243.0 | 130.0 | 270.0 |
| 21 | 3 | 64-QAM | 2/3 | 6 | 1 | 2 | 52 | 108 | 936 | 1944 | 156.0 | 324.0 | 173.3 | 360.0 |
| 22 | 3 | 64-QAM | 3/4 | 6 | 1 | 2 | 52 | 108 | 936 | 1944 | 175.5 | 364.5 | 195.0 | 405.0 |
| 23 | 3 | 64-QAM | 5/6 | 6 | 1 | 2 | 52 | 108 | 936 | 1944 | 195.0 | 405.0 | 216.7 | 450.0 |

Tabla 1: Esquemas de modulación MIMO

Los parámetros que se encuentran en la tabla son:

- N_{ES} : Número de codificadores FEC usados
- N_{SD} : Número de subportadoras
- N_{CBPS} : Número de bits de código por símbolo
- G_I : Intervalo de guarda

3 BALANCE DE ENLACE

“La radio no tiene futuro.”

William Thomson Kelvin

3.1. Introducción

Con la proliferación de Internet y la consecuente congestión de las redes de área local (WLANs), se hace esencial una planificación cuidadosa de la red y un modelo de propagación fiable para los despliegues actuales. Antiguamente, la cobertura WiFi se estimaba principalmente de una manera ad-hoc: la infraestructura se colocaba en una pequeña área de prueba con una idea básica de la cobertura en mente, usando medidas para proporcionar verificación y análisis, y luego repetir el proceso para más y más áreas hasta que se conseguía una cobertura completa. Este proceso solía ser muy costoso y muy duradero. Posteriormente, se empezaron a utilizar otros métodos más prometedores de despliegue adaptativo, de muy bajo coste, que consisten en la realización de métodos de análisis del área inicial y luego usar esos resultados para actualizar los parámetros para un modelo predictivo, que luego se usa para simular el proceso de despliegue en otras áreas.

Para que este tipo de modelos predictivos funcionen, y para la correcta implementación del simulador presentado, los cálculos de la red deben usar un modelo de pérdidas de propagación que sea preciso y capaz de ser optimizado.

Para lograr esto, en el simulador presentado se va a utilizar una adaptación del modelo de propagación de Seidel-Rappaport como modelo simple, de rayo directo, con exponente único de pérdida de propagación que se usa para las predicciones en un entorno exterior. El modelo de Seidel-Rappaport es capaz de optimizarse usando técnicas de regresión lineal estándar, y supone unas ventajas de velocidad importantes comparado con otros modelos, como el ray-tracing. Además, el modelo permite la inclusión de información específica del entorno para mejorar la precisión, sobre todo en comparación con los modelos basados únicamente en

la distancia entre nodos, es decir, los modelos de pérdidas de propagación en espacio libre.

3.1.1 Técnicas existentes de modelado en exteriors

Los métodos de predicción de cobertura de la señal inalámbrica se han venido desarrollando desde décadas. Estos modelos predicen la potencia de la señal en un punto dado determinando la pérdida de propagación, la diferencia entre la potencia transmitida y la recibida, desde el transmisor al receptor. Los modelos de propagación deterministas se engloban generalmente en dos categorías: Rayo directo y Multi-rayo.

3.1.1.1 Modelos de Rayo directo

Los modelos de rayo directo son aquellos que calculan las pérdidas basándose en parámetros determinados por la línea recta más corta que conecta las antenas del transmisor y receptor. El modelo más simple de esta categoría es el que usa directamente la fórmula de Friss, que depende puramente de la distancia, y calcula la potencia de la señal recibida teniendo en cuenta la pérdida de propagación en espacio libre, usando la siguiente ecuación:

$$P_{RX} = P_{TX} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot d} \right)^2 \quad (3-1)$$

donde PRX es la potencia de señal en el receptor, PTX es la potencia de salida del transmisor, GTX es la ganancia de la antena de transmisión, GRX es la ganancia de la antena receptora, λ es la longitud de onda y d es la distancia desde el transmisor al receptor.

La ecuación de Friss asume que el medio de transmisión es prácticamente el vacío, lo que limita su aplicabilidad en entornos reales.

Para incrementar la precisión de la ecuación de Friss, el término exponencial normalmente se eleva a una potencia general n, llamado normalmente el exponente de pérdida de propagación, y que en el vacío valdría 2. Este exponente permite variaciones específicas que se pueden incluir en el modelo dependiente de la distancia y es uno de los parámetros más importantes para todos los modelos de este tipo. Con la inclusión del exponente de pérdida de propagación, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$Péridas = 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi \cdot d_0}{\lambda} \right) + X_{\sigma} \quad (3-2)$$

donde los parámetros son el mencionado exponente de pérdida de propagación, n, una distancia de referencia d_0 , y el término X_{σ} representa la variación logarítmica normal de la pérdida de propagación del canal. Esta forma de la ecuación aísla los componentes de pérdidas de la ecuación de Friss agrupando la diferencia de la potencia recibida y la transmitida y las ganancias de antenas en un único término de

pérdidas. Esta ecuación se manipula casi exclusivamente en escala logarítmica.

Algunos modelos de rayo directo usarán múltiples exponentes de pérdidas dependiendo del entorno RF en el que se encuentre el camino, como Línea de Visión (LOS – Line of Sight), donde no hay obstáculos entre el transmisor y el receptor y Sin Línea de Visión (NLOS – Non Line of Sight), donde hay obstáculos entre el transmisor y el receptor.

El aumento de la sofisticación de los modelos de rayo directo normalmente implican la inclusión de parámetros adicionales a la ecuación anterior, para incluir información específica de la localización, que está correlacionada con la ganancia de la señal o pérdida, con respecto a la pérdida en espacio libre.

Estos parámetros normalmente incluyen información acerca de la altura de los edificios, anchura de las calles, separación entre los edificios, y otra información física correlada con mecanismos de propagación conocidos.

Mientras algunos parámetros de los métodos de rayo directo se pueden determinar conociendo los componentes multicamino, los modelos aún no incluyen cálculos directos de caminos multi-rayo.

3.1.1.2 Modelos Multi-rayo

Los métodos multi-rayo son aquellos que calculan las pérdidas de propagación basándose en la suma de intensidades de campo para más de un camino desde el transmisor al receptor. Normalmente, los modelos multi-rayo se describen bajo el marco de los modelos ray-tracing, pero el término “multi-rayo” se usa para incluir cualquier modelo que pueda agregar la intensidad de la señal de más de un camino transmisor-receptor a la vez.

Los modelos multi-rayo normalmente realizan los cálculos de pérdidas directamente basándose en reflexiones geométricas, difracciones, y dispersión, en vez de hacer cálculos indirectos de las pérdidas a través de correlaciones como en los métodos de rayo directo.

Muchos métodos se centran en lanzar un gran número de rayos desde el transmisor al receptor y usan ópticas geométricas para determinar los caminos secuenciales de los rayos. Otros métodos se centran en seleccionar solo aquellos rayos que contribuyen en más medida a la potencia de señal recibida. La complejidad adicional de los modelos multi-rayo incrementa bastante el tiempo de computación comparada con los modelos de rayo directo, y esto hace que sea difícil usarlo en planificaciones de red a gran escala.

3.1.2 Modelo usado en el Simulador

El modelo usado en el simulador es un modelo de rayo directo, con un exponente de pérdidas único. Es una adaptación del modelo de Seidel-Rappaport para exteriores, que calcula las pérdidas de propagación entre un transmisor y un receptor según la distancia entre ellos y el número y tipo de obstáculos que intersectan en la línea directa entre el transmisor y receptor (rayo directo).

Para la realización del simulador, las intersecciones tenidas en cuentas son edificios y áreas en ruinas (escombros), aparecidas después de un desastre, en donde se debe desplegar la red. Estas áreas se describirán más adelante.

Por lo tanto, la ecuación usada en el simulador para calcular las pérdidas de propagación (en dB) será:

$$Pérdidas = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \sum_i OBS_i \cdot PE_i \quad (3-3)$$

donde $PL(d_0)$ es igual a la pérdida en espacio libre con respecto a la distancia de referencia dada, d_0 (normalmente 1m, 100m o 1Km, dependiendo del entorno), d es la distancia entre el transmisor y receptor, n es el componente de pérdidas, OBS_i es el número de obstáculos del tipo i que intersectan al rayo directo, y PE_i es el efecto de propagación, o la cantidad de cambios que incurren al intersectar un obstáculo, para un obstáculo de tipo i .

Estos parámetros podrán ser configurados directamente desde el simulador.

4 DETECCIÓN DE CONTIENDAS

“El desarrollo es el nuevo nombre de la paz.”

Juan Pablo II

4.1. Control de admisión

El estándar IEEE 802.11e proporciona calidad de servicio (QoS) agrupando las aplicaciones (o tráfico) en cuatro categorías de acceso diferentes. El área de cobertura de las WLANs se puede extender permitiendo a los nodos vecinos retransmitir los datos hacia los puntos de acceso, como ya hemos comentado anteriormente.

Debido a la capacidad limitada de la red y a los mecanismos de acceso al canal basados en contienda, normalmente se necesita un control de admisión para regular el número de flujos simultáneos para mantener el QoS.

El mecanismo EDCA (Enhanced Distributed Channel Access), el cual es una extensión directa del DCF (Distributed Coordination Function), proporciona soporte QoS basado en contiendas.

Uno de los objetivos del simulador es por tanto proporcionar mecanismos que permitan desarrollar un algoritmo de control de acceso. Este algoritmo construye primero el grafo de contienda para descomponer la situación de contienda en áreas compuestas que se pueden tratar de forma independiente.

El simulador permitirá, como se explicará más adelante, generar tráfico simulado para observar cómo se agrupan y forman estas áreas compuestas independientes.

En el mecanismo EDCA, cada flujo de tráfico se asigna a una de las cuatro categorías posibles (ACs). Cada AC tiene una prioridad de acceso al medio distinta. Se ha demostrado que esta diferenciación de esquemas funciona bien cuando la red no está demasiado cargada. Sin embargo, debido al acceso al canal basado en

contiendas, no se puede garantizar un QoS (caudal, retardo, etc.) cuando la red está sobrecargada.

Para proporcionar un mejor QoS, los esquemas de gestión de recursos como el de control de admisión son esenciales para proporcionar QoS garantizado. Los puntos de acceso QoS pueden supervisar la cantidad de tráfico permitido en la red y mantener la carga de la misma bajo un cierto umbral.

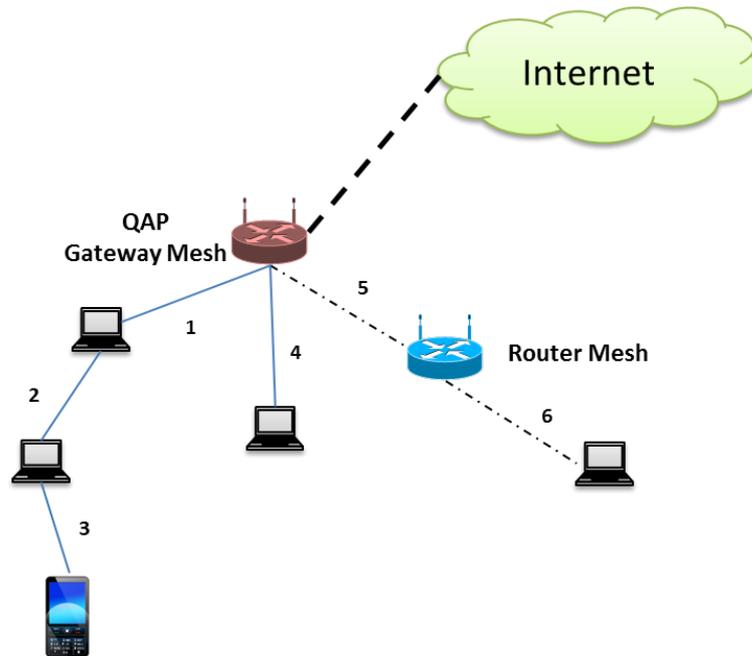


Ilustración 7: Red WLAN multi-hop. Cada enlace se representa con un entero.

El control de admisión para las WLAN multi-hop siempre ha sido un reto. Para el caso de una WLAN de un único salto, todos los nodos (es decir, los QAP y las estaciones) experimentan contiendas similares de acceso al medio. Las decisiones de admisión se basan en la suposición de que todos los nodos pueden monitorizar las condiciones de la red al completo, mediante algunas medidas locales. Sin embargo, para el caso multi-hop, debido a las contiendas dependientes de la localización, la información local de uso del medio se vuelve algo inefectiva para capturar la situación de contienda en el tráfico de la totalidad de la red.

Por lo tanto, los algoritmos de control de admisión propuestos para el caso de un único salto no son directamente aplicables a escenarios multi-hop.

En el simulador desarrollado, se implementa más un algoritmo de detección de contiendas que de control de admisión en sí, pero proporciona las bases para finalmente implementar la lógica de admisión de tráfico.

Primeramente se usa un gráfico de contiendas para modelar la situación de contienda en la red. A continuación se estima la capacidad para cada clique máximo en el grafo.

El simulador determina que un nuevo flujo de tráfico se admite si la carga de tráfico agregado es menor que la capacidad estimada de la red.

Realmente, lo que se hace es distribuir la totalidad de la capacidad de la red en distintas áreas compuestas.

4.2. Modelo de red y suposiciones

Vamos a considerar una red WLAN multi-hop compuesta de N nodos y un conjunto de L enlaces. Imaginemos que hay un punto de acceso que conecta la red a Internet y que actúa de Gateway para todas las otras estaciones de la red. Por simplicidad y sin pérdida de generalidad, vamos a considerar dos ACs para EDCA. Se asume que todos los nodos usan el mismo esquema de modulación y potencia de transmisión. Cada nodo tiene un rango de transmisión (R_{tx}) idéntico.

Un enlace entre dos nodos existe si la distancia entre ellos es menor o igual a R_{tx} .

La transmisión de datos entre un nodo i y un nodo j es exitosa si:

1. Existe un enlace entre los nodos i y j .
2. Ningún otro nodo dentro del rango de interferencia (R_{int}) del nodo j está transmitiendo simultáneamente.

4.2.1 Grafo de contiendas

En general, el rango de interferencias es mayor que el de transmisión ($R_{int} > R_{tx}$). Los paquetes transmitidos dentro del rango de interferencias pueden experimentar contienda basada en localización en el acceso al canal.

Para capturar las contiendas entre los diferentes vecinos de la red, se construye un grafo de flujo de tráfico $G = \{V, E\}$, basándose en el modelo de enlace de la red anterior. Cada vértice $v \in V$ representa un enlace en el grafo de red. Dados dos enlaces u y $v \in V$, existe una arista $e_{uv} \in E$ si esos dos enlaces no pueden estar activos simultáneamente. Como ejemplo, la figura 8 es una representación de la topología de red para el escenario de la figura 7.

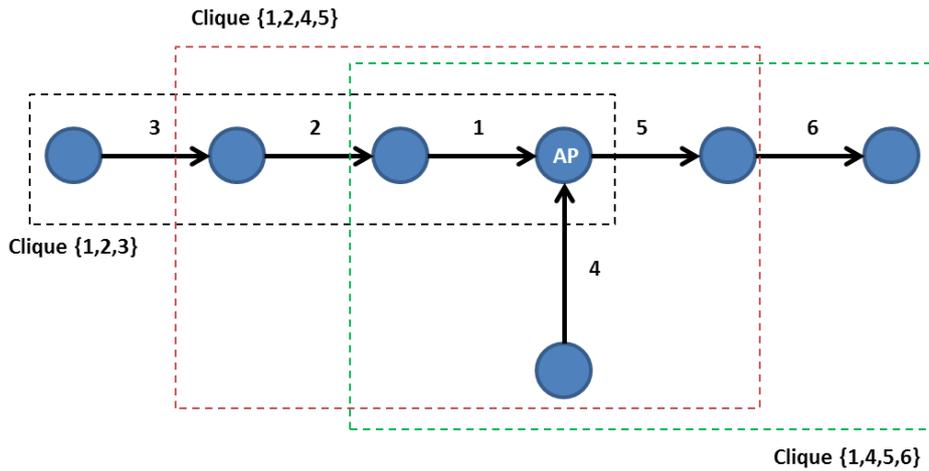


Ilustración 8: Ejemplo de topología WLAN con 6 enlaces

El grafo de contiendas correspondiente se muestra en la figura 9.

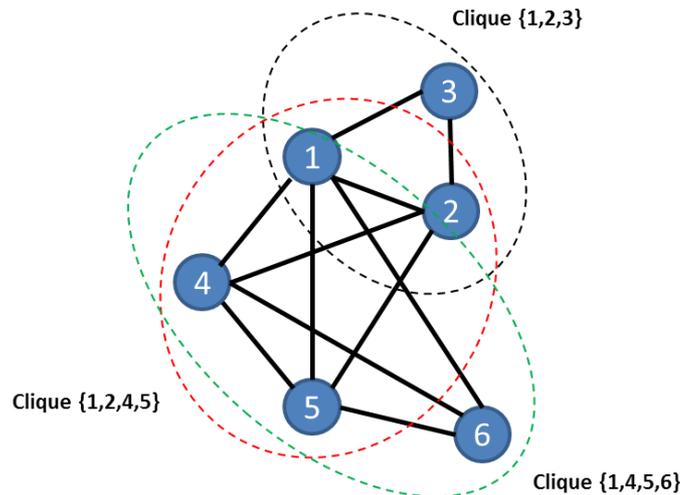


Ilustración 9: Grafo de contiendas y cliques máximos para la topología de 6 enlaces.

En un grafo de contiendas, cualquier grafo inducido completo es lo que se llama un “clique”. En un clique, cada vértice es adyacente a los otros. Un clique máximo es aquel que no pertenece a ningún otro clique mayor. Por ejemplo, en la figura 2B, hay tres cliques máximos: enlaces {1,2,3}, enlaces {1,2,4,5} y enlaces {1,4,5,6}. Todos los enlaces en cada clique máximo comparten los mismos recursos del canal y por lo tanto solo uno de ellos puede estar activo al mismo tiempo.

Sin embargo, los enlaces que pertenecen a diferentes cliques máximos pueden estar activos simultáneamente.

4.2.1.1 Análisis de contiendas en 802.11.

Vamos a considerar un grafo de contienda que tiene M cliques máximos. Se define la matriz de contienda F de la siguiente forma:

$$F_{ml} = \begin{cases} 1, & \text{si el enlace } l \in \text{clique } m \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4-1)$$

La dimensión de la matriz F es M x L.

Supongamos que hay un total de S flujos de tráfico entre las estaciones y el punto de acceso. Se defina la matriz de enrutado R como:

$$R_{ls} = \begin{cases} 1, & \text{si el flujo } s \text{ usa el enlace } l \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4-2)$$

La dimensión de la matriz R es L x S.

Para los flujos S de la red, se asume que pertenecen a una de las dos categorías de acceso (AC₁ o AC₂).

Si definimos el vector de tasas de origen para AC_i:

$$x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iS}]^T, \quad i = 1, 2 \quad (4-3)$$

donde x_{ij} es la tasa del flujo j en AC_i.

La carga de tráfico de AC_i en cada enlace se puede calcular como:

$$y_i = Rx_i = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{iL}]^T, \quad i = 1, 2 \quad (4-4)$$

donde y_{il} es la carga de tráfico total sobre el enlace l para el tráfico de tipo AC_i.

La carga de tráfico de tipo AC_i en cada clique máximo es:

$$z_i = Fy_i = [z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{iM}]^T, \quad i = 1, 2 \quad (4-5)$$

Un nuevo flujo se puede aceptar solo cuando la carga de tráfico total en cada clique máximo no excede la capacidad disponible c_i en ese clique. Esto es:

$$z_i \leq \gamma_i c_i, \quad i = 1, 2 \quad (4-6)$$

donde $0 < \gamma_i < 1$, γ es un parámetro configurable.

El problema que presenta este control de admisión es cómo obtener una estimación precisa de la capacidad c_i en cada clique máximo. En un enlace de comunicaciones cableado, la capacidad del canal está normalmente bien definida porque el canal de comunicación es un enlace dedicado entre el transmisor y el receptor.

Por otro lado, para redes inalámbricas, la capacidad del canal se puede interpretar de diferentes maneras. Algunos la ven como la tasa de transmisión de la capa física, que es un valor fijo dado por la potencia de transmisión, y los esquemas de modulación y codificación.

Sin embargo, en las WLAN basadas en CSMA/CA, el caudal alcanzado por cada nodo normalmente no llega a la velocidad de transmisión física, debido a la sobrecarga del protocolo y a las contiendas en el medio de transmisión compartido.

No obstante, en el simulador implementado, obviaremos la sobrecarga del protocolo, ya que realmente no se simula un tráfico real.

5 SIMULADOR DE REDES WMN

“No podemos resolver problemas usando el mismo tipo de pensamiento que usamos cuando los creamos.”

Albert Einstein

5.1. Objetivos

Con el objetivo de realizar el diseño y análisis de los enlaces de comunicaciones necesarios para el despliegue de la red del proyecto Icarus (descrito en la sección 1) se ha diseñado el simulador presentado en este trabajo.

El simulador ha sido desarrollado completamente en Java, proporcionando una herramienta gráfica que inserta un globo digital 3D. Este globo digital se basa en la librería WorldWind para Java. La librería WorldWind es una librería que actúa como globo virtual.

Es posible utilizar una gran cantidad de capas digitales sobre el globo, como las proporcionadas por satélites de la NASA o fotografías aéreas del USGS (United States Geological Survey). Además, la herramienta permite utilizar información adicional, como nombre de países y ciudades, fronteras, etc., que ayudan a la visualización por parte del usuario.

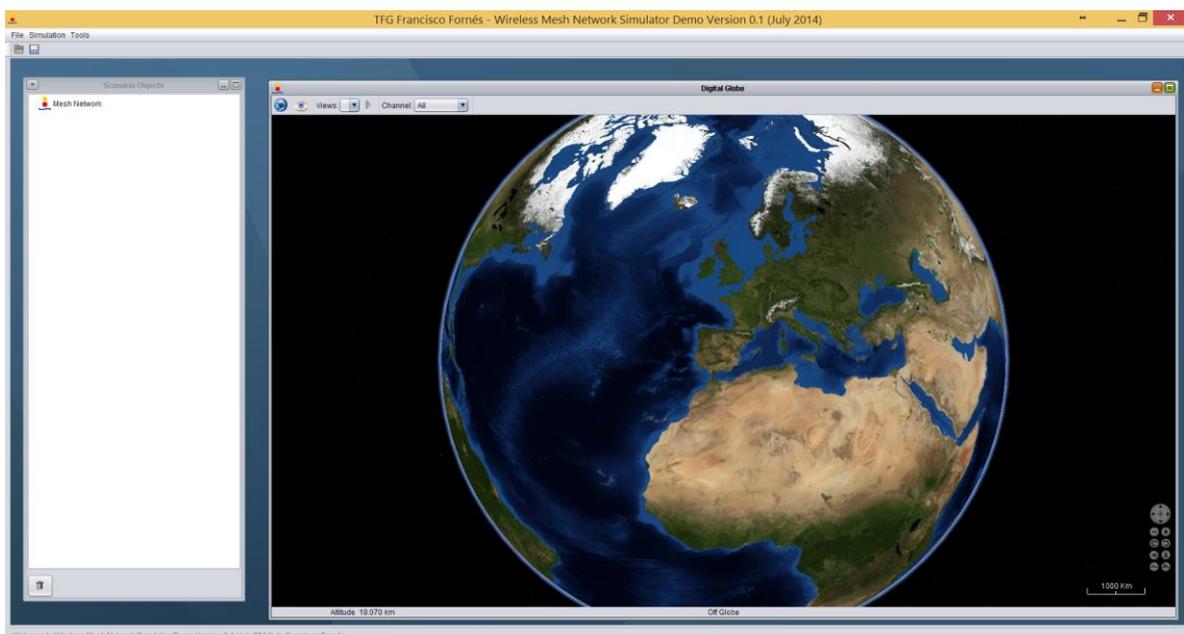


Ilustración 10: Vista principal del Simulador de redes WMN

Es posible interactuar con el globo rotándolo y haciendo zoom en las áreas de interés. La herramienta también permite al usuario añadir nodos (muy importante para crear el escenario), a través de la barra de menús o directamente interactuando con el globo. Estos nodos se pueden configurar en el momento de la creación o posteriormente, por ejemplo, si se desea modificar algún parámetro de transmisión.

Una característica también importante del simulador es la posibilidad de crear diferentes áreas que intervienen en la simulación (como zonas de escombros o edificios) que se mostrarán en el globo.

La siguiente figura muestra una captura del simulador, mostrando el árbol de objetos (nodos y elementos de simulación) a la izquierda, y el globo digital a la derecha, con una serie de nodos que forman el escenario de simulación.

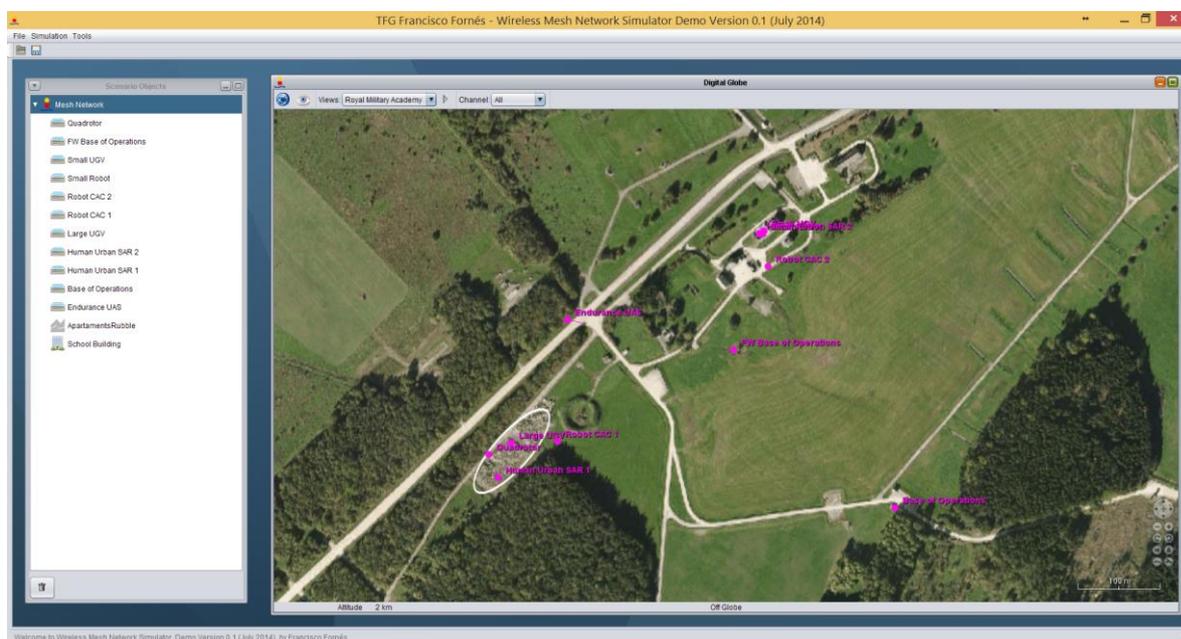


Ilustración 11: Escenario cargado en el Simulador de redes WMN

Una vez que se ha definido la topología de la red mesh, es posible ejecutar un análisis en tiempo real de los enlaces de comunicaciones.

Es importante recordar que este tipo de redes mesh cambian constantemente, así que se hacía necesario que el análisis fuera dinámico.

El simulador es capaz de ejecutar análisis completos de balances de enlace para evaluar el rendimiento de cada enlace entre los distintos nodos.

Como ya se describió anteriormente, el balance de enlace es balance entre todas las ganancias y pérdidas desde el transmisor, hasta el receptor a través del medio de propagación, permitiendo calcular la potencia recibida desde un transmisor inicial.

Para calcular las pérdidas de camino, se ha usado el modelo de propagación descrito en la sección 3. El escenario considerado, que se describirá más adelante, es un entorno exterior que incluye obstáculos como

zonas de escombros y edificios.

El modelo de propagación incluye varios componentes que modelan las pérdidas sufridas en la potencia de transmisión. Las pérdidas básicamente dependen de la distancia, frecuencia de trabajo y altura de las antenas, así como de los obstáculos y otros elementos presentes en el enlace. El componente básico es la pérdida de propagación en espacio libre, a la que se le añaden otras pérdidas para tener en cuenta los otros efectos que se pueden presentar en un entorno no ideal:

- Pérdidas logarítmicas que se incrementan con la distancia (esta distancia será relativa a una distancia de referencia). Esta pérdida se multiplicará por un coeficiente que dependerá del entorno y refleja varios efectos de propagación.
- Pérdidas adicionales que reflejan el efecto de una señal LOS que tiene que atravesar muros de edificios o cruzar zonas de escombros. Esto tiene en cuenta el número de intersecciones con estos obstáculos y el tamaño del obstáculo. Es importante destacar que el rendimiento del enlace, no solo depende de la potencia recibida por el nodo receptor, sino también del tipo de tecnología inalámbrica que usan los nodos (en este caso, WLAN 802.11n) y de las características de los transceptores. Todos estos parámetros se tienen en cuenta a la hora de realizar los cálculos en el simulador, y muchos de ellos son configurables.

5.2. Storyboard para la generación del escenario

Para la realización del escenario de simulación, se diseñó previamente un guión (storyboard) que permite escenificar una situación de crisis real, en una zona de Bélgica, en la que de repente ocurre un terremoto. El storyboard desarrollado está repartido en dos días consecutivos, repartidos en diferentes intervalos del día.

5.2.1 Día 1

| | |
|----------------------------|---|
| 26 Mayo 2015, 12:45 CET | El 26 de Mayo de 2015, a las 12:16, un terremoto de 7.6 en la escala Richter (a 7.1 Km de profundidad) con epicentro en Marche-en-Famenne (MEF) asoló Woodland. Woodland es un país que no forma parte de la UE y que hace frontera con Bélgica al Oeste, Alemania al Este, Holanda al Norte y Francia y Luxemburgo al Sur: |
|----------------------------|---|



Ilustración 12: Mapa de Woodland

El primer reporte GDACS acerca del terremoto en MEF llegó a las 12:45. Las telecomunicaciones se han dañado, interrumpiendo las redes y líneas telefónicas. Los diferentes reportes muestran distintos grados de daños. Sin embargo, muchas fuentes reportaron que cientos de casas han sido dañadas. Algunos han sido testigos directos de los daños en puentes y del fuego y pánico entre los residentes. Algunas tuberías de agua se han roto, inundando algunas calles. No hay una información clara acerca del nivel de daños real y del número de heridos o víctimas, si las hubiera.

Otros países afectados del Oeste de Europa incluyen a Holanda, Alemania, Luxemburgo y una parte de Francia. El terremoto se ha sentido en Paris y Londres, a varios cientos de kilómetros de distancia. Se han observado algunos incendios.

Se enviaron SMS y emails a todos los coordinadores y secretarías de los equipos USAR en los países vecinos.

| | |
|----------------------------|--|
| | El OSOCC (On-site Operations Coordination Centre) Virtual se activó por parte de UN/FCSS en Génova. |
| 26 Mayo 2015, 13:15 CET | Se envía el mensaje MIC nº1 por el DG ECHO |
| 26 Mayo 2015, 13:45 CET | El gobierno de Bélgica activa el Comité de Planificación del B-FAST (Belgian First Aid and Support Team). El B-FAST se registra en el OSOCC y empieza a monitorizar la zona. |
| 26 Mayo 2015, 14:15 CET | Se solicita ayuda internacional por parte del Gobierno de Woodland a la ONU y UE. |
| 26 Mayo 2015, 14:45 CET | Aparece un segundo terremoto de 6.2 RS a las 14:38. |
| 26 Mayo 2015, 15:15 CET | El B-FAST activa el Consejo de Coordinación (CC) |
| 26 Mayo 2015, 15:45 CET | El CC decide ofrecer asistencia que incluye bienes para ayudar a la búsqueda y rescate (incluyendo una serie de herramientas autónomas), limpieza de carreteras, y otras necesidades básicas, y envía al primer equipo USAR: el B-FAST. |
| 26 Mayo 2015, 17:45 CET | Los miembros del equipo B-FAST USAR se reúnen en unas cuarteles en Peutie (Bélgica), para empezar con los procedimientos de despliegue del B-FAST. También se registran y actualizan su estado en el OSOCC. |
| 26 Mayo 2015, 19:45 CET | El equipo se desplaza hasta el aeropuerto de Bierset, en Woodland (50 Km al norte del epicentro), para actuar como Centro de Recepción y Salidas (RDC). El equipo al completo se desplaza junto con todo el equipamiento no tripulado, a excepción de los grandes vehículos terrestres no tripulados (LUGV), ya que debido a su tamaño, requieren más tiempo para un despliegue operacional, y se unirán al equipo más adelante. |
| 26 Mayo 2015, 21:45 CET | El equipo llega al RDC y se desplaza a Marche-en-Famenne para unirse al OSOCC. |
| 26 Mayo 2015, 23:30 CET | El lidel del equipo B-FAST se reúne en el OSOCC con la Autoridad Local de Gestión de Emergencias (LEMA), que lleva a cabo las operaciones generales de búsqueda y |

| | |
|------------------------------------|---|
| | <p>rescate desde su base de operaciones en la Base Militar “Roi Albert” en Marche-en-Famenne. Se asigna al equipo USAR asistir a los bomberos de Woodland y a las autoridades en la búsqueda de posibles supervivientes en la ciudad de Focagne.</p> <p>Dado que ningún edificio en los alrededores se ha declarado como resistente a terremotos, el equipo establece la Base de Operaciones (BoO) cerca de los cuarteles, al Sudeste de la base.</p> |
| <p>26 Mayo 2015, 24:00 CET</p> | <p>Después de establecer la base, se interrumpen las operaciones de rescate debido a la oscuridad y los miembros del equipo se van a descansar.</p>  <p>Ilustración 13: Localización del LEMA, Base de Operaciones y Área de Operación (ciudad de Focagne).</p> |

Tabla 2: Storyboard, Día 1

5.2.2 Día 2, AM

| | |
|------------------------------------|---|
| <p>27 Mayo 2015, 06:00 CET</p> | <p>En la mañana del 27 de Mayo, el equipo de planificación del USAR B-FAST se reúne para preparar la misión del día. La infraestructura de comunicaciones pública está muy dañada, pero un equipo de Emergency.lu ha llegado a la zona y ha establecido en enlace de comunicaciones por satélite en la BoO. El sistema C4I se registra en el Emergency.lu para comunicaciones externas.</p> |
|------------------------------------|---|

| | |
|------------------------------------|--|
| | <p>El sistema C4I se conecta al GDACS y obtiene datos acerca del desastre:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reporte de situación - Características del evento - Detalles del impacto - Resistencia y vulnerabilidad de la comunidad - Efectos secundarios - Mapas de satélite y datos, mapa de densidad de población <p>El sistema C4I se conecta al servicio de GeoPictures y obtiene todas las imágenes disponibles de la ciudad de Focagne. Además, contacta con el LEMA para obtener información contextual acerca de, por ejemplo, particularidades de la crisis y estado, recursos disponibles, etc.</p> |
| <p>27 Mayo 2015, 08:00 CET</p> | <p>Dado que hay muy poca información disponible, los responsables de planificación del equipo deciden usar vehículos no tripulados para obtener una visión rápida de la situación de la zona.</p> <p>Se asigna al ENDUR UAS escanear la ciudad de Focagne. El objetivo de este primer escaneo es obtener una buena visión del nivel de destrucción de la zona.</p>  <p>Ilustración 14: El ENDUR UAS escanea el área (aproximadamente 150x700m) y</p> |

| | |
|----------------------------|--|
| | <p>obtiene las siguientes conclusiones: la zona donde establecer una Base de Operaciones de avance (Forward BoO) y 2 áreas prioritarias de búsqueda: 2 bloques de apartamentos derruidos (S1) y un colegio (S2).</p> |
| 27 Mayo 2015, 08:15 CET | <p>El LUGV ha llegado también a la BoO, completando el equipo, y empieza el trabajo de montaje del vehículo para que sea operacional.</p> |
| 27 Mayo 2015, 09:00 CET | <p>El ENDUR UAS captura un mapa digital 3D georeferenciado a media resolución, construido a partir de la luz visible y de imágenes térmicas. El mapa se superpone a los datos GIS existentes y a un modelo 3D existente de la ciudad. A partir de estos datos, el equipo de planificación identifica dos sectores distintos prioritarios, mencionados anteriormente.</p> <p>Debido a experiencias previas, se sabe que la gente puede sobrevivir en ese tipo de derrumbes. Teniendo en cuenta la hora a la que ocurrió el terremoto (al mediodía), se espera que muchas personas estén vivas y atrapadas dentro. De esta forma, el sector S1 se marca como el área de operación SAR prioritaria.</p> <p>El sector S2 es un colegio parcialmente destruido y aún en llamas parcialmente. Se espera que muchos niños estén atrapados en el edificio del colegio. Como los niños son un grupo vulnerable, este sector también se marca como prioritario, con especial atención al edificio.</p> <p>Los datos del ENDUR UAS también revelan que en el centro de Focagne, hay un área con poca destrucción. Esta zona es considerada como un lugar seguro para instalar la Forward BoO.</p> <p>Basándose en este primer grupo de datos, el equipo de planificación solicita un escaneo más detallado al ENDUR UAS de los sectores S1 y S2 y de la zona donde se va a instalar el Forward BoO.</p> |
| 27 Mayo 2015, 09:30 CET | <p>El ENDUR UAS genera un mapa 3D georeferenciado de alta resolución de las zonas seleccionadas.</p> <ul style="list-style-type: none"> - El escaneo de la zona del Forward BoO concluye que la localización propuesta es un lugar seguro. - El escaneo de los sectores S1 y S2 permite al equipo asignar al equipo humano que operará en ambos sectores. El equipo de planificación requiere por tanto la generación del plan de la misión. <p>La planificación de la misión permite asignar minuciosamente los diferentes equipos que se desplegarán en la zona. El equipo de planificación valida la misión,</p> |

| | |
|----------------------------|--|
| | <p>asegurándose de que se cumplen las restricciones propuestas por el sistema automático. Esta planificación es la que se realizará desde el simulador propuesto.</p> <p>Los planes validados se mandan a las dos estaciones de C&C (Comando y Control) para su ejecución.</p> |
| 27 Mayo 2015, 10:00 CET | <p>El equipo USAR se prepara para trasladarse a la localización propuesta para establecer la Forward BoO. El ENDUR UAS es el encargado de buscar la mejor ruta para llegar allí, explorando la traversabilidad (bloqueos, peligros, como deslizamientos de tierra, puentes colapsados, edificios, inundaciones, incendios, etc.).</p> <p>El ENDUR detecta una carretera bloqueada cuando elige el camino más corto desde el BoO al Forward BoO, pero encuentra una ruta alternativa. La ruta encontrada se exporta al formato OpenStreetMap y/o Google Maps y se transfiere a la estación base para instalarse en los dispositivos móviles del equipo.</p> |
| 27 Mayo 2015, 10:15 CET | <p>El montaje del LUGV se ha completado. El equipo USAR recibe los datos de la ruta y se desplaza hacia la zona donde instalar el Forward BoO. La ruta también se descarga en el LUGV que comienza a ejecutarla autónomamente bajo la supervisión de un humano.</p> |
| 27 Mayo 2015, 10:20 CET | <p>Mientras que el equipo USAR se desplaza, el ENDUR UAS se desplaza hasta el sector S1 para encontrar la mejor ruta desde el Forward BoO al área de búsqueda, de la misma forma que antes.</p> <p>Después de eso, el ENDUR UAS realiza la misma operación en el sector S2.</p> |



Ilustración 15: Sector S1: Capa amarilla: área de escaneo para la búsqueda de rutas.
Capa morada: Área para la búsqueda de víctimas.

| | |
|------------------------------------|---|
| |  <p>Ilustración 16: Sector S2: Capa amarilla: área de escaneo para la búsqueda de rutas. Capa morada: Área para la búsqueda de víctimas.</p> |
| <p>27 Mayo 2015, 10:45 CET</p> | <p>Llegada al Forward BoO.</p> |
| <p>27 Mayo 2015, 11:10 CET</p> | <p>El ENDUR termina el escaneo de las zonas para los dos equipos. Para el sector S1, detecta una zona peligrosa con grandes pendientes en la ruta elegida, pero la carretera parece despejada. De la misma forma que antes, las rutas se exportan al formato adecuado y se envían a los dispositivos del equipo USAR.</p> |
| <p>27 Mayo 2015, 11:15 CET</p> | <p>Se establece el Forward BoO. El equipo se divide en 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Equipo 1: USAR Humano + LUGV + AROT (ASCAMM Rotorcraft) - Equipo 2: USAR Humano + SUGV + SROT (SBX Rotorcraft) <p>Cada equipo empieza a desplazarse al sector asignado (S1 y S2), teniendo en cuenta los datos de desplazamiento obtenidos por el ENDUR UAS.</p> |
| <p>27 Mayo 2015,</p> | <p>Mientras que los equipos se desplazan, el ENDUR UAS se desplaza hasta el sector S1</p> |

| | |
|-----------|--|
| 11:20 CET | realizando una búsqueda de humanos usando un detector IR. El ENDUR escanea el área donde se derrumbaron los edificios (área morada de la figura 15). |
|-----------|--|

Tabla 3: Storyboard, Día 2, AM

5.2.3 Día 2, PM

| | EQUIPO 1 | EQUIPO 2 |
|----------------------------|---|---|
| 27 Mayo 2015, 11:45 CET | <p>Llegando a la zona, los miembros del equipo se ponen en contacto con los supervivientes, indicando que hay muchos en la zona de los edificios. La destrucción de los edificios es más dramática de lo previsto y la mayor parte de la estructura está totalmente destruida. Además, lo que queda es extremadamente inestable según el ingeniero de estructuras del equipo, así que operar cerca de los muros de los edificios es demasiado peligroso para un equipo humano.</p> <p>Mientras se observa la situación, el equipo recibe en su estación RC2 los primeros datos del ENDUR UAS, con un mapa indicando las localizaciones de 3 víctimas potenciales.</p> | <p>Llegando al centro de Focagne, donde se encuentra el colegio, se reúnen con el alcalde de la ciudad. El alcalde reporta que hay dos almacenes con materiales potencialmente peligrosos cerca del centro. No se tienen más datos por el momento. Los miembros del equipo envían esta información al OSOCC, esperando órdenes sobre cómo proceder.</p> <p>Mientras tanto, el Ministerio de Educación de Woodland envía un plano del colegio al OSOCC. El OSOCC envía esta información al RC2 del equipo. Dado que no hay datos todavía sobre posibles víctimas por parte del ENDUR, el equipo se envía a descubrir supervivientes.</p> |
| 27 Mayo 2015, 12:30 CET | Las posiciones de las víctimas potenciales se envían desde el ENDUR hacia el AROT, que está encargado de proporcionar una visión 3D de la zona y confirmar la detección de las víctimas usando su detector de humanos. | <p>Se encuentran rápidamente tres supervivientes cerca de la plaza central y son atendidos por el equipo de rescate.</p> <p>Después de completar el escaneo del sector S1, el ENDUR UAS se envía al sector S2 para realizar la misma operación.</p> |
| 27 Mayo 2015, 13:00 CET | El AROT regresa de su misión, con un mapa muy detallado en 3D que es | El equipo ahora se centra en el colegio, donde se han perdido varios niños. El |

| | | |
|------------------------------------|---|--|
| | <p>enviado al OSOCC y al RC2. Se han encontrado y confirmado 5 víctimas por parte del AROT. El AROT se envía de nuevo a la zona donde se han encontrado las 5 víctimas para evaluar el estado médico de las víctimas.</p> | <p>edificio es demasiado inestable para que un equipo humano trabaje de manera segura.</p> <p>Afortunadamente, el acceso al edificio está despejado. Por lo tanto, se decide que el SROT y el SUGV se envíen simultáneamente para evaluar la integridad de la estructura del edificio, dando al equipo una visión de qué está pasando dentro y para buscar supervivientes. Los vehículos son inicialmente operados remotamente por el RC2 hasta la entrada del edificio, sin embargo, como el edificio tiene muros gruesos y los sistemas no tripulados tienen que cruzar varias habitaciones, se espera que el enlace de comunicaciones se caiga en algún momento (lo que no supone un problema, ya que los vehículos puede operar de manera autónoma).</p> <p>Se envían comandos de alto nivel tanto al SUGV como al SROT.</p> |
| <p>27 Mayo 2015, 13:05 CET</p> | | <ul style="list-style-type: none"> - El SUGV está ahora en la entrada del colegio y entra en el edificio. Como el ancho de banda es suficiente, el SUGV envía continuamente flujos de datos con actualizaciones del mapa, sus sensores visuales, cámara termal y sensores acústicos. - El SROT se encuentra en la entrada del colegio y entra en el edificio. El SROT envía continuamente actualizaciones del mapa del edificio y sus sensores visuales. En el RC2/OSOCC, los mapas 3D recibidos |

| | | |
|----------------------------|--|--|
| | | se combinan y se comparan con el plano del colegio. |
| 27 Mayo 2015, 13:10 CET | | <ul style="list-style-type: none"> - La cámara IR del SUGV ha localizado una víctima. El SUGV marca la localización y la envía al RC2/OSOCC. El HMI del SUGV se usa para establecer una comunicación en video con la víctima, y se establece que la víctima está en buenas condiciones. Se le aconseja que se quede ahí y espere al equipo de rescate. - El SROT entra en una zona donde no es posible la comunicación por video. Anticipándose al poco ancho de banda, el SROT ha cambiado su prioridad para enviar datos al RC2/OSOCC. |
| 27 Mayo 2015, 13:15 CET | | El SROT ha localizado una segunda víctima en el colegio y envía la localización de la víctima al RC2, que reenvía la información al OSOCC y que ordena al SUGV moverse a esa posición para inspeccionar el estado médico de la víctima. |
| 27 Mayo 2015, 13:20 CET | | El SUGV ha llegado cerca de la segunda víctima, que se encuentra en una zona con poco ancho de banda. El SUGV por lo tanto adapta su estrategia de comunicación. Como el ancho de banda no es suficiente para una comunicación por video, se establece una comunicación de audio, donde se detecta que la víctima sufre una deshidratación. El SUGV proporciona un kit de rescate a la víctima y le aconseja que espere al equipo de |

| | | |
|----------------------------|---|---|
| | | <p>rescate.</p> <p>El SROT acaba de llegar a un área con muy poco ancho de banda y reduce al máximo sus comunicaciones con el RC2.</p> |
| 27 Mayo 2015, 13:25 CET | | <p>El SROT está en un área sin enlace de comunicaciones con el RC2 y está explorando el colegio por su cuenta.</p> |
| 27 Mayo 2015, 13:30 CET | <p>El análisis de los mapas 3D, los datos de imagen y la posición y estado de las víctimas proporcionados por el AROT ayudan al equipo de planificación establecer el plan de rescate de las víctimas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La víctima 1 parece estar atrapada cerca del borde del edificio demolido. Sin embargo, los equipos de rescate no pueden rescatar a la víctima directamente, dado que la estructura es muy inestable. Se decide que el LUGV va a limpiar la ruta (eliminando escombros, etc), para que los servicios de rescate puedan acceder y evacuar a la víctima. - Las víctimas 2 y 3 están atrapadas en medio de los escombros. Podría llevarle mucho tiempo al equipo humano rescatarlas, así que se decide enviar primero al AROT para acercarles un kit de rescate. La inspección realizada por el AROT muestra que la | <p>El equipo recibe en su RC2 los primeros reportes del ENDUR UAS, con un mapa indicando las posiciones de dos víctimas potenciales, que no fueron localizadas por el equipo humano. El SROT ha llegado de nuevo a un área con comunicaciones limitada y envía al RC2 los datos que ha recogido en las otras áreas.</p> <p>El SROT ya ha explorado y mapeado todo el colegio y se dirige a la salida para terminar su misión.</p> <p>El SUGV acaba de llegar a un área con comunicaciones muy limitadas y reduce sus comunicaciones con el RC2 al máximo. La cámara IR del SUGV ha detectado un incendio en una de las salas del colegio y lo reporta al RC2.</p> |

| | | |
|----------------------------|--|---|
| | <p>víctima 3 no da señales de vida, así que el equipo da prioridad al rescate de la víctima 2.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Las víctimas 4 y 5 pueden ser evacuadas por el equipo humano sin la necesidad de vehículos no tripulados. | |
| 27 Mayo 2015, 13:35 CET | | Después de completar su misión, el SROT aterriza en la posición designada por el RC2. |
| 27 Mayo 2015, 13:45 CET | | <p>Después de completar su misión, el ENDUR UAS aterriza en la posición designada por el OSOCC.</p> <p>El sensor IR del SUGV ha detectado una tercera víctima cerca del fuego. Como el ancho de banda no es suficiente para una comunicación por audio, el SUGV inicia una comunicación usando texto-a-voz y voz-a-texto con la víctima. A través de este canal, se establece que la víctima no es capaz de localizar la salida por culpa del humo. El SUGV le proporciona un cilindro de oxígeno a la víctima para que siga al SUGV hacia la salida.</p> <p>El SUGV usa su mapa del edificio para llegar hasta la salida del edificio.</p> |
| 27 Mayo 2015, 14:00 CET | <p>Se inicial múltiples operaciones de rescate en paralelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - El equipo humano se envía para rescatar a las víctimas 4 y 5. - El LUGV se manda a limpiar una ruta hasta la víctima 1. La posición de la víctima y el mapa | <p>The two victims, identified by the ENDUR UAS have been brought into safety by the USAR team.</p> <p>The SUGV and the Victim have reached the building exit. The victim is further attended to by the rescue team, while the SUGV returns into the building to</p> |

| | | |
|------------------------------------|--|---|
| | <p>3D del terreno es descargado en el LUGV. El LUGV utiliza su controlador de navegación y su sistema de percepción 3D para negociar una ruta que permita llegar lo más cerca posible a la víctima 1. Desde allí, usa su brazo mecánico, controlado remotamente por un operador con un exoesqueleto, para eliminar barreras y permitir el acceso a la víctima.</p> <ul style="list-style-type: none"> - El AROT se equipa manualmente con kits de rescate y se envía para hacer llegar un kit a la víctima 2. | <p>explore the remains of the school building</p> |
| <p>27 Mayo 2015, 14:15 CET</p> | <p>El AROT ha entregado un kit de rescate a la víctima 2 y se le requiere para ayudar al LUGV en la búsqueda de la mejor ruta hacia la víctima 1.</p> | <p>Los escaneos de las estructuras hechos por el SROT y el SUGV ayudan al equipo de planificación a decidir que se puede enviar con seguridad al equipo de rescate dentro del edificio para rescatar a las dos primeras víctimas detectadas por el SROT y el SUGV.</p> <p>El SUGV ha llegado a un área sin comunicación con el RC2 y está explorando el colegio de manera autónoma.</p> |
| <p>27 Mayo 2015, 14:30 CET</p> | | <p>El SUGV ha llegado de nuevo a un área con comunicaciones limitadas y envía al RC2 los datos recogidos en las otras áreas. Se ha detectado una víctima más por parte del SUGV, aunque la falta de comunicación en esta área hacen que el estado médico de la víctima solo sea</p> |

| | | |
|----------------------------|--|---|
| | | <p>evaluado a partir de imágenes térmicas.</p> <p>Con estos datos, se sospecha que la víctima está viva y se transfiere la posición al RC2 para que sea rescatada.</p> <p>El SUGV ya ha explorado y mapeado completamente el colegio y se dirige a la salida para terminar su misión.</p> |
| 27 Mayo 2015, 14:45 CET | El LUGV ha habilitado un camino hacia la víctima 1. El equipo de rescate acude y evacúa a la víctima. | <p>Combinando los mapas 3D del SROT, el equipo de planificación ha evaluado el estado de la estructura del colegio, identificando zonas peligrosas con incendios, y marcando zonas seguras.</p> <p>Siguiendo esta evaluación, el equipo de rescate acude al colegio para evacuar a la última víctima detectada por el SUGV.</p> |
| 27 Mayo 2015, 14:50 CET | Se requiere que el AROT proporcione una actualización del estado de las víctimas pendientes en el área. | |
| 27 Mayo 2015, 15:00 CET | <p>Se detecta a una sexta víctima bajo los escombros. Sin embargo, debido a la inestabilidad estructural, el acceso a la víctima es demasiado arriesgado para una intervención humana.</p> <p>Se requiere por tanto la intervención del LUGV para asegurar el acceso a la víctima.</p> | The rescue team exits the building, successfully evacuating the last victim detected by the SUGV. |
| 27 Mayo 2015, 15:30 CET | El LUGV está en el lugar para empezar con la operación. Usa su brazo mecánico para apuntalar la zona. | Desde el OSOCC, el equipo de planificación recibe la noticia de que el almacén mencionado por el alcalde contiene materiales peligrosos. Como el colegio parece estar ya cubierto, se decide enviar al equipo al almacén para |

| | | |
|----------------------------|--|---|
| | | comenzar con las operaciones de rescate en ese edificio. |
| 27 Mayo 2015, 15:45 CET | | Llegando al almacén, el equipo intenta entrar en él. |
| 27 Mayo 2015, 16:00 CET | | <p>Todos los intentos de entrar en el almacén fallan ya que la entrada está bloqueada por los escombros. El equipo de planificación concluye que se necesita equipamiento más pesado para romper la entrada, por lo que se necesita probablemente al LUGV. Además, se oyen llantos pidiendo ayuda, posiblemente del tejado del almacén, pero no es posible acceder a él.</p> <p>El equipo concluye que se necesita la intervención del AROT para una visión aérea.</p> <p>El equipo de planificación del sector S2 comunica estas decisiones al OSOCC y espera órdenes.</p> |
| 27 Mayo 2015, 16:15 CET | El LUGV ha estabilizado la entrada hacia la sexta víctima. Los miembros de rescate entran y evacúan a la víctima. | En el OSOCC, se decide trasladar al equipo 1 al almacén. |
| 27 Mayo 2015, 16:15 CET | El equipo 1 recibe la orden del OSOCC de trasladarse al área 3 (el almacén) para ayudar en las operaciones de rescate en el almacén. El LUGV se dirige al área 2 (llevando material pesado y el AROT) usando la información topográfica obtenida por los diferentes escaneos. El resto del equipo sigue al LUGV. | |

| | | |
|----------------------------|--|--|
| 27 Mayo 2015, 16:45 CET | El equipo 1 llega al centro de la ciudad donde se reúne con el equipo 2. | El equipo 2 se reúne con el equipo 1 en el centro de la ciudad de Focagne. |
|----------------------------|--|--|

Tabla 4: Storyboard, Día 2, PM

La realización y lectura de este guión, permite hacerse una idea muy clara del escenario presentado, y es el que se ha usado para desarrollar el simulador y dotarle de la funcionalidad necesaria.

Lógicamente, y debido a la libertad que presenta el simulador, éste puede ser usado para multitud de escenarios, pero se hacía necesario partir de uno para evaluar la complejidad y utilidad de la herramienta.

5.3. Estructura del Simulador

El diseño de la herramienta de simulación está basado en cinco componentes principales:

- Un **sistema de simulación aérea** que permita simular el vuelo circular de sistemas UAS. En el futuro, este sistema permitirá caracterizar adecuadamente el patrón de movilidad de las aeronaves de vigilancia, así como la generación de rutas y el desarrollo y ejecución de vuelos autónomos.
- Una herramienta para la **generación de escenarios**, comprendiendo en ellos los distintos sistemas que componen la red mesh y los objetos físicos que simulan el entorno. Esta herramienta, será capaz de configurar el escenario dinámicamente, permitiendo definir todos los parámetros necesarios para cada objeto (localización, parámetros RF, pérdidas, etc.).
- Un módulo de simulación que permita verificar tanto en tiempo real como simulado los cálculos desarrollados para **el balance de enlace** y la **detección de contiendas** a partir de la generación de tráfico en los enlaces validados en los estudios de balance de enlace.
- Una **base de datos de información geográfica** que nos permita alojar toda la información del entorno radioeléctrico y meteorológico en el área de operaciones escogida, que comprenderá en general millones de kilómetros cuadrados, y que añadan valor añadido a la herramienta final de simulación, como la importación de capas externas en formato shapefile.
- **Un globo digital en 3D** que permita la visualización y configuración de todos los módulos descritos anteriormente, permitiendo además visualizar de una manera más gráfica el resultado de las simulaciones.

En la siguiente figura se muestran los distintos componentes del simulador y cómo están conectados entre sí.

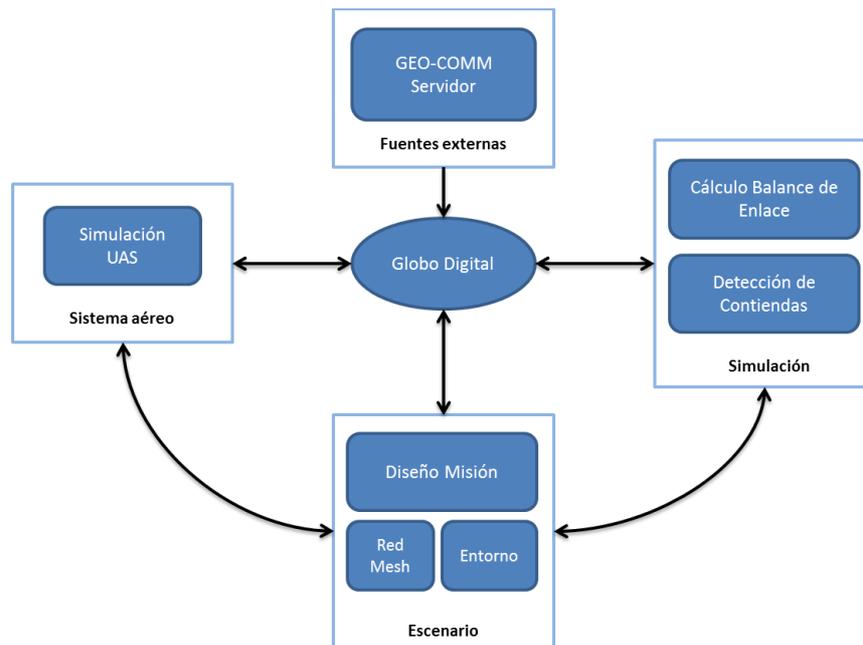


Ilustración 17: Diagrama de bloques del simulador

5.4. Estructura del código fuente

En la siguiente figura se muestra el diagrama de clases generado para el simulador.

El código principal está estructurado en diferentes paquetes que heredan del paquete padre “simulator”, entre los que se encuentran:

- “file”: Clases para la gestión de entrada y salida de ficheros. Permite trabajar con ficheros para abrir/crear escenarios de forma persistente.
- “gui”: Es el paquete principal donde se definen todas las clases que forman la interfaz de usuario.
- “lineofsight”: Contiene clases para ayudar al cálculo de las intersecciones de los enlaces con el terreno.
- “objects”: Representa el modelo de datos del simulador, y contiene todas las clases que definen los objetos que tienen lugar tanto en el escenario como en la simulación.
- “swingworkers”: Contiene aquellas clases susceptibles de realizar tareas pesadas. Estas clases se definen como SwingWorker, interfaz Swing que permite realizar tareas en background sin bloquear la interfaz de usuario.
- “utilities”: Contiene clases útiles para ayudar al cálculo de simulaciones y a la gestión de escenarios.
- “worldwind”: Contiene capas predefinidas que serán añadidas al escenario en caso de necesidad, como los modelos 3D de los UAV.

5.5. Características del Simulador

El Simulador ha sido desarrollado en su totalidad usando el lenguaje Java, haciendo uso de Swing. Swing es una biblioteca gráfica para Java. Incluye widgets para interfaz gráfica de usuario tales como cajas de texto, botones, desplegables y tablas.

Una vez lanzada la aplicación, lo primero que veremos serán dos ventanas flotantes:

- A la izquierda, la ventana de Objetos del escenario, donde se muestra el árbol de objetos que se tienen actualmente en el escenario. Es una ventana de gran utilidad, porque desde ella podemos acceder directamente a las propiedades de cada nodo.
- A la derecha, la ventana del Globo, desde donde tendremos una perspectiva 3D del escenario, y con el que podemos interactuar libremente.

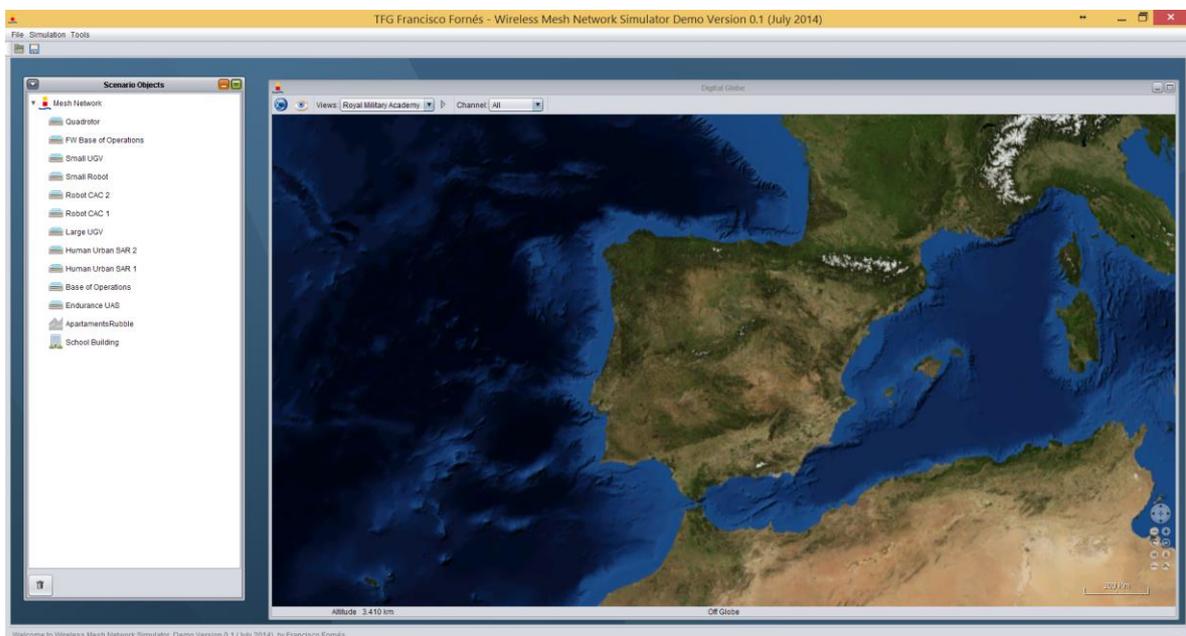


Ilustración 19: Vista principal con escenario cargado del Simulador de redes WMN

5.3.1 Adición de nodos mesh al escenario

El simulador ofrece la posibilidad de crear y simular un escenario propio, mediante la creación de los distintos nodos que compondrán la red mesh.

Para añadir un nodo, simplemente se hace click derecho sobre la Mesh Network, y aparecerá el siguiente menú:

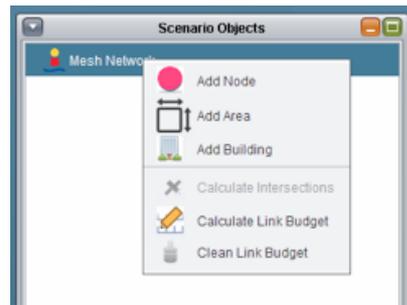


Ilustración 20: Detalle de menú contextual para la adición de nodos

Si hacemos click sobre “Add Node”, nos aparecerá el siguiente cuadro de diálogo, que permitirá definir las características del nodo mesh.

Ilustración 21: Cuadro de diálogo con las propiedades de un nodo mesh

Las características comunes a todos los rodos mesh son las siguientes:

- **Name:** Nombre del nodo.
- **Identifier:** Identificador único del nodo. Si no se especifica, se asigna uno aleatoriamente.
- **Latitude:** Coordenadas de latitud decimal del nodo en grados Norte ($^{\circ}$ N).
- **Longitude:** Coordenadas de longitud decimal del nodo en grados Este ($^{\circ}$ E).

- **Height:** Altura en metros de la posición del nodo sobre el terreno.
- **Elevation:** Elevación en metros de la posición del nodo sobre el nivel del mar. Este valor se calcula automáticamente y no puede ser modificado, puesto que depende de la posición.
- **Is UAV?:** Permite marcar si el nodo va a ser un nodo de tipo UAS. Este tipo de nodos tienen propiedades adicionales en el simulador, ya que son capaces de realizar, de momento, vuelos circulares y actualizar la red en tiempo real. En caso de activar esta casilla, aparecen nuevos campos que permitirán finalmente definir los parámetros de vuelo:
 - *Radio:* Radio en metros del área que va a cubrir el UAV. Permite definir la circunferencia de vuelo.
 - *TimeStep:* Tiempo de ciclo en milisegundos en el que se actualizará la posición del UAV.
 - *Speed:* Velocidad deseada para el UAV en metros por segundo.
 - *Model:* Archivo de formato 3DS que contiene el modelo 3D que usará para la visualización del UAV.
- **Role:** Rol que puede tomar el nodo dentro de la red mesh. Los distintos roles que puede tomar un nodo están extraídos de las especificaciones definidas al comienzo del documento, y que se listan a continuación:
 - *Mesh Router*
 - *Mesh Access Point*
 - *Mesh Gateway*
 - *Mesh Access Point + Gateway*
 - *Station – Client:* Estaciones mesh normales, que participan en la red
 - *Station – Point-to-point:* Estaciones mesh que solo pueden conectarse con otras estaciones mesh, formando una red ad-hoc.

El tipo de nodo permite definir las posibles conexiones que pueden contraer entre ellos.

Las distintas conexiones posibles son las especificadas en la sección 2.

Por ejemplo, las estaciones normales “Station – Client” solo pueden conectarse directamente con los distintos Mesh Access Point.

Según el tipo de rol seleccionado, se definen distintas interfaces, cada una de ellas con un transceiver, cuyos parámetros son comunes a todos los nodos, y son:

- **Transmitter:** Parámetros de transmisión, que incluye:
 - *Ptx:* Potencia de transmisión en dBm
 - *Ltx:* Pérdidas adicionales de transmisión en dB
- **Receiver:** Parámetros de recepción, que incluye:
 - *Lrx:* Pérdidas adicionales de recepción en dB.

- **Channel:** Permite seleccionar el canal utilizado por esta interfaz de entre los canales configurados en la red. En este caso, entre el canal 1, 2 o 3.
- **Antenna:** Parámetros de la antena del transceiver, que incluye:
 - *Pattern:* Permite definir un fichero con el patrón de ganancia de la antena. Esta funcionalidad no está disponible actualmente. El objetivo es que el cálculo de ganancia sea automático y en función de la orientación de la antena con el nodo del otro extremo de la comunicación.
 - *Gtx:* Ganancia de la antena en transmisión, expresada en dBi.
 - *Grx:* Ganancia de la antena en recepción, expresada en dBi.

Ilustración 22: Detalle de interfaces de un nodo mesh

Las distintas interfaces que se crean en los nodos automáticamente según el rol establecido son los expresados en la siguiente tabla:

| Tipo de nodo | Interfaces |
|--------------|------------|
|--------------|------------|

| | |
|-----------------------------|--|
| Mesh Router | Mesh Router |
| Mesh Access Point | Mesh Router, Access Point |
| Mesh Gateway | Mesh Router 1, Mesh Router 2 |
| Mesh Access Point + Gateway | Mesh Router 1, Mesh Router 2, Access Point |
| Station – Client | Client |
| Station – PointToPoint | PointToPoint |

Tabla 5: Relación tipo de nodo – interfaz en el simulador

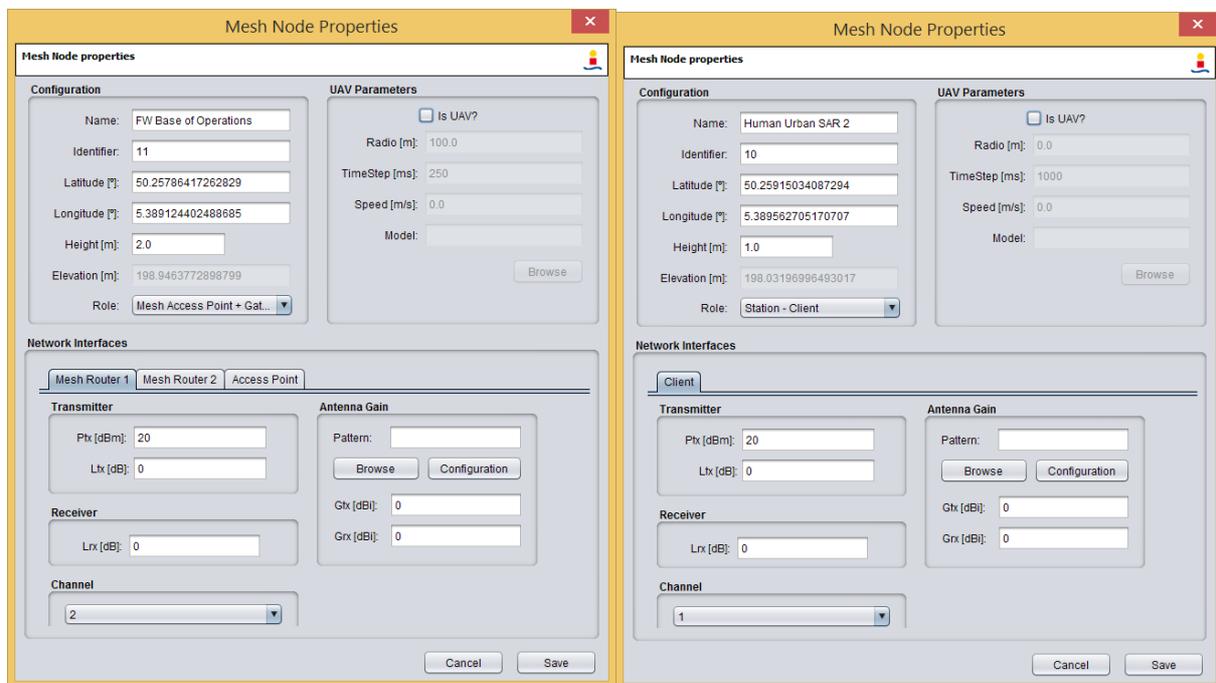


Ilustración 23: Detalle de interfaces de un nodo mesh

5.3.2 Adición de áreas de escombros al escenario

Como ya se definió en la sección 3, el enlace de comunicaciones entre dos nodos se puede ver afectado en el modelo de propagación de rayo directo a su paso por zonas derruidas. El simulador permite añadir este tipo de áreas y configurar los distintos parámetros que afectan a las pérdidas de propagación.

Para añadir un área de escombros en el escenario, simplemente hacemos click derecho sobre la red mesh en el árbol de objetos.

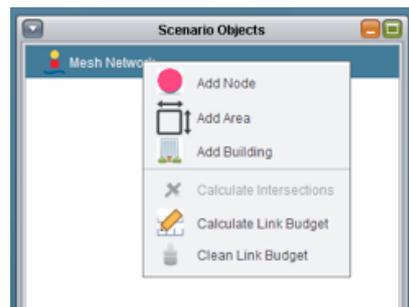


Ilustración 24: Detalle de menú contextual para la adición de áreas de escombros

Si hacemos click sobre “Add Area”, nos aparecerá el siguiente cuadro de diálogo, que permitirá definir las características del área:

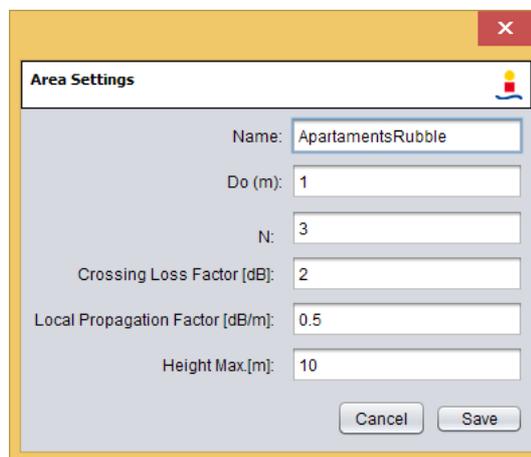


Ilustración 25: Propiedades de un área de escombros

Las características del área son:

- **Name:** Nombre del área
- **Do:** Distancia de referencia necesaria para las pérdidas de propagación, definida en la sección 3.
- **N:** Exponente de pérdida de propagación, definido en la sección 3.
- **Crossing Loss Factor:** Factor de pérdida adicional simplemente por cruzar el área de escombros, expresado en dB.
- **Local Propagation Factor:** Factor de pérdida de propagación en enlaces o trozos de enlace interiores, expresado en dB por metros (dB/m) de enlace interior.
- **Height Max:** Altura máxima de toda el área de escombros. Esto permite descartar las pérdidas provocadas por el área en el caso en que los dos nodos estén por encima de esa determinada altura máxima.

Una vez definidas las propiedades, el usuario puede dibujar directamente sobre el globo para definir el área

que formará parte de la simulación.

5.3.3 Adición de edificios al escenario

De manera similar a lo que ocurre con las áreas de escombros, el enlace de comunicaciones entre dos nodos se puede ver afectado en el modelo de propagación de rayo directo a su paso por edificios. El simulador permite añadir edificios y configurar los distintos parámetros que afectan a las pérdidas de propagación.

Para añadir un edificio en el escenario, simplemente hacemos click derecho sobre la red mesh en el árbol de objetos.

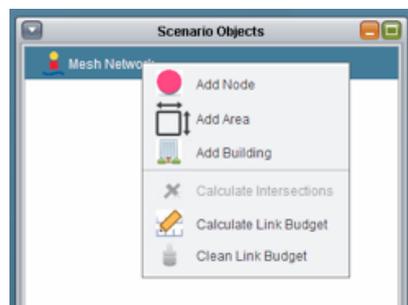


Ilustración 26: Detalle de menú contextual para la adición de edificios

Si hacemos click sobre "Add Building", nos aparecerá el siguiente cuadro de diálogo, que permitirá definir las características del área:

A screenshot of a dialog box titled "Building Settings". It contains several input fields for configuring a building's properties. The fields and their values are: "Name" (School Building), "Height [m]" (9.817205357047323), "Lat [°]" (50.25913619982616), "Lon [°]" (5.389615320007984), "Do [m]" (1), "N" (3), "Incidence Factor [dB]" (1), and "Local Propa. Factor (dB/m)" (0.5). At the bottom right, there are "Cancel" and "Save" buttons.

Ilustración 27: Propiedades de un edificio

Las características del edificio son:

- **Name:** Nombre del edificio
- **Height:** Altura del edificio en metros
- **Lat:** Coordenadas de latitud decimal del centro del edificio en grados Norte ($^{\circ}$ N).
- **Lon:** Coordenadas de longitud decimal del centro del edificio en grados Este ($^{\circ}$ E).
- **Do:** Distancia de referencia necesaria para las pérdidas de propagación, definida en la sección 3.
- **N:** Exponente de pérdida de propagación, definido en la sección 3.
- **Incidence Factor:** Factor de pérdida adicional simplemente por cada cruce del enlace con una pared del edificio, expresado en dB.
- **Local Propagation Factor:** Factor de pérdida de propagación en enlaces o trozos de enlace interiores, expresado en dB por metros de enlace interior.

Una vez definidas las propiedades, el usuario puede trabajar directamente sobre el globo para definir modificar los aspectos físicos del edificio (ajustar altura y dimensiones, posición, etc.).

5.3.4 Propiedades de la Red Mesh

Las propiedades de la red mesh se puede configurar directamente desde el simulador, así como otros parámetros específicos de los cálculos de balance de enlace.

Para acceder a ellos, simplemente se ha de hacer doble click sobre el objeto "Mesh Network" del árbol de objetos.

Una vez hecho, aparecerá la siguiente ventana de propiedades:

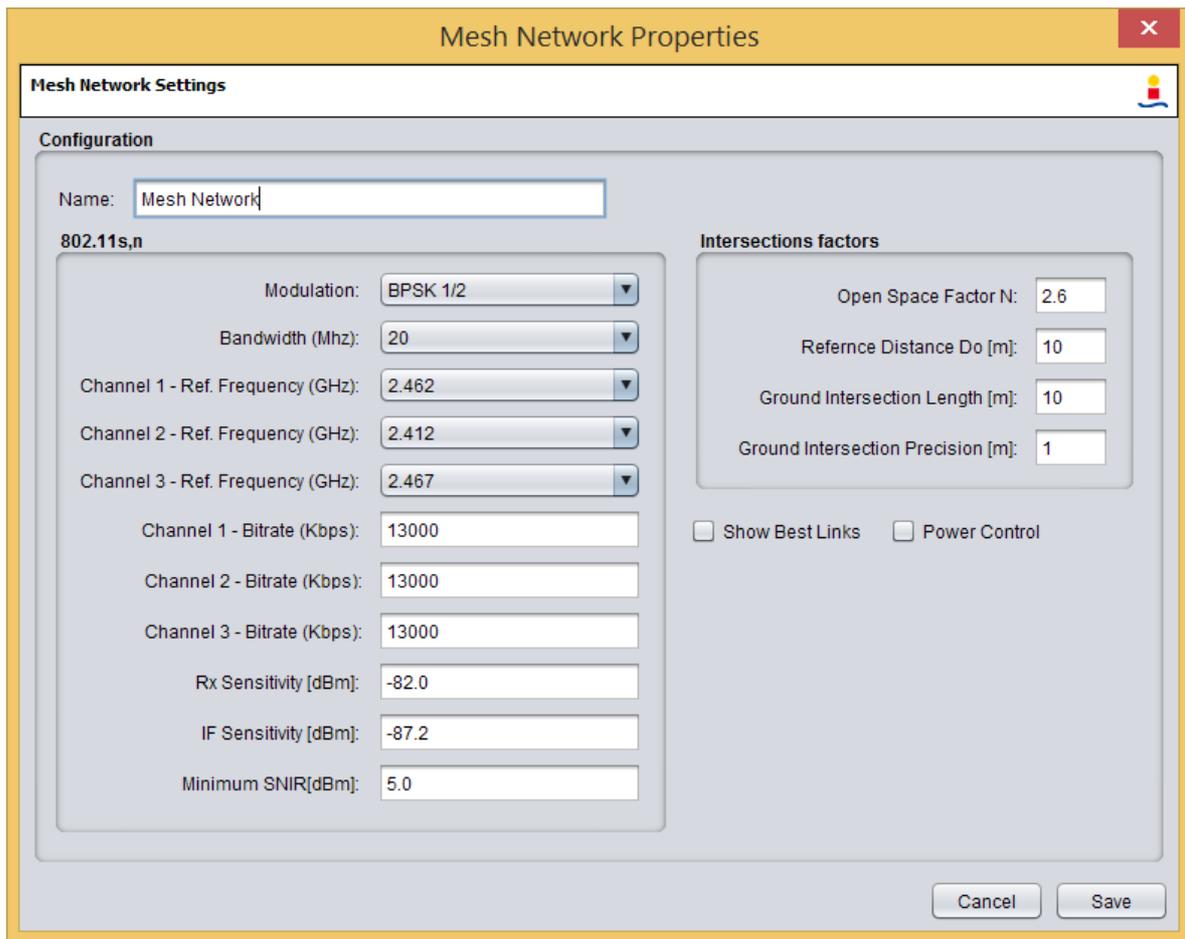


Ilustración 28: Cuadro de diálogo de la red mesh

En la ventana de propiedades se observan varias secciones:

- **“802.11s,n”**, permite definir los parámetros específicos de la red mesh. Para el simulador, y dado que se ha creado primeramente con un escenario en mente, se han definido previamente 3 canales de comunicaciones. Los distintos parámetros configurables son:
 - *Modulation*: Esquema de modulación y codificación a usar en las comunicaciones. Los distintos esquemas posibles son los definidos en la sección 2.
 - *Bandwidth*: Ancho de banda del canal, expresado en MHz, que define el modo de canal, ya sea de 20 MHz o 40 MHz.
 - *Channel 1 – Ref. Frequency*: Frecuencia de referencia del canal 1, expresada en GHz.
 - *Channel 2 – Ref. Frequency*: Frecuencia de referencia del canal 2, expresada en GHz.
 - *Channel 3 – Ref. Frequency*: Frecuencia de referencia del canal 3, expresada en GHz.
 - *Channel 1 – Bitrate*: Tasa de datos disponible en el canal 1. La tasa de datos se calcula inicialmente de forma automática al especificar el esquema de modulación y codificación y el ancho de banda del canal.

- *Channel 2 – Bitrate*: Tasa de datos disponible en el canal 2. La tasa de datos se calcula inicialmente de forma automática al especificar el esquema de modulación y codificación y el ancho de banda del canal.
- *Channel 3 – Bitrate*: Tasa de datos disponible en el canal 3. La tasa de datos se calcula inicialmente de forma automática al especificar el esquema de modulación y codificación y el ancho de banda del canal.
- *Rx Sensitivity*: Sensitividad de recepción, expresada en dBm.
- *IF Sensitivity*: Sensitividad relativa a interferencias, expresada en dBm
- *Minimum SNIR*: SNIR mínima definida para la calidad de las comunicaciones. (Signal-to-noise-plus-interference Ratio).

Los parámetros de sensitividad dependen directamente del esquema de modulación usado, y se basa en la siguiente figura:

| MCS RATE INDEX | DATA STREAMS | MODULATION / ECC | DATA RATE (MBPS) | | | | RECEIVE SENSITIVITY (DBM) | |
|----------------|--------------|------------------|------------------|--------|----------|--------|---------------------------|--------|
| | | | 800NS GI | | 400NS GI | | 20 MHZ | 40 MHZ |
| | | | 20 MHZ | 40 MHZ | 20 MHZ | 40 MHZ | | |
| 0 | 1 | BPSK / 1:2 | 6.5 | 13.5 | 7.2 | 15.0 | -82 | -79 |
| 1 | 1 | QPSK / 1:2 | 13.0 | 27.0 | 14.4 | 30.0 | -79 | -76 |
| 2 | 1 | QPSK / 3:4 | 19.5 | 40.5 | 21.7 | 45.0 | -77 | -74 |
| 3 | 1 | 16-QAM / 1:2 | 26.0 | 54.0 | 28.9 | 60.0 | -74 | -71 |
| 4 | 1 | 16-QAM / 3:4 | 39.0 | 81.0 | 43.3 | 90.0 | -70 | -67 |
| 5 | 1 | 64-QAM / 2:3 | 52.0 | 108.0 | 57.8 | 120.0 | -66 | -63 |
| 6 | 1 | 64-QAM / 3:4 | 58.5 | 121.5 | 65.0 | 135.0 | -65 | -62 |
| 7 | 1 | 64-QAM / 5:6 | 65.0 | 135.0 | 72.2 | 150.0 | -64 | -61 |
| 8 | 2 | BPSK / 1:2 | 13.0 | 27.0 | 14.4 | 30.0 | -82 | -79 |
| 9 | 2 | QPSK / 1:2 | 26.0 | 54.0 | 28.9 | 60.0 | -79 | -76 |
| 10 | 2 | QPSK / 3:4 | 39.0 | 81.0 | 43.3 | 90.0 | -77 | -74 |
| 11 | 2 | 16-QAM / 1:2 | 52.0 | 108.0 | 57.8 | 120.0 | -74 | -71 |
| 12 | 2 | 16-QAM / 3:4 | 78.0 | 162.0 | 86.7 | 180.0 | -70 | -67 |
| 13 | 2 | 64-QAM / 2:3 | 104.0 | 216.0 | 115.6 | 240.0 | -66 | -63 |
| 14 | 2 | 64-QAM / 3:4 | 117.0 | 243.0 | 130.0 | 270.0 | -65 | -62 |
| 15 | 2 | 64-QAM / 5:6 | 130.0 | 270.0 | 144.4 | 300.0 | -64 | -61 |
| 16 | 3 | BPSK / 1:2 | 19.5 | 40.5 | 21.7 | 45.0 | -82 | -79 |
| 17 | 3 | QPSK / 1:2 | 39.0 | 81.0 | 43.3 | 90.0 | -79 | -76 |
| 18 | 3 | QPSK / 3:4 | 58.5 | 121.5 | 65.0 | 135.0 | -77 | -74 |
| 19 | 3 | 16-QAM / 1:2 | 78.0 | 162.0 | 86.7 | 180.0 | -74 | -71 |
| 20 | 3 | 16-QAM / 3:4 | 117.0 | 243.0 | 130.7 | 270.0 | -70 | -67 |
| 21 | 3 | 64-QAM / 2:3 | 156.0 | 324.0 | 173.3 | 360.0 | -66 | -63 |
| 22 | 3 | 64-QAM / 3:4 | 175.5 | 364.5 | 195.0 | 405.0 | -65 | -62 |
| 23 | 3 | 64-QAM / 5:6 | 195.0 | 405.0 | 216.7 | 450.0 | -64 | -61 |

Ilustración 29: Sensitividad en recepción según el esquema de modulación

- **Intersection Factors**: Permite definir parámetros comunes a todos los enlaces de comunicaciones, siempre y cuando, no se sustituyan en los objetos del escenario específicamente:
 - *Open Space Factor N*: Exponente de pérdida de propagación en espacio abierto, definido en la sección 3.

- *Do*: Distancia de referencia necesaria para las pérdidas de propagación, definida en la sección 3.
- *Ground Intersection Length*: Permite definir el intervalo de medida para la detección de colisiones con el terreno, en metros. Esta propiedad se explicará más adelante.
- *Ground Intersection Precision*: Permite definir la precisión en el proceso de medida de detección de colisiones con el terreno, en metros. Esta propiedad se explicará más adelante.
- **Show Best Links**: Caja de control que permite activar o desactivar la visualización de todos los enlaces posibles o solo los mejores. Si no se marca, se mostrarán sobre el globo todos los posibles enlaces, con independencia del tipo de nodo.
- **Power control**: Caja de control para activar o desactivar el control de potencia en las simulaciones. Cuando se activa, la potencia del transmisor se ajusta a la potencia que es capaz de recibir el receptor, para evitar emitir mayor potencia de la necesaria. Actualmente, esta característica no se usa en el simulador.

5.6. Generación del escenario del Storyboard

Una vez repasadas las distintas propiedades de configuración del escenario en el simulador, para demostrar las capacidades de cálculo del mismo se plantea el escenario descrito en el storyboard anterior.

A continuación se muestra una captura del escenario planteado en el simulador.

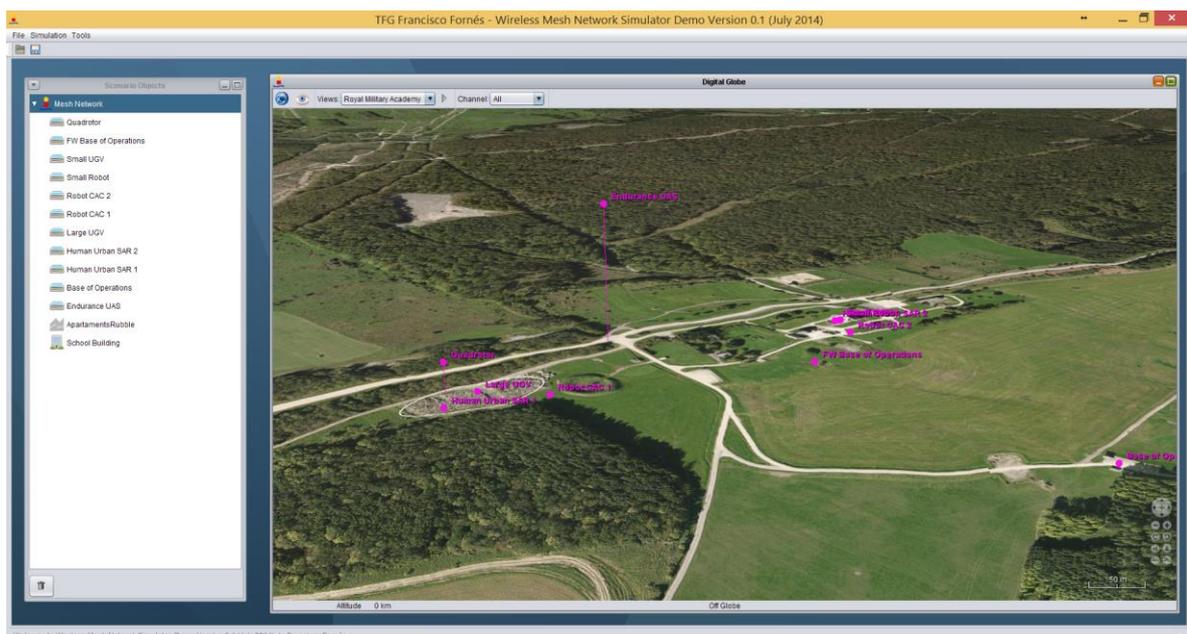


Ilustración 30: Escenario del Storyboard desplegado en el simulador

Se observa que se han añadido 8 nodos mesh, repartidos en dos sectores diferentes, más el nodo Endurance

UAS, que actuará en ambos sectores, además de la base de operaciones (BoO) y la de avance (Forward BoO). En el sector S1 se ha definido un área de escombros, y los nodos desplazados allí son el AROT, LUGV, RC2 1 y el Human USAR 1.

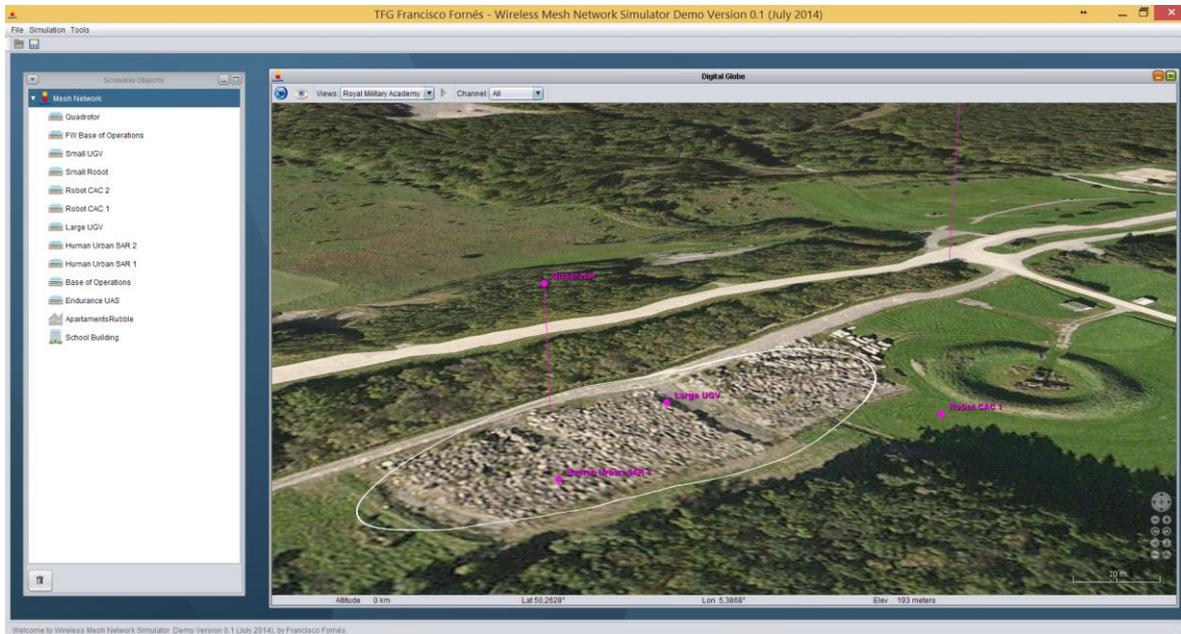


Ilustración 31: Detalle del sector S1 en el simulador

En el sector S2 se ha definido el edificio del colegio derruido, y los nodos desplazados allí son el SROT, el SUGV, el RC2 2 y el Human SAR 2.

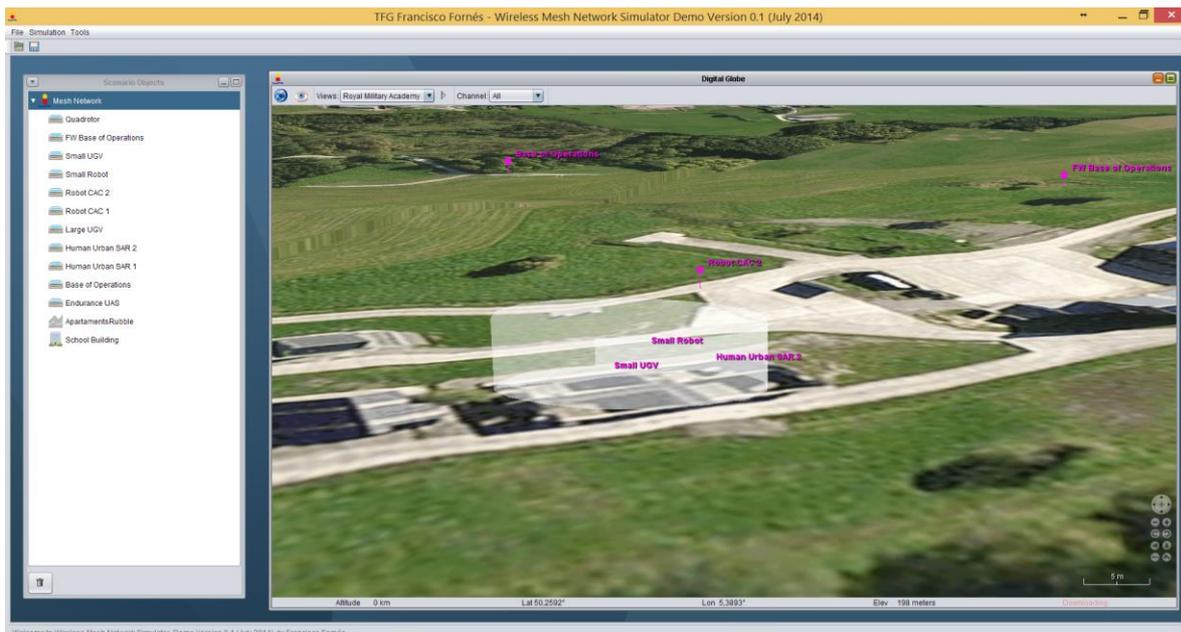


Ilustración 32: Detalle del sector S2 en el simulador

Con el escenario configurado, el simulador es capaz de dibujar los distintos enlaces entre los nodos sin llegar a realizar el balance de enlace, detectando las posibles colisiones con el terreno, siempre y cuando, no se haya marcado la opción de Show Best Links, en cuyo caso, solo se dibujarán los enlaces tras hacer el estudio de balance de enlace.

A continuación se muestra una captura del escenario establecido con todos los enlaces posibles:

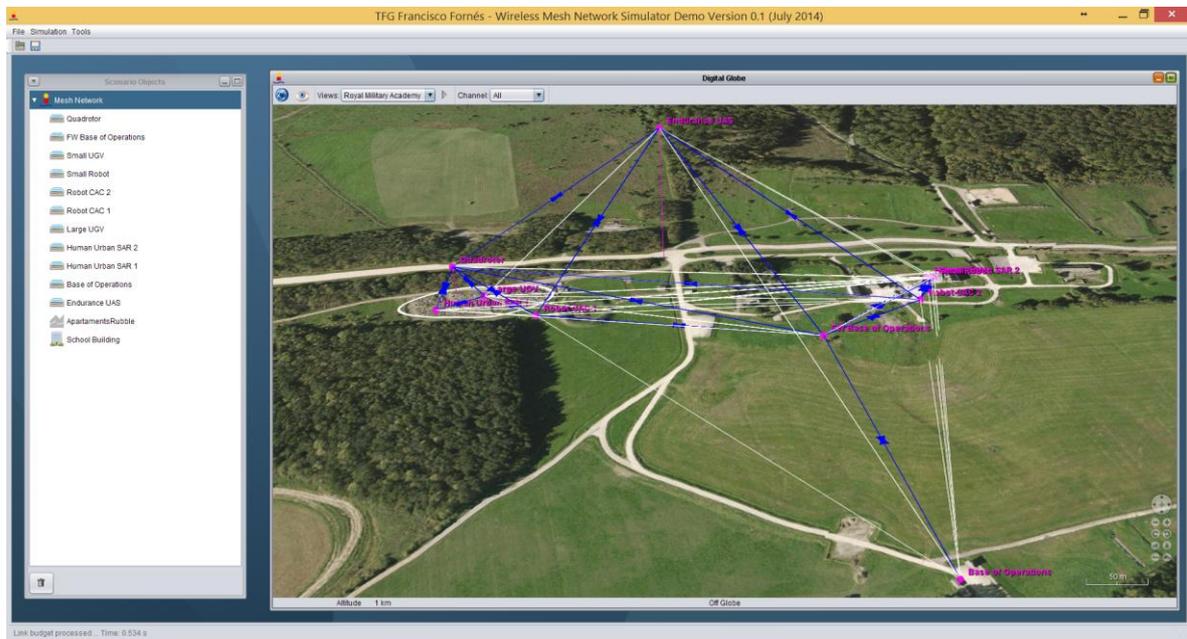


Ilustración 33: Representación de todos los enlaces posibles entre los nodos

Los enlaces representados en azul son enlaces potencialmente buenos, mientras que los representados en blanco son enlaces que intersectan con el terreno, y que no se tendrán en cuenta en la realización de los cálculos.

5.7. Cálculo del balance de enlace desde el Simulador

Uno de los objetivos del simulador es el cálculo del balance de enlace de todos los posibles enlaces entre los nodos. Una vez desplegado el escenario, si se desea realizar el estudio de los balances de enlaces, simplemente se debe hacer click derecho en la red mesh desde el árbol de objetos, y seleccionar la opción "Calculate Link Budget".

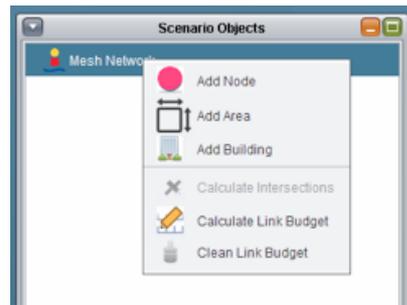


Ilustración 34: Detalle de menú contextual para el cálculo del balance de enlace (Link Budget)

Una vez el simulador termina de realizar el balance de enlace, se muestran automáticamente los enlaces coloreados sobre el escenario.

Cada canal de comunicaciones tiene un color asociado para favorecer la visualización sobre el mapa. Los enlaces coloreados en verde son aquellos en los que se utilizan más de un canal.

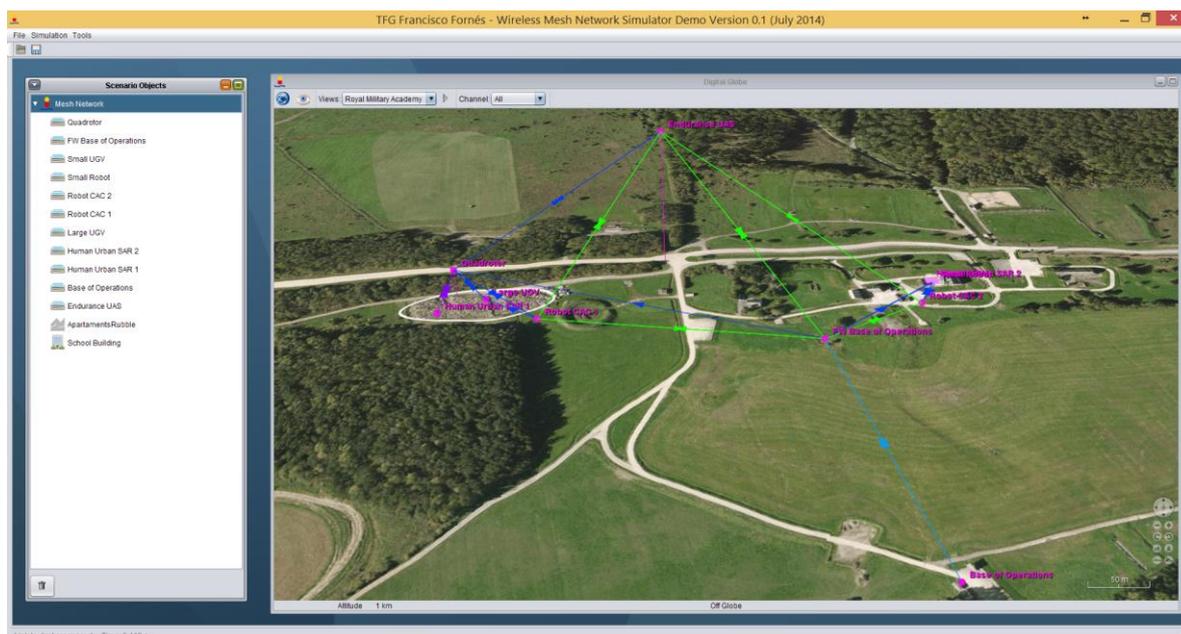


Ilustración 35: Vista del simulador tras el cálculo del balance de enlace.

La importancia del estudio de balance de enlace es que los enlaces mostrados ahora si tienen en cuenta la potencia transmitida y recibida por parte de los nodos, así como todas las posibles intersecciones, asegurando por tanto que la comunicación puede ser fructífera.

Una particularidad del simulador es que permite al usuario cambiar de posición cualquier nodo en cualquier momento, arrastrándolo sobre el mapa. Una vez trasladado el nodo a su nueva posición, todos los balances de enlace en los que interviene ese nodo son recalculados y los enlaces repintados.

Lo mismo ocurre cuando ponemos en movimiento cualquiera de los nodos, los enlaces se recalculan en cada

nueva posición.



Ilustración 36: Detalle del sector S1 tras el cálculo del balance de enlace

Si se desean conocer los detalles del estudio de balance de enlace, el simulador es capaz de mostrar un log con todos los cálculos realizados. Para ello, podemos pulsar en la barra de menú en "Simulation" y luego en "Link-Budget Information".

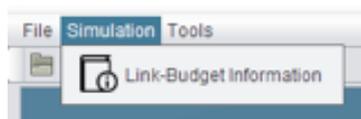


Ilustración 37: Detalle de la barra de herramientas para mostrar la información obtenida en la realización del cálculo del balance de enlace

Esta opción mostrará la ventana de información del balance de enlace, permitiendo consultar los datos relativos a los cálculos del balance de enlace pudiendo filtrar por nodo transmisor. También se ofrece la posibilidad de generar un fichero de log para su análisis posterior.

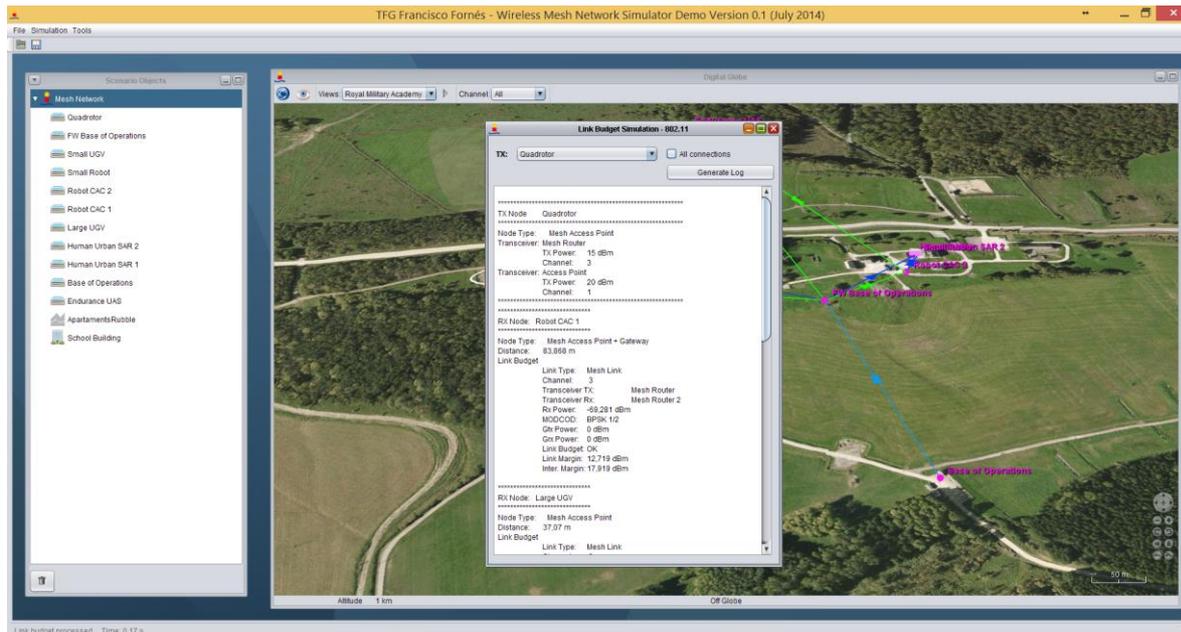


Ilustración 38: Ventana de información de resultados del balance de enlace

A continuación, y como ejemplo, se muestran los datos relativos al cálculo del balance de enlace de aquellos enlaces en los que el nodo Endurance UAS actúa de transmisor:

```

*****
TX Node   Endurance UAS
*****
Node Type: Mesh Gateway
Transceiver: Mesh Router 1
           TX Power: 19 dBm
           Channel: 2
Transceiver: Mesh Router 2
           TX Power: 20 dBm
           Channel: 3
*****
RX Node:  AROT
*****
Node Type: Mesh Access Point
Distance: 212,669 m
Link Budget
           Link Type: Mesh Link
           Channel: 3
           Transceiver TX: Mesh Router 2
           Transceiver Rx: Mesh Router
           Rx Power: -74,788 dBm
           MODCOD: BPSK 1/2
           Gtx Power: 0 dBm
           Grx Power: 0 dBm
           Link Budget: OK
           Link Margin: 7,212 dBm
           Inter. Margin: 12,412 dBm
*****
RX Node:  FW Base of Operations
*****
Node Type: Mesh Access Point + Gateway
Distance: 229,337 m
Link Budget
           Link Type: Mesh Link
           Channel: 2

```

Transceiver TX: Mesh Router 1
 Transceiver Rx: Mesh Router 1
 Rx Power: -76,551 dBm
 MODCOD: BPSK 1/2
 Gtx Power: 0 dBm
 Grx Power: 0 dBm
 Link Budget: OK
 Link Margin: 5,449 dBm
 Inter. Margin: 10,649 dBm

 RX Node: FW Base of Operations

Node Type: Mesh Access Point + Gateway
 Distance: 229,337 m
 Link Budget

Link Type: Mesh Link
 Channel: 3
 Transceiver TX: Mesh Router 2
 Transceiver Rx: Mesh Router 2
 Rx Power: -75,64 dBm
 MODCOD: BPSK 1/2
 Gtx Power: 0 dBm
 Grx Power: 0 dBm
 Link Budget: OK
 Link Margin: 6,36 dBm
 Inter. Margin: 11,56 dBm

 RX Node: RC2 2

Node Type: Mesh Access Point + Gateway
 Distance: 272,866 m
 Link Budget

Link Type: Mesh Link
 Channel: 2
 Transceiver TX: Mesh Router 1
 Transceiver Rx: Mesh Router 2
 Rx Power: -78,514 dBm
 MODCOD: BPSK 1/2
 Gtx Power: 0 dBm
 Grx Power: 0 dBm
 Link Budget: OK
 Link Margin: 3,486 dBm
 Inter. Margin: 8,686 dBm

 RX Node: RC2 2

Node Type: Mesh Access Point + Gateway
 Distance: 272,866 m
 Link Budget

Link Type: Mesh Link
 Channel: 3
 Transceiver TX: Mesh Router 2
 Transceiver Rx: Mesh Router 1
 Rx Power: -77,602 dBm
 MODCOD: BPSK 1/2
 Gtx Power: 0 dBm
 Grx Power: 0 dBm
 Link Budget: OK
 Link Margin: 4,398 dBm
 Inter. Margin: 9,598 dBm

 RX Node: RC2 1

Node Type: Mesh Access Point + Gateway
 Distance: 193,75 m
 Link Budget

```

Link Type: Mesh Link
Channel: 2
Transceiver TX: Mesh Router 1
Transceiver Rx: Mesh Router 1
Rx Power: -74,647 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 7,353 dBm
Inter. Margin:12,553 dBm

*****
RX Node: RC2 1
*****
Node Type: Mesh Access Point + Gateway
Distance: 193,75 m
Link Budget
Link Type: Mesh Link
Channel: 3
Transceiver TX: Mesh Router 2
Transceiver Rx: Mesh Router 2
Rx Power: -73,736 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 8,264 dBm
Inter. Margin:13,464 dBm

*****
Rx AZI Range: 141,371°
Rx ELE Range: 14,744°
*****

```

Tabla 6: Resultados del balance de enlace para el ENDUR UAS actuando de transmisor

5.8. Cálculo de contiendas desde el Simulador

Otro de los objetivos del simulador es el cálculo del grafo de contiendas en los distintos enlaces de comunicaciones del escenario. Los grafos de contiendas se definen minuciosamente en la sección 4.

Podemos acceder a esta utilidad desde la barra de herramientas del simulador, haciendo click en “Tools” y a continuación en “Contention Graph”.

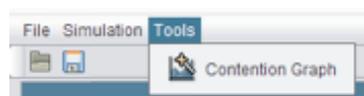


Ilustración 39: Detalle de la barra de herramientas para lanzar la herramienta de detección de contiendas

Esta opción mostrará la ventana de grafos de red, en la que dispondremos de tres grafos distintos:

- **Grafo de conectividad:** Permite obtener de una forma visual la topología completa de la red, de la misma forma que se observa en el globo. Mediante las opciones del grafo, podemos filtrar por canales, o por dirección de los enlaces, es decir, unidireccionales o bidireccionales.

Este grafo se genera automáticamente al abrir la ventana a partir de la información extraída del cálculo del balance de enlace.

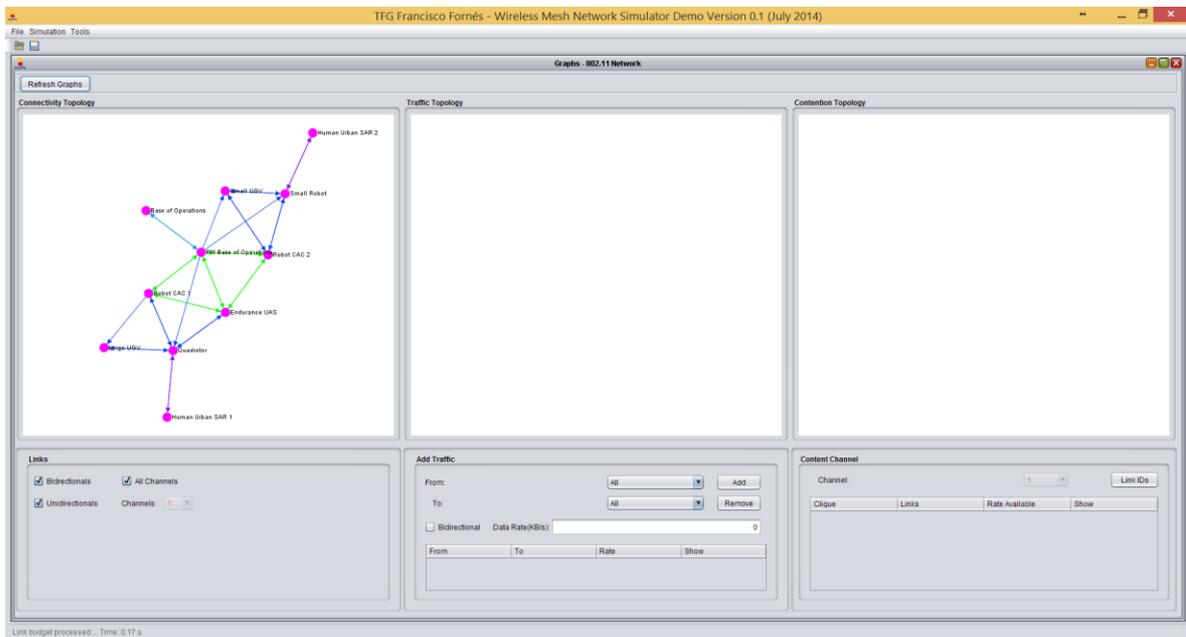


Ilustración 40: Ventana de grafos, detallando el grafo de conectividad

- **Grafo de Tráfico.** Este grafo muestra, de una manera similar al de conectividad, los diferentes flujos de tráfico generados en los enlaces. Estos flujos de tráfico se generan directamente desde las opciones del grafo de tráfico. Para añadir un tráfico, lo único que hay que establecer es el nodo origen y el destino, y el simulador se encarga de encontrar el mejor camino entre ellos, según lo descrito en la sección 2.

Con la intención de ir observando la capacidad del canal, es posible asignar una tasa de datos al tráfico añadido. Esto será de especial utilidad para el último gráfico, el de contienda.

Existe la posibilidad de añadir tráfico de tipo “Todos con todos”. De esta forma, la tasa de datos será ignorada, puesto que el simulador supone que se va a consumir toda la capacidad disponible, y reparte la capacidad por igual.

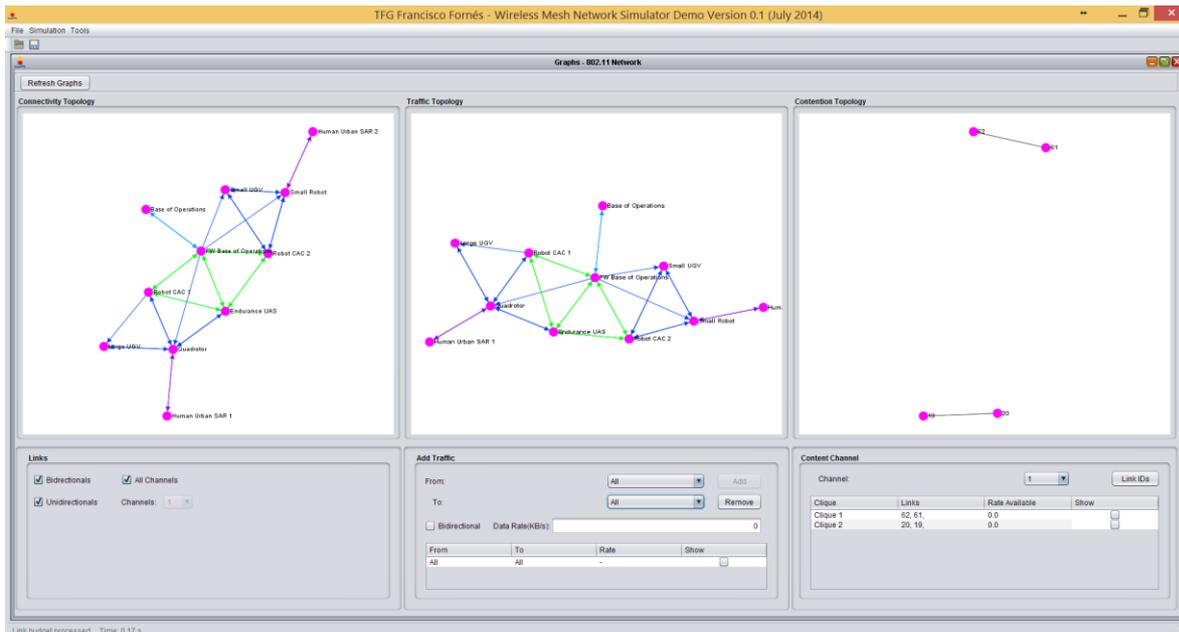


Ilustración 41: Ventana de grafos, detallando el grafo de tráfico, con tráfico generado “Todos con todos”

- **Grafo de contienda.** Representa la utilidad final de esta ventana: la contienda en los enlaces. Para cada canal, el simulador asigna un identificador de enlace con tráfico (link id). Según la información obtenida del grafo de tráfico, el simulador analiza las contienda y calcula los cliques máximos en cada canal.

Al igual que se describió en la sección 4, cada punto en el grafo representa un enlace de comunicaciones. Si dos enlaces (puntos) están unidos a través de una arista, existe una contienda entre esos dos enlaces y no podrán transmitir a la vez en un sistema real.

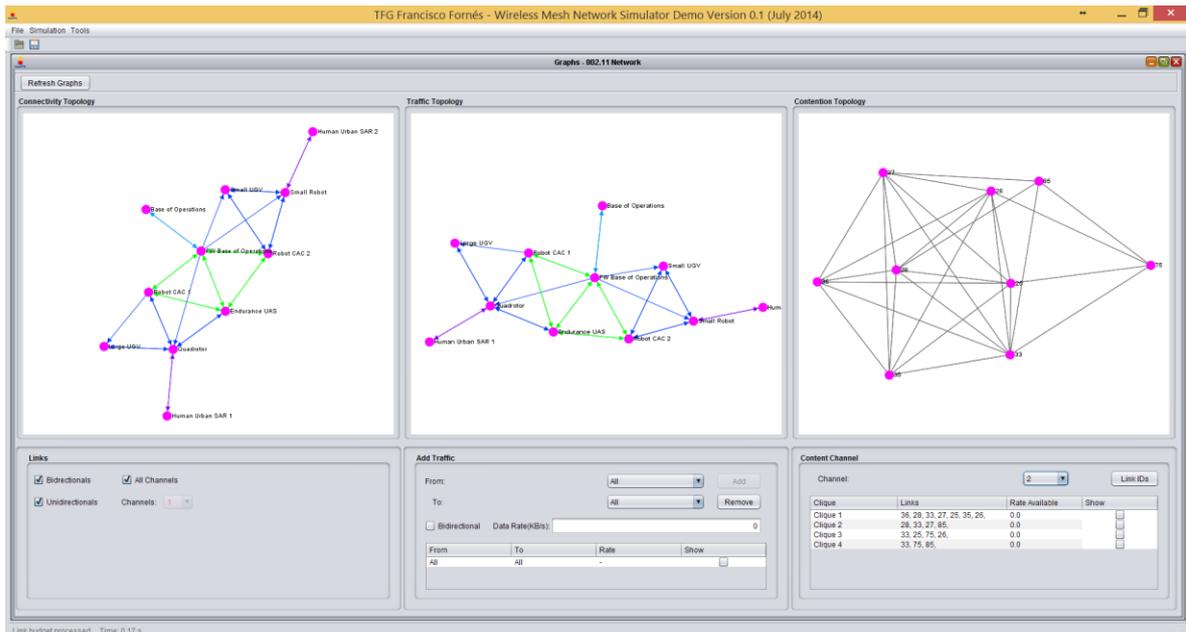


Ilustración 42: Ventana de grafos, detallando el grafo de contendias, mostrando las contendias y los cliques detectados en el canal 2

La agrupación en cliques de los enlaces, permite distribuir la red de forma que los enlaces en los distintos cliques máximos sí que podrían transmitir simultáneamente. Obviamente, el objetivo consistirá en ir modificando la red (cambiando los roles de los nodos y los canales en los que operan) para conseguir el mayor número de cliques máximos posible, dado que permitiría un mejor aprovechamiento de la capacidad del canal.

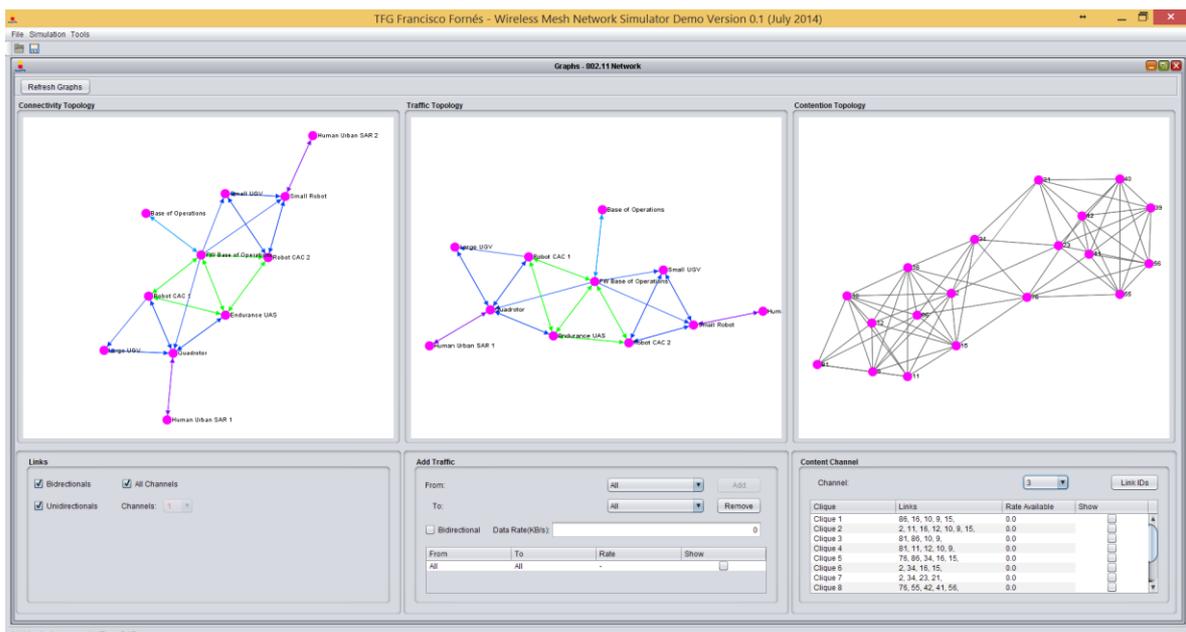


Ilustración 43: Ventana de grafos, detallando el grafo de contendias, mostrando las contendias y los cliques detectados en el canal 3

Para ayudar a la identificación de los nodos que forman los distintos cliques (enlaces realmente), el simulador resalta en verde en el grafo los cliques máximos seleccionados por el usuario, tal y como se muestra en la siguiente figura:

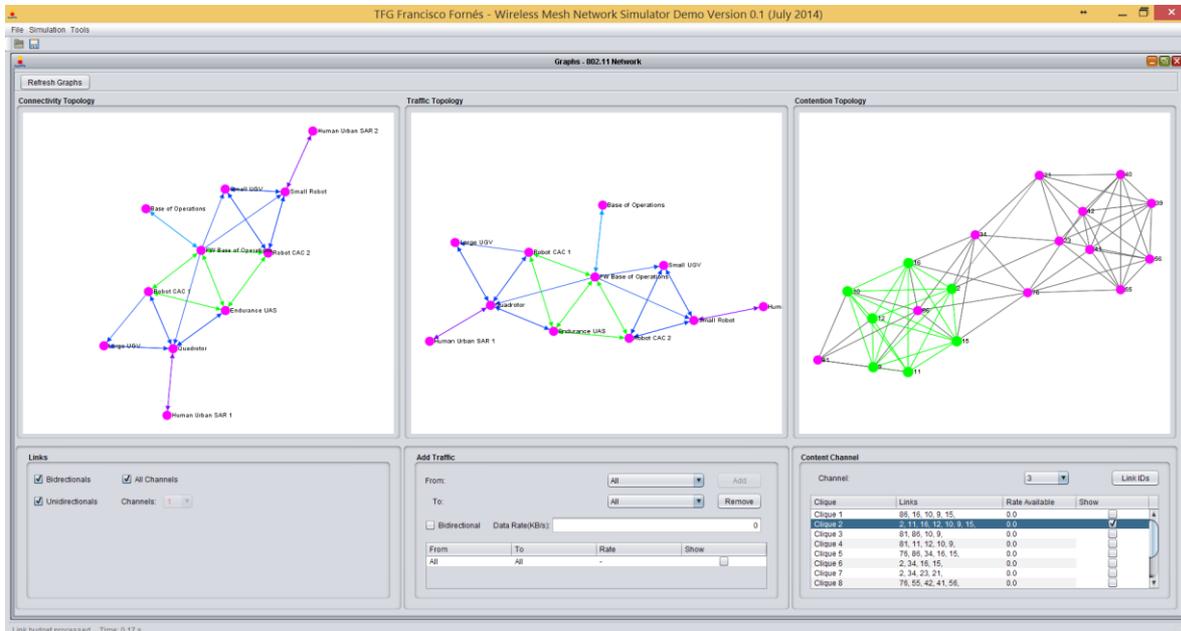


Ilustración 44: Ventana de grafos, detallando el grafo de contienda, mostrando las contienda y los cliques detectados en el canal 3, destacando uno de los cliques máximos para su identificación

Dado que la información que se muestra en el grafo de contienda es el identificador de los enlaces, el simulador ofrece una ayuda para conocer cuáles son los nodos que intervienen en ese enlace, y en qué orden. Para acceder a esta ventana informativa se debe pulsar el botón "Link IDs" en las opciones del grafo de contienda. De esta forma, aparecerá una ventana como la siguiente:

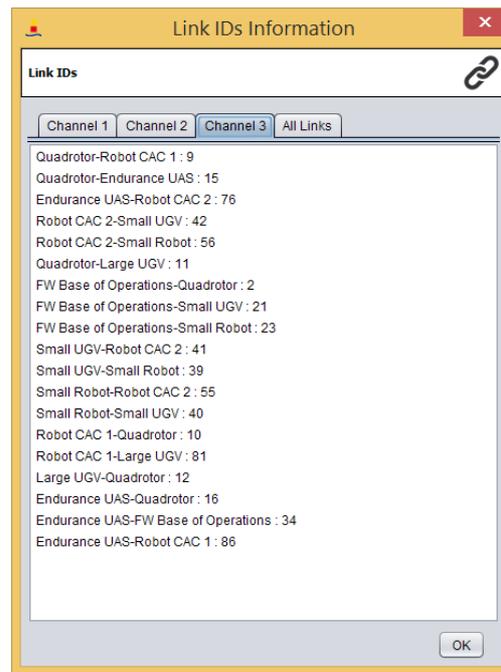


Ilustración 45: Ventana de diálogo con información relativa a los identificadores de los enlaces

Desde esta ventana se puede consultar fácilmente los nodos que intervienen en las contiendas.

Hay que destacar que el simulador va calculando automáticamente la capacidad disponible después de añadir cada flujo de tráfico.

Por ejemplo, en la siguiente figura se observa cómo se añade un flujo de tráfico desde el LUGV hacia el Endurance UAS con una tasa media de 1000 Kbps. El simulador detecta que ese flujo de tráfico trabajará sobre el canal 3, por lo que muestra al usuario que la capacidad disponible tras ese tráfico en el canal 3 es de 12000 Kbps, dado que de momento es el único tráfico circulando por la red.

En caso de contienda, el simulador reparte el tráfico disponible entre los enlaces en disputa, asignando la mitad a cada uno. Obviamente, como no pueden transmitir simultáneamente, cada uno de los enlaces transmitirá a la máxima velocidad disponible en ese momento, pero después tendrá que esperar nuevamente su turno. De esta forma, la tasa media de datos al final de cada enlace será la sugerida por el simulador.

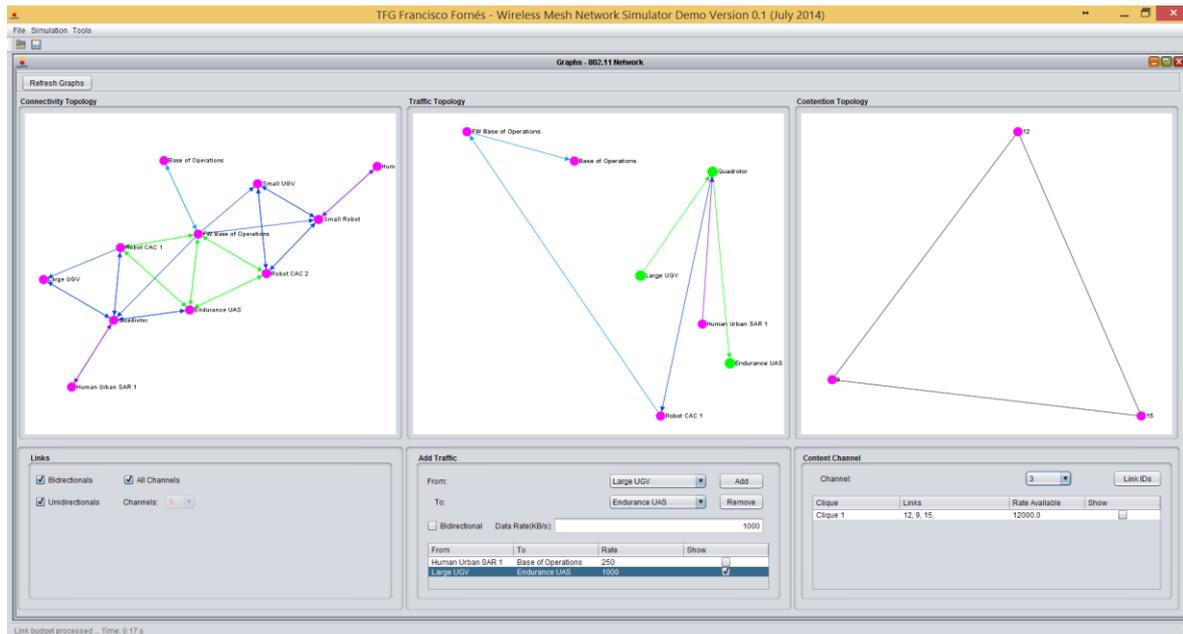


Ilustración 46: Ventana de grafos, detallando el grafo de tráfico y contiendas, mostrando la generación de tráfico de 1000 Kbps y la contienda generada

6 DETALLES DE IMPLEMENTACIÓN

“Una buena ingeniería de software requiere la diferenciación entre la especificación y la implementación.”

Andrew S. Tanenbaum

6.1. Globo digital 3D

El globo digital 3D se ha construido como un módulo a partir de una librería para ser usado desde la aplicación Java/SWING. Está basado y hace uso de la librería para Java WorldWind. World Wind es una librería que actúa como un globo terráqueo virtual, o globo virtual desarrollado por la NASA. Superpone imágenes de satélites de la NASA y fotografías aéreas del United States Geological Survey (USGS) sobre modelos tridimensionales de la Tierra. El usuario puede interactuar con el planeta seleccionado rotándolo y ampliando zonas. Además se pueden superponer topónimos y fronteras, entre otros datos, a las imágenes.

El programa también contiene un módulo para visualizar imágenes de otras fuentes en Internet que usen el protocolo del Open Geospatial Consortium Web Map Service. Adicionalmente existen multitudes de ampliaciones para World Wind que aumentan su funcionalidad, como por ejemplo, poder medir distancias u obtener datos de posición desde un GPS.

Con la instalación del programa se incluyen las imágenes de baja resolución Blue Marble del sensor MODIS, según se amplían zonas determinadas se descargan imágenes de alta resolución provenientes del satélite LandSat 7 o del USGS. El conjunto total de las imágenes ocupa alrededor de 4,6 terabytes, y tienen una resolución típica de 15 m/píxel para todo el mundo (satélite LandSat 7) y entre 1 y 0,25 m/píxel para los Estados Unidos (imágenes aéreas del USGS). Además se pueden mostrar varios conjuntos de imágenes animadas, entre ellas las provenientes de los sensores MODIS y GLOBE.

También es posible descargar en el programa otros astros, que al igual que la Tierra, pueden verse en fotografías en su práctica totalidad, pero con menor resolución. Entre los astros que se pueden descargar se encuentran la Luna, Marte, Venus, Júpiter y sus cuatro satélites principales Io, Europa, Ganímedes y Calisto.

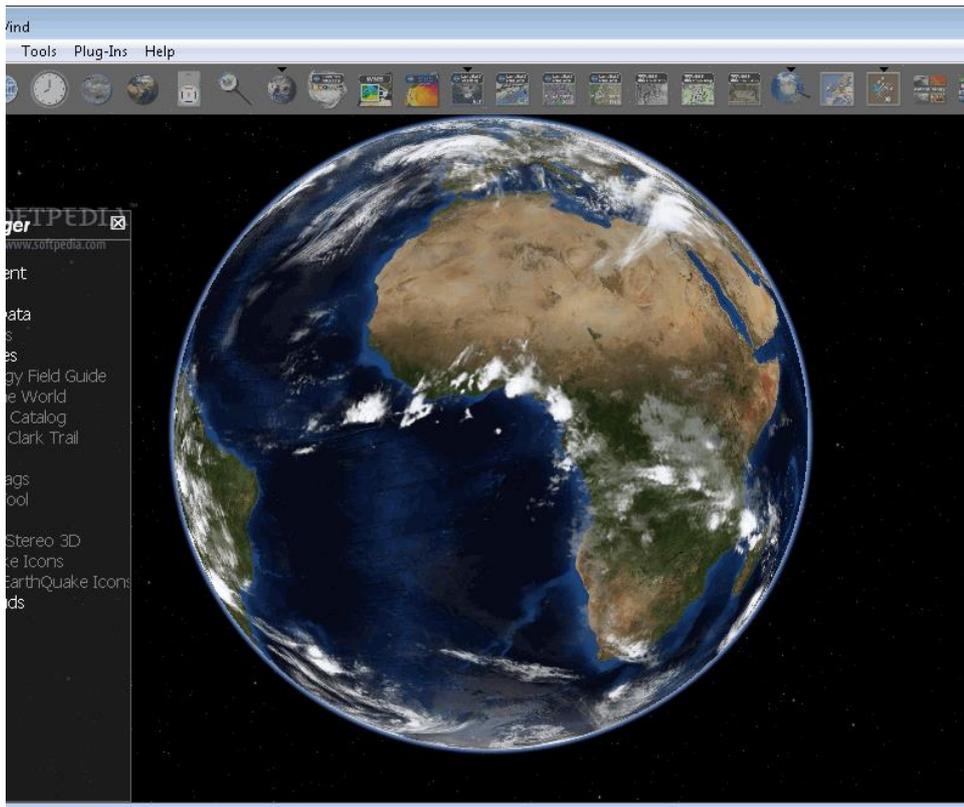


Ilustración 47: Ventana principal del programa WorldWind, distribuido junto con el SDK WorldWind

6.2. Bases de datos externas

La herramienta de simulación permite la importación e interpretación de ficheros Shapefile de forma que puedan ser visualizados en el globo digital.

El formato ESRI Shapefile (SHP) es un formato de archivo propietario de datos espaciales desarrollado por la compañía ESRI, quien crea y comercializa software para Sistemas de Información Geográfica como Arc/Info o ArcGIS. Originalmente se creó para la utilización con su producto ArcView GIS, pero actualmente se ha convertido en formato estándar de facto para el intercambio de información geográfica entre Sistemas de Información Geográfica.

Un Shapefile es un formato vectorial de almacenamiento digital donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos.

6.3. Detección de intersecciones con el terreno

En el simulador, se hacía necesario detectar cuándo un enlace intersectaba con la superficie de la tierra (para catalogar el enlace como LOS o NLOS). La API de Worldwind utilizada permite resolver este tipo de intersecciones.

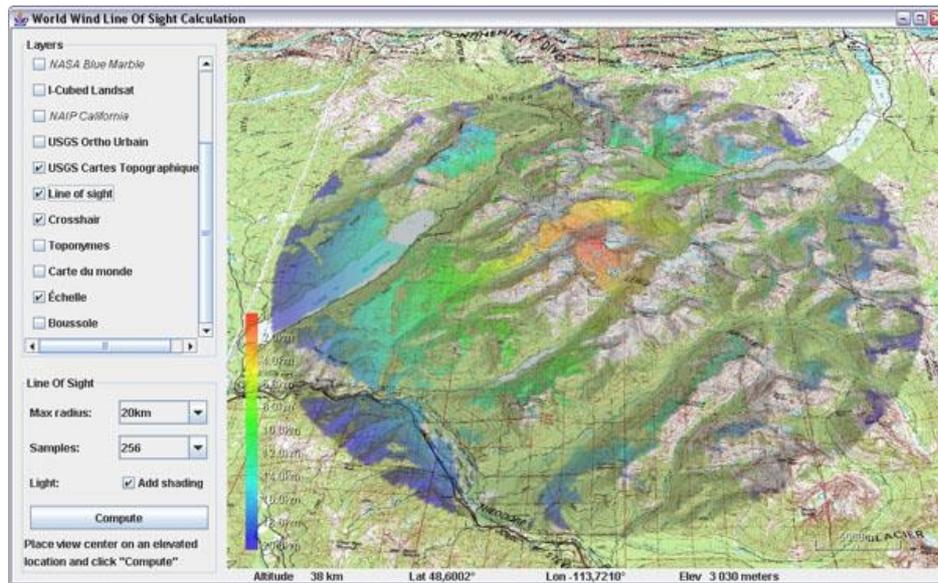


Ilustración 48: Cálculo de la línea de visión desde la cima del Monte Jackson (3064m), Glacier National Parc, Montana, EEUU.

El algoritmo de detección va tomando puntos de muestra a intervalos regulares (definido a través de la propiedad Ground Intersection Length definida en las propiedades de la red del simulador) a través del enlace hasta que encuentra un punto cuya elevación esté por debajo de la elevación del terreno. Luego, recursivamente, vuelve a tomar muestras en el ultimo segmento cada cierto intervalo hasta que el paso de muestreo es menor o igual que una determinada precisión (definida a través de la propiedad Ground Intersection Precision definida en las propiedades de la red del simulador).

Mientras mayor sea el valor de la variable Ground Intersection Length, más rápido se calculará la intersección. Sin embargo, mientras mayor sea este valor, menor será la precisión del proceso, dado que el rayo podría cruzar algún desnivel del terreno (montaña, etc.) en solo un paso, por lo que el sistema sería incapaz de detectarlo.

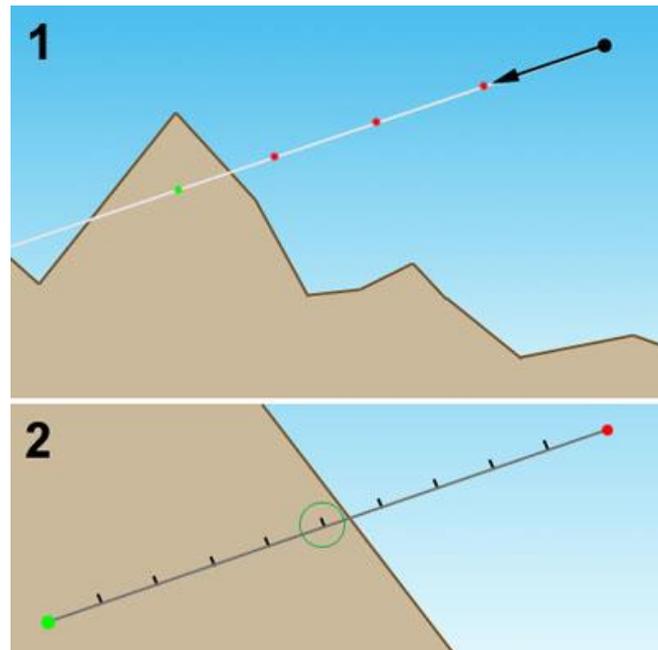


Ilustración 49: Algoritmo de RayCasting para la detección de intersecciones con el terreno

6.4. GraphStream

GraphStream es una librería gráfica dinámica escrita en Java que proporciona una manera fácil de representar grafos dinámicos, bien sea en memoria, en pantalla o en ficheros.

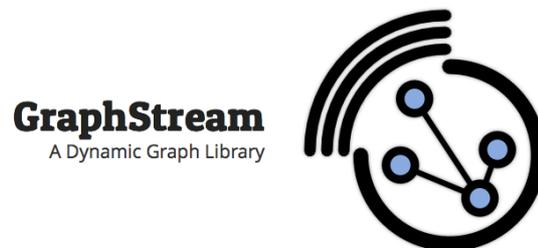


Ilustración 50: Logotipo de la librería GraphStream

GraphStream proporciona un framework para gestionar la evolución de los grafos, es decir, los cambios en los valores de los nodos y las aristas a lo largo del tiempo, pero también los cambios de topología del grafo, como son la creación, eliminación y modificación de los nodos y aristas a lo largo del tiempo.

Dado que GraphStream puede gestionar la evolución del grafo, los grafos se definen como un “flujo de eventos de grafo”, en lugar de solo un conjunto de nodos y aristas que eventualmente establecen valores entre ellos.

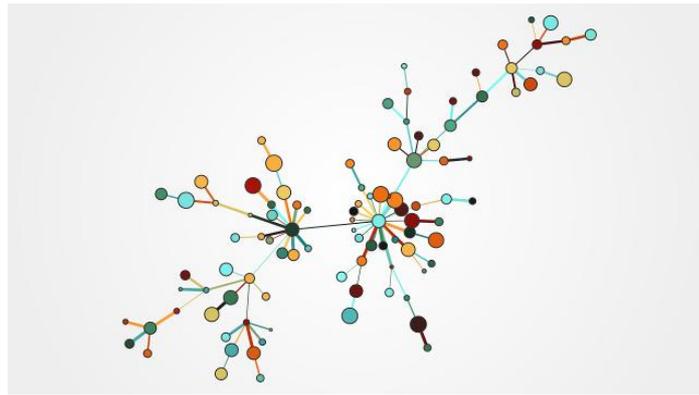


Ilustración 51: Ejemplo de grafo generado con la librería GraphStream

Los eventos ocurren cuando un nodo, arista o algunos de sus valores asociados aparecen, cambian o desaparecen. Por lo tanto, un grafo no se describe como una representación estática y fija, sino como una evolución completa de todos los elementos del grafo.

El objetivo de la librería dentro del simulador es la gestión gráfica, es decir, la representación, de los tres grafos definidos en la ventana de contienda: el grafo de conectividad, el grafo de tráfico y el grafo de contienda.

6.5. JGraphT

JGraphT es otra librería de grafos en Java que proporciona objetos matemáticos y algoritmos para la gestión de grafos. JGraphT soporta varios tipos de grafos, incluyendo:

- Grafos directos e indirectos
- Grafos con pesos o sin pesos, o cualquier otro tipo de etiquetado para las aristas
- Diferentes opciones de multiplicidad de aristas: grafos simples, multigrafos, pseudografos
- Grafos no modificables: permite generar grafos de solo lectura
- Subgrafos que pertenecen a otros grafos y se actualizan automáticamente

Aunque la librería es bastante potente, se ha diseñado para ser muy simple. Por ejemplo, los vértices del grafo pueden ser cualquier tipo de objeto. Se pueden crear grafos basados en Strings, URLs, documentos XML, etc.

El código de la librería está disponible abiertamente, bajo los términos de las licencias GNU Lesser General Public License y EPL.

En el simulador, usaremos esta librería para aprovecharnos de sus algoritmos matemáticos. En concreto, se usará para la búsqueda del camino óptimo del enlace entre dos nodos, a través del algoritmo de Dijkstra proporcionado por la propia librería, y que describimos en la sección 2.

Por lo tanto, es importante destacar que en el simulador, se van a construir a la vez los mismos grafos usando tanto la librería GraphStream como JGraphT, de forma que la primera se use para visualización mientras que la segunda se usa para el cálculo del camino.

7 ANEXO 2: RESULTADOS BALANCE DE ENLACE

“En todos los asuntos humanos hay esfuerzos, y hay resultados, y la fortaleza del esfuerzo es la medida del resultado.”

James Allen

7.1. Log completo de resultados de balance de enlace

```
*****
*****
TX Node   Quadrotor
*****
*****
Node Type:   Mesh Access Point
Transceiver: Mesh Router
             TX Power:    15 dBm
             Channel:     3
Transceiver: Access Point
             TX Power:    20 dBm
             Channel:     1
Rx AZI Range: 135.0586°
Rx ELE Range: 111.3327°
*****
*****
RX Node:    FW Base of Operations
*****
```

```
Node Type:      Mesh Access Point + Gateway
Distance:      318.1885 m
Link Type:     Mesh Link
Link Budget
  Tx type:     Mesh Router
  Rx type:     Mesh Router 2
  Channel:     3
  Rx Power:    -84.3373 dBm
  MODCOD: BPSK 1/2
  Gtx Power:   0 dBm
  Grx Power:   0 dBm
  Link Budget: N-OK
  Link Margin: -2.3373 dBm
  Inter. Margin: 2.8627 dBm
Link Budget
  Tx type:     Access Point
  Rx type:     Access Point
  Channel:     1
  Rx Power:    -79.1591 dBm
  MODCOD: BPSK 1/2
  Gtx Power:   0 dBm
  Grx Power:   0 dBm
  Link Budget: OK
  Link Margin: 2.8409 dBm
  Inter. Margin: 8.0409 dBm

*****
RX Node:      Small UGV
*****

Node Type:     Mesh Access Point
Distance:     427.0915 m
Link Type:    Mesh Link
Link Budget
  Tx type:     Mesh Router
  Rx type:     Mesh Router
  Channel:     3
  Rx Power:    -93.0111 dBm
  MODCOD: BPSK 1/2
  Gtx Power:   0 dBm
  Grx Power:   0 dBm
```

```

Link Budget:      N-OK
Link Margin:     -11.0111 dBm
Inter. Margin:  -5.8111 dBm
Link Budget
Tx type:        Access Point
Rx type:        Access Point
Channel:        1
Rx Power:       -87.8329 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:      0 dBm
Grx Power:      0 dBm
Link Budget:    N-OK
Link Margin:    -5.8329 dBm
Inter. Margin:  -0.6329 dBm

*****
RX Node:   Small Robot
*****
Node Type:   Mesh Access Point
Distance:   423.5927 m
Link Type:   Mesh Link
Link Budget
Tx type:    Mesh Router
Rx type:    Mesh Router
Channel:    3
Rx Power:   -90.5682 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:  0 dBm
Grx Power:  0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -8.5682 dBm
Inter. Margin: -3.3682 dBm
Link Budget
Tx type:    Access Point
Rx type:    Access Point
Channel:    1
Rx Power:   -85.39 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:  0 dBm
Grx Power:  0 dBm
    
```

```

Link Budget:   N-OK
Link Margin:   -3.39 dBm
Inter. Margin: 1.81 dBm

```

```

*****

```

```

RX Node:   Robot CAC 2

```

```

*****

```

```

Node Type:   Mesh Access Point + Gateway

```

```

Distance:    405.0056 m

```

```

Link Type:   Mesh Link

```

```

Link Budget

```

```

Tx type:     Mesh Router
Rx type:     Mesh Router 1
Channel:     3
Rx Power:    -87.0615 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:   0 dBm
Grx Power:   0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -5.0615 dBm
Inter. Margin: 0.1385 dBm

```

```

Link Budget

```

```

Tx type:     Access Point
Rx type:     Access Point
Channel:     1
Rx Power:    -81.8833 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:   0 dBm
Grx Power:   0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 0.1167 dBm
Inter. Margin: 5.3167 dBm

```

```

*****

```

```

RX Node:   Robot CAC 1

```

```

*****

```

```

Node Type:   Mesh Access Point + Gateway

```

```

Distance:    83.8677 m

```

```

Link Type:   Mesh Link

```

```

Link Budget

```

```

Tx type:      Mesh Router
Rx type:      Mesh Router 2
Channel:      3
Rx Power:     -69.281 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:   0 dBm
Grx Power:   0 dBm
Link Budget:  OK
Link Margin:  12.719 dBm
Inter. Margin: 17.919 dBm

Link Budget
Tx type:      Access Point
Rx type:      Access Point
Channel:      1
Rx Power:     -64.1028 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:   0 dBm
Grx Power:   0 dBm
Link Budget:  OK
Link Margin:  17.8972 dBm
Inter. Margin: 23.0972 dBm

*****
RX Node:      Large UGV
*****

Node Type:    Mesh Access Point
Distance:     37.0698 m
Link Type:    Mesh Link

Link Budget
Tx type:      Mesh Router
Rx type:      Mesh Router
Channel:      3
Rx Power:     -69.5621 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:   0 dBm
Grx Power:   0 dBm
Link Budget:  OK
Link Margin:  12.4379 dBm
Inter. Margin: 17.6379 dBm

Link Budget

```

Tx type: Access Point
Rx type: Access Point
Channel: 1
Rx Power: -64.3838 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 17.6162 dBm
Inter. Margin: 22.8162 dBm

RX Node: Human Urban SAR 2

Node Type: Station
Mode Type: Client
Distance: 420.3859 m
Link Type: Access Link
Link Budget
Tx type: Access Point
Rx type: Client
Channel: 1
Rx Power: -88.3042 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -6.3042 dBm
Inter. Margin: -1.1042 dBm

RX Node: Endurance UAS

Node Type: Mesh Gateway
Distance: 212.6687 m
Link Type: Mesh Link
Link Budget
Tx type: Mesh Router
Rx type: Mesh Router 2
Channel: 3

```

Rx Power:      -79.7878 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power:     0 dBm

Grx Power:     0 dBm

Link Budget:   OK

Link Margin:   2.2122 dBm

Inter. Margin: 7.4122 dBm

*****

RX Node:   Base of Operations

*****

Node Type:   Mesh Router

Distance:   496.9874 m

Link Type:   Mesh Link

            Link Budget:   Non Same Channel

*****

RX Node:   Human Urban SAR 1

*****

Node Type:   Station

Mode Type:   Client

Distance:   40.1833 m

Link Type:   Access Link

Link Budget

            Tx type:      Access Point

            Rx type:      Client

            Channel:      1

            Rx Power:     -65.7945 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power:   0 dBm

Grx Power:   0 dBm

Link Budget: OK

Link Margin: 16.2055 dBm

Inter. Margin: 21.4055 dBm

*****

*****

TX Node   FW Base of Operations

*****

```

```
*****
Node Type:      Mesh Access Point + Gateway
Transceiver:   Mesh Router 1
    TX Power:    20 dBm
    Channel:     2
Transceiver:   Mesh Router 2
    TX Power:    20 dBm
    Channel:     3
Transceiver:   Access Point
    TX Power:    20 dBm
    Channel:     1
Rx AZI Range:  267.8416°
Rx ELE Range:  121.7697°

*****
*****
RX Node:      Quadrotor
*****

Node Type:      Mesh Access Point
Distance:       318.1885 m
Link Type:      Mesh Link
Link Budget
    Tx type:     Mesh Router 2
    Rx type:     Mesh Router
    Channel:     3
    Rx Power:    -79.3373 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:   0 dBm
    Grx Power:   0 dBm
    Link Budget: OK
    Link Margin: 2.6627 dBm
    Inter. Margin: 7.8627 dBm

Link Budget
    Tx type:     Access Point
    Rx type:     Access Point
    Channel:     1
    Rx Power:    -79.1591 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:   0 dBm
    Grx Power:   0 dBm
```

```

Link Budget:   OK

Link Margin:   2.8409 dBm

Inter. Margin: 8.0409 dBm

*****

RX Node:      Small UGV

*****

Node Type:    Mesh Access Point

Distance:     151.0636 m

Link Type:    Mesh Link

Link Budget

Tx type:      Mesh Router 2

Rx type:      Mesh Router

Channel:      3

Rx Power:     -76.9257 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power:   0 dBm

Grx Power:   0 dBm

Link Budget: OK

Link Margin:  5.0743 dBm

Inter. Margin: 10.2743 dBm

Link Budget

Tx type:      Access Point

Rx type:      Access Point

Channel:      1

Rx Power:     -76.7475 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power:   0 dBm

Grx Power:   0 dBm

Link Budget: OK

Link Margin:  5.2525 dBm

Inter. Margin: 10.4525 dBm

*****

RX Node:      Small Robot

*****

Node Type:    Mesh Access Point

Distance:     147.0842 m

Link Type:    Mesh Link

Link Budget
    
```

Tx type: Mesh Router 2
Rx type: Mesh Router
Channel: 3
Rx Power: -76.6242 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 5.3758 dBm
Inter. Margin: 10.5758 dBm

Link Budget

Tx type: Access Point
Rx type: Access Point
Channel: 1
Rx Power: -76.446 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 5.554 dBm
Inter. Margin: 10.754 dBm

RX Node: Robot CAC 2

Node Type: Mesh Access Point + Gateway

Distance: 111.1391 m

Link Type: Mesh Link

Link Budget

Tx type: Mesh Router 1
Rx type: Mesh Router 2
Channel: 2
Rx Power: -67.3714 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 14.6286 dBm
Inter. Margin: 19.8286 dBm

Link Budget

```

Tx type:      Mesh Router 2
Rx type:      Mesh Router 1
Channel:      3
Rx Power:     -67.4601 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  OK
Link Margin:  14.5399 dBm
Inter. Margin: 19.7399 dBm

Link Budget
Tx type:      Access Point
Rx type:      Access Point
Channel:      1
Rx Power:     -67.2819 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  OK
Link Margin:  14.7181 dBm
Inter. Margin: 19.9181 dBm

*****
RX Node:      Robot CAC 1
*****

Node Type:    Mesh Access Point + Gateway
Distance:     240.7965 m
Link Type:    Mesh Link

Link Budget
Tx type:      Mesh Router 1
Rx type:      Mesh Router 1
Channel:      2
Rx Power:     -76.1018 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  OK
Link Margin:  5.8982 dBm
Inter. Margin: 11.0982 dBm

Link Budget

```

Tx type: Mesh Router 2
Rx type: Mesh Router 2
Channel: 3
Rx Power: -76.1904 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 5.8096 dBm
Inter. Margin: 11.0096 dBm

Link Budget

Tx type: Access Point
Rx type: Access Point
Channel: 1
Rx Power: -76.0122 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 5.9878 dBm
Inter. Margin: 11.1878 dBm

RX Node: Large UGV

Node Type: Mesh Access Point
Distance: 291.7276 m
Link Type: Mesh Link

Link Budget

Tx type: Mesh Router 2
Rx type: Mesh Router
Channel: 3
Rx Power: -105.3569 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -23.3569 dBm
Inter. Margin: -18.1569 dBm

Link Budget

```

Tx type:      Access Point
Rx type:      Access Point
Channel:      1
Rx Power:     -105.1787 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  N-OK
Link Margin:  -23.1787 dBm
Inter. Margin: -17.9787 dBm

*****
RX Node:      Human Urban SAR 2
*****

Node Type:    Station
Mode Type:    Client
Distance:     146.4572 m
Link Type:    Access Link
Link Budget

Tx type:      Access Point
Rx type:      Client
Channel:      1
Rx Power:     -76.3978 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  OK
Link Margin:  5.6022 dBm
Inter. Margin: 10.8022 dBm

*****
RX Node:      Endurance UAS
*****

Node Type:    Mesh Gateway
Distance:     229.3369 m
Link Type:    Mesh Link
Link Budget

Tx type:      Mesh Router 1
Rx type:      Mesh Router 1
Channel:      2
    
```

```
Rx Power:      -75.5512 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:     0 dBm
Grx Power:     0 dBm
Link Budget:   OK
Link Margin:   6.4488 dBm
Inter. Margin: 11.6488 dBm

Link Budget
Tx type:       Mesh Router 2
Rx type:       Mesh Router 2
Channel:       3
Rx Power:      -75.6399 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:     0 dBm
Grx Power:     0 dBm
Link Budget:   OK
Link Margin:   6.3601 dBm
Inter. Margin: 11.5601 dBm

*****
RX Node:      Base of Operations
*****

Node Type:    Mesh Router
Distance:     279.5331 m
Link Type:    Mesh Link

Link Budget
Tx type:      Mesh Router 1
Rx type:      Mesh Router
Channel:      2
Rx Power:     -77.7861 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  OK
Link Margin:  4.2139 dBm
Inter. Margin: 9.4139 dBm

*****
RX Node:      Human Urban SAR 1
*****
```

```

Node Type:      Station
Mode Type:     Client
Distance:      324.0172 m
Link Type:     Access Link
Link Budget
    Tx type:    Access Point
    Rx type:    Client
    Channel:    1
    Rx Power:   -101.3641 dBm
    MODCOD:    BPSK 1/2
    Gtx Power:  0 dBm
    Grx Power:  0 dBm
    Link Budget: N-OK
    Link Margin: -19.3641 dBm
    Inter. Margin: -14.1641 dBm

*****
*****
TX Node      Small UGV
*****
*****
Node Type:    Mesh Access Point
Transceiver:  Mesh Router
    TX Power:  20 dBm
    Channel:   3
Transceiver:  Access Point
    TX Power:  20 dBm
    Channel:   1
Rx AZI Range: 267.8416°
Rx ELE Range: 121.7697°

*****
*****
RX Node:     Quadrotor
*****
Node Type:    Mesh Access Point
Distance:    427.0915 m
Link Type:    Mesh Link
Link Budget
    Tx type:    Mesh Router
    
```

```

Rx type:      Mesh Router
Channel:      3
Rx Power:    -94.0111 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  N-OK
Link Margin:  -12.0111 dBm
Inter. Margin: -6.8111 dBm

```

Link Budget

```

Tx type:      Access Point
Rx type:      Access Point
Channel:      1
Rx Power:    -93.8329 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  N-OK
Link Margin:  -11.8329 dBm
Inter. Margin: -6.6329 dBm

```

RX Node: FW Base of Operations

Node Type: Mesh Access Point + Gateway

Distance: 151.0636 m

Link Type: Mesh Link

Link Budget

```

Tx type:      Mesh Router
Rx type:      Mesh Router 2
Channel:      3
Rx Power:    -82.9257 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  N-OK
Link Margin:  -0.9257 dBm
Inter. Margin: 4.2743 dBm

```

Link Budget

```

Tx type:      Access Point

```

```

Rx type:      Access Point
Channel:      1
Rx Power:    -82.7475 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:   0 dBm
Grx Power:   0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -0.7475 dBm
Inter. Margin: 4.4525 dBm

*****

RX Node:     Small Robot
*****

Node Type:   Mesh Access Point
Distance:    4.0621 m
Link Type:   Mesh Link
Link Budget

Tx type:     Mesh Router
Rx type:     Mesh Router
Channel:     3
Rx Power:   -38.5302 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:  0 dBm
Grx Power:  0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 43.4698 dBm
Inter. Margin: 48.6698 dBm

Link Budget

Tx type:     Access Point
Rx type:     Access Point
Channel:     1
Rx Power:   -38.352 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:  0 dBm
Grx Power:  0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 43.648 dBm
Inter. Margin: 48.848 dBm

*****

```

```
RX Node:  Robot CAC 2
*****
Node Type:  Mesh Access Point + Gateway
Distance:   43.9597 m
Link Type:  Mesh Link
Link Budget
    Tx type:  Mesh Router
    Rx type:  Mesh Router 1
    Channel:  3
    Rx Power: -68.987 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power: 0 dBm
    Grx Power: 0 dBm
    Link Budget: OK
    Link Margin: 13.013 dBm
    Inter. Margin: 18.213 dBm
Link Budget
    Tx type:  Access Point
    Rx type:  Access Point
    Channel:  1
    Rx Power: -68.8087 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power: 0 dBm
    Grx Power: 0 dBm
    Link Budget: OK
    Link Margin: 13.1913 dBm
    Inter. Margin: 18.3913 dBm
*****
RX Node:  Robot CAC 1
*****
Node Type:  Mesh Access Point + Gateway
Distance:   359.7341 m
Link Type:  Mesh Link
Link Budget
    Tx type:  Mesh Router
    Rx type:  Mesh Router 2
    Channel:  3
    Rx Power: -92.7231 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
```

```

    Gtx Power:      0 dBm
    Grx Power:      0 dBm
    Link Budget:    N-OK
    Link Margin:    -10.7231 dBm
    Inter. Margin: -5.5231 dBm
Link Budget
    Tx type:        Access Point
    Rx type:        Access Point
    Channel:        1
    Rx Power:       -92.5448 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:      0 dBm
    Grx Power:      0 dBm
    Link Budget:    N-OK
    Link Margin:    -10.5448 dBm
    Inter. Margin: -5.3448 dBm

*****
RX Node:   Large UGV
*****

Node Type:   Mesh Access Point
Distance:    401.3929 m
Link Type:   Mesh Link
Link Budget
    Tx type:        Mesh Router
    Rx type:        Mesh Router
    Channel:        3
    Rx Power:       -119.9603 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:      0 dBm
    Grx Power:      0 dBm
    Link Budget:    N-OK
    Link Margin:    -37.9603 dBm
    Inter. Margin: -32.7603 dBm
Link Budget
    Tx type:        Access Point
    Rx type:        Access Point
    Channel:        1
    Rx Power:       -119.7821 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    
```

```

    Gtx Power:      0 dBm
    Grx Power:      0 dBm
    Link Budget:    N-OK
    Link Margin:    -37.7821 dBm
    Inter. Margin: -32.5821 dBm

```

```
*****
```

```
RX Node:   Human Urban SAR 2
```

```
*****
```

```

Node Type:      Station
Mode Type:      Client
Distance:       6.8605 m
Link Type:      Access Link

Link Budget

    Tx type:      Access Point
    Rx type:      Client
    Channel:      1
    Rx Power:     -45.1801 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:    0 dBm
    Grx Power:    0 dBm
    Link Budget:  OK
    Link Margin:  36.8199 dBm
    Inter. Margin: 42.0199 dBm

```

```
*****
```

```
RX Node:   Endurance UAS
```

```
*****
```

```

Node Type:      Mesh Gateway
Distance:       282.886 m
Link Type:      Mesh Link

Link Budget

    Tx type:      Mesh Router
    Rx type:      Mesh Router 2
    Channel:      3
    Rx Power:     -90.0094 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:    0 dBm
    Grx Power:    0 dBm
    Link Budget:  N-OK

```

```

Link Margin:  -8.0094 dBm

Inter. Margin: -2.8094 dBm

*****

RX Node:  Base of Operations

*****

Node Type:      Mesh Router
Distance:       378.6582 m
Link Type:      Mesh Link

Link Budget:    Non Same Channel

*****

RX Node:  Human Urban SAR 1

*****

Node Type:      Station
Mode Type:      Client
Distance:       440.9656 m
Link Type:      Access Link

Link Budget

Tx type:        Access Point
Rx type:        Client
Channel:        1
Rx Power:       -130.8438 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:      0 dBm
Grx Power:      0 dBm
Link Budget:    N-OK
Link Margin:    -48.8438 dBm
Inter. Margin: -43.6438 dBm

*****

*****

TX Node  Small Robot

*****

Node Type:      Mesh Access Point
Transceiver:    Mesh Router

Tx Power:       20 dBm

Channel:        3
    
```

```
Transceiver:  Access Point
    TX Power:    20 dBm
    Channel:     1
Rx AZI Range: 267.8416°
Rx ELE Range: 121.7697°

*****
*****
RX Node:  Quadrotor
*****

Node Type:  Mesh Access Point
Distance:  423.5927 m
Link Type:  Mesh Link
Link Budget
    Tx type:    Mesh Router
    Rx type:    Mesh Router
    Channel:    3
    Rx Power:   -91.5682 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:  0 dBm
    Grx Power:  0 dBm
    Link Budget: N-OK
    Link Margin: -9.5682 dBm
    Inter. Margin: -4.3682 dBm

Link Budget
    Tx type:    Access Point
    Rx type:    Access Point
    Channel:    1
    Rx Power:   -91.39 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:  0 dBm
    Grx Power:  0 dBm
    Link Budget: N-OK
    Link Margin: -9.39 dBm
    Inter. Margin: -4.19 dBm

*****
*****
RX Node:  FW Base of Operations
*****

Node Type:  Mesh Access Point + Gateway
```

Distance: 147.0842 m

Link Type: Mesh Link

Link Budget

Tx type: Mesh Router
 Rx type: Mesh Router 2
 Channel: 3
 Rx Power: -82.6242 dBm
 MODCOD: BPSK 1/2
 Gtx Power: 0 dBm
 Grx Power: 0 dBm
 Link Budget: N-OK
 Link Margin: -0.6242 dBm
 Inter. Margin: 4.5758 dBm

Link Budget

Tx type: Access Point
 Rx type: Access Point
 Channel: 1
 Rx Power: -82.446 dBm
 MODCOD: BPSK 1/2
 Gtx Power: 0 dBm
 Grx Power: 0 dBm
 Link Budget: N-OK
 Link Margin: -0.446 dBm
 Inter. Margin: 4.754 dBm

RX Node: Small UGV

Node Type: Mesh Access Point

Distance: 4.0621 m

Link Type: Mesh Link

Link Budget

Tx type: Mesh Router
 Rx type: Mesh Router
 Channel: 3
 Rx Power: -38.5302 dBm
 MODCOD: BPSK 1/2
 Gtx Power: 0 dBm
 Grx Power: 0 dBm
 Link Budget: OK

Link Margin: 43.4698 dBm

Inter. Margin: 48.6698 dBm

Link Budget

Tx type: Access Point

Rx type: Access Point

Channel: 1

Rx Power: -38.352 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power: 0 dBm

Grx Power: 0 dBm

Link Budget: OK

Link Margin: 43.648 dBm

Inter. Margin: 48.848 dBm

RX Node: Robot CAC 2

Node Type: Mesh Access Point + Gateway

Distance: 40.4526 m

Link Type: Mesh Link

Link Budget

Tx type: Mesh Router

Rx type: Mesh Router 1

Channel: 3

Rx Power: -68.0481 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power: 0 dBm

Grx Power: 0 dBm

Link Budget: OK

Link Margin: 13.9519 dBm

Inter. Margin: 19.1519 dBm

Link Budget

Tx type: Access Point

Rx type: Access Point

Channel: 1

Rx Power: -67.8699 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power: 0 dBm

Grx Power: 0 dBm

Link Budget: OK

```

Link Margin: 14.1301 dBm
Inter. Margin: 19.3301 dBm

*****
RX Node: Robot CAC 1
*****

Node Type: Mesh Access Point + Gateway
Distance: 356.0739 m
Link Type: Mesh Link
Link Budget
Tx type: Mesh Router
Rx type: Mesh Router 2
Channel: 3
Rx Power: -92.6076 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -10.6076 dBm
Inter. Margin: -5.4076 dBm

Link Budget
Tx type: Access Point
Rx type: Access Point
Channel: 1
Rx Power: -92.4294 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -10.4294 dBm
Inter. Margin: -5.2294 dBm

*****
RX Node: Large UGV
*****

Node Type: Mesh Access Point
Distance: 397.9052 m
Link Type: Mesh Link
Link Budget
Tx type: Mesh Router

```

```
Rx type:      Mesh Router
Channel:      3
Rx Power:    -119.8618 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:   0 dBm
Grx Power:   0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -37.8618 dBm
Inter. Margin: -32.6618 dBm
```

Link Budget

```
Tx type:      Access Point
Rx type:      Access Point
Channel:      1
Rx Power:    -119.6836 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:   0 dBm
Grx Power:   0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -37.6836 dBm
Inter. Margin: -32.4836 dBm
```

```
*****
```

```
RX Node:     Human Urban SAR 2
```

```
*****
```

```
Node Type:   Station
Mode Type:   Client
Distance:    4.7187 m
Link Type:   Access Link
```

Link Budget

```
Tx type:      Access Point
Rx type:      Client
Channel:      1
Rx Power:    -40.304 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:   0 dBm
Grx Power:   0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 41.696 dBm
Inter. Margin: 46.896 dBm
```

```

*****
RX Node:   Endurance UAS
*****
Node Type:   Mesh Gateway
Distance:    279.9656 m
Link Type:   Mesh Link
Link Budget
    Tx type:   Mesh Router
    Rx type:   Mesh Router 2
    Channel:   3
    Rx Power:  -89.8923 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:  0 dBm
    Grx Power:  0 dBm
    Link Budget:  N-OK
    Link Margin: -7.8923 dBm
    Inter. Margin: -2.6923 dBm

*****
RX Node:   Base of Operations
*****
Node Type:   Mesh Router
Distance:    375.8894 m
Link Type:   Mesh Link
    Link Budget:  Non Same Channel

*****
RX Node:   Human Urban SAR 1
*****
Node Type:   Station
Mode Type:   Client
Distance:    437.3816 m
Link Type:   Access Link
Link Budget
    Tx type:   Access Point
    Rx type:   Client
    Channel:   1
    Rx Power:  -130.7517 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    
```

```
Gtx Power:      0 dBm
Grx Power:      0 dBm
Link Budget:    N-OK
Link Margin:    -48.7517 dBm
Inter. Margin: -43.5517 dBm

*****
*****
TX Node      Robot CAC 2
*****
*****
Node Type:    Mesh Access Point + Gateway
Transceiver:  Mesh Router 1
    TX Power:    20 dBm
    Channel:     3
Transceiver:  Mesh Router 2
    TX Power:    20 dBm
    Channel:     2
Transceiver:  Access Point
    TX Power:    20 dBm
    Channel:     1
Rx AZI Range: 341.0917°
Rx ELE Range: 121.7697°

*****
*****
RX Node:     Quadrotor
*****
Node Type:    Mesh Access Point
Distance:     405.0056 m
Link Type:    Mesh Link
Link Budget
    Tx type:     Mesh Router 1
    Rx type:     Mesh Router
    Channel:     3
    Rx Power:    -82.0615 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:   0 dBm
    Grx Power:   0 dBm
    Link Budget: N-OK
```

```
Link Margin: -0.0615 dBm
Inter. Margin: 5.1385 dBm
Link Budget
Tx type: Access Point
Rx type: Access Point
Channel: 1
Rx Power: -81.8833 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 0.1167 dBm
Inter. Margin: 5.3167 dBm

*****
RX Node: FW Base of Operations
*****
Node Type: Mesh Access Point + Gateway
Distance: 111.1391 m
Link Type: Mesh Link
Link Budget
Tx type: Mesh Router 1
Rx type: Mesh Router 2
Channel: 3
Rx Power: -67.4601 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 14.5399 dBm
Inter. Margin: 19.7399 dBm
Link Budget
Tx type: Mesh Router 2
Rx type: Mesh Router 1
Channel: 2
Rx Power: -67.3714 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
```

```
Link Margin: 14.6286 dBm
Inter. Margin: 19.8286 dBm
Link Budget
Tx type: Access Point
Rx type: Access Point
Channel: 1
Rx Power: -67.2819 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 14.7181 dBm
Inter. Margin: 19.9181 dBm

*****
RX Node: Small UGV
*****
Node Type: Mesh Access Point
Distance: 43.9597 m
Link Type: Mesh Link
Link Budget
Tx type: Mesh Router 1
Rx type: Mesh Router
Channel: 3
Rx Power: -62.987 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 19.013 dBm
Inter. Margin: 24.213 dBm
Link Budget
Tx type: Access Point
Rx type: Access Point
Channel: 1
Rx Power: -62.8087 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
```

```

Link Margin: 19.1913 dBm
Inter. Margin: 24.3913 dBm

*****
RX Node: Small Robot
*****

Node Type: Mesh Access Point
Distance: 40.4526 m
Link Type: Mesh Link
Link Budget
Tx type: Mesh Router 1
Rx type: Mesh Router
Channel: 3
Rx Power: -62.0481 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 19.9519 dBm
Inter. Margin: 25.1519 dBm
Link Budget
Tx type: Access Point
Rx type: Access Point
Channel: 1
Rx Power: -61.8699 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 20.1301 dBm
Inter. Margin: 25.3301 dBm

*****
RX Node: Robot CAC 1
*****

Node Type: Mesh Access Point + Gateway
Distance: 333.7204 m
Link Type: Mesh Link
Link Budget: Non Same Channel
    
```

RX Node: Large UGV

Node Type: Mesh Access Point

Distance: 378.8316 m

Link Type: Mesh Link

Link Budget: Non Same Channel

RX Node: Human Urban SAR 2

Node Type: Station

Mode Type: Client

Distance: 41.8488 m

Link Type: Access Link

Link Budget

Tx type: Access Point

Rx type: Client

Channel: 1

Rx Power: -62.2531 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power: 0 dBm

Grx Power: 0 dBm

Link Budget: OK

Link Margin: 19.7469 dBm

Inter. Margin: 24.9469 dBm

RX Node: Endurance UAS

Node Type: Mesh Gateway

Distance: 272.8655 m

Link Type: Mesh Link

Link Budget

Tx type: Mesh Router 1

Rx type: Mesh Router 2

Channel: 3

Rx Power: -77.6022 dBm

```

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power:      0 dBm

Grx Power:      0 dBm

Link Budget:    OK

Link Margin:    4.3978 dBm

Inter. Margin:  9.5978 dBm

Link Budget

Tx type:        Mesh Router 2

Rx type:        Mesh Router 1

Channel:        2

Rx Power:       -77.5135 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power:      0 dBm

Grx Power:      0 dBm

Link Budget:    OK

Link Margin:    4.4865 dBm

Inter. Margin:  9.6865 dBm

*****

RX Node:   Base of Operations

*****

Node Type:   Mesh Router

Distance:    337.3106 m

Link Type:   Mesh Link

Link Budget: Non Same Channel

*****

RX Node:   Human Urban SAR 1

*****

Node Type:   Station

Mode Type:   Client

Distance:    416.3447 m

Link Type:   Access Link

Link Budget: Non Same Channel

*****

*****

TX Node    Robot CAC 1
    
```

```

*****
*****
Node Type:      Mesh Access Point + Gateway
Transceiver:   Mesh Router 1
    TX Power:   20 dBm
    Channel:    2
Transceiver:   Mesh Router 2
    TX Power:   20 dBm
    Channel:    3
Transceiver:   Access Point
    TX Power:   20 dBm
    Channel:    1
Rx AZI Range:  341.6514°
Rx ELE Range:  126.0775°

*****
*****
RX Node:      Quadrotor
*****
Node Type:    Mesh Access Point
Distance:     83.8677 m
Link Type:    Mesh Link
Link Budget
    Tx type:   Mesh Router 2
    Rx type:   Mesh Router
    Channel:   3
    Rx Power:  -64.281 dBm
    MODCOD:   BPSK 1/2
    Gtx Power: 0 dBm
    Grx Power: 0 dBm
    Link Budget: OK
    Link Margin: 17.719 dBm
    Inter. Margin: 22.919 dBm
Link Budget
    Tx type:   Access Point
    Rx type:   Access Point
    Channel:   1
    Rx Power:  -64.1028 dBm
    MODCOD:   BPSK 1/2
    Gtx Power: 0 dBm

```

```

Grx Power:      0 dBm

Link Budget:    OK

Link Margin:    17.8972 dBm

Inter. Margin:  23.0972 dBm

*****

RX Node:      FW Base of Operations

*****

Node Type:     Mesh Access Point + Gateway

Distance:     240.7965 m

Link Type:     Mesh Link

Link Budget

Tx type:      Mesh Router 1

Rx type:      Mesh Router 1

Channel:      2

Rx Power:     -76.1018 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power:    0 dBm

Grx Power:    0 dBm

Link Budget:  OK

Link Margin:  5.8982 dBm

Inter. Margin: 11.0982 dBm

Link Budget

Tx type:      Mesh Router 2

Rx type:      Mesh Router 2

Channel:      3

Rx Power:     -76.1904 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power:    0 dBm

Grx Power:    0 dBm

Link Budget:  OK

Link Margin:  5.8096 dBm

Inter. Margin: 11.0096 dBm

Link Budget

Tx type:      Access Point

Rx type:      Access Point

Channel:      1

Rx Power:     -76.0122 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power:    0 dBm
    
```

```
Grx Power:      0 dBm
Link Budget:    OK
Link Margin:    5.9878 dBm
Inter. Margin: 11.1878 dBm

*****
RX Node:      Small UGV
*****

Node Type:     Mesh Access Point
Distance:     359.7341 m
Link Type:    Mesh Link

Link Budget
Tx type:      Mesh Router 2
Rx type:      Mesh Router
Channel:      3
Rx Power:     -86.7231 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  N-OK
Link Margin:  -4.7231 dBm
Inter. Margin: 0.4769 dBm

Link Budget
Tx type:      Access Point
Rx type:      Access Point
Channel:      1
Rx Power:     -86.5448 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  N-OK
Link Margin:  -4.5448 dBm
Inter. Margin: 0.6552 dBm

*****
RX Node:      Small Robot
*****

Node Type:     Mesh Access Point
Distance:     356.0739 m
Link Type:    Mesh Link
```

Link Budget

Tx type: Mesh Router 2
 Rx type: Mesh Router
 Channel: 3
 Rx Power: -86.6076 dBm
 MODCOD: BPSK 1/2
 Gtx Power: 0 dBm
 Grx Power: 0 dBm
 Link Budget: N-OK
 Link Margin: -4.6076 dBm
 Inter. Margin: 0.5924 dBm

Link Budget

Tx type: Access Point
 Rx type: Access Point
 Channel: 1
 Rx Power: -86.4294 dBm
 MODCOD: BPSK 1/2
 Gtx Power: 0 dBm
 Grx Power: 0 dBm
 Link Budget: N-OK
 Link Margin: -4.4294 dBm
 Inter. Margin: 0.7706 dBm

RX Node: Robot CAC 2

Node Type: Mesh Access Point + Gateway
 Distance: 333.7204 m
 Link Type: Mesh Link
 Link Budget: Non Same Channel

RX Node: Large UGV

Node Type: Mesh Access Point
 Distance: 55.5661 m
 Link Type: Mesh Link
 Link Budget

Tx type: Mesh Router 2

```

Rx type:      Mesh Router
Channel:      3
Rx Power:     -81.6326 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  OK
Link Margin:  0.3674 dBm
Inter. Margin: 5.5674 dBm

```

Link Budget

```

Tx type:      Access Point
Rx type:      Access Point
Channel:      1
Rx Power:     -81.4544 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  OK
Link Margin:  0.5456 dBm
Inter. Margin: 5.7456 dBm

```

RX Node: Human Urban SAR 2

```

Node Type:    Station
Mode Type:    Client
Distance:     353.1809 m
Link Type:    Access Link
Link Budget

Tx type:      Access Point
Rx type:      Client
Channel:      1
Rx Power:     -86.3372 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  N-OK
Link Margin:  -4.3372 dBm
Inter. Margin: 0.8628 dBm

```

```

*****
RX Node:   Endurance UAS
*****
Node Type:   Mesh Gateway
Distance:   193.7497 m
Link Type:   Mesh Link
Link Budget
    Tx type:   Mesh Router 1
    Rx type:   Mesh Router 1
    Channel:   2
    Rx Power:  -73.6471 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:  0 dBm
    Grx Power:  0 dBm
    Link Budget: OK
    Link Margin: 8.3529 dBm
    Inter. Margin: 13.5529 dBm
Link Budget
    Tx type:   Mesh Router 2
    Rx type:   Mesh Router 2
    Channel:   3
    Rx Power:  -73.7358 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:  0 dBm
    Grx Power:  0 dBm
    Link Budget: OK
    Link Margin: 8.2642 dBm
    Inter. Margin: 13.4642 dBm
*****
RX Node:   Base of Operations
*****
Node Type:   Mesh Router
Distance:   421.328 m
Link Type:   Mesh Link
Link Budget
    Tx type:   Mesh Router 1
    Rx type:   Mesh Router
    Channel:   2
    Rx Power:  -82.419 dBm

```

```
MODCOD: BPSK 1/2

  Gtx Power:      0 dBm
  Grx Power:      0 dBm
  Link Budget:    N-OK
  Link Margin:    -0.419 dBm
  Inter. Margin:  4.781 dBm

*****

RX Node:  Human Urban SAR 1

*****

Node Type:      Station
Mode Type:      Client
Distance:       83.3825 m
Link Type:      Access Link
Link Budget

  Tx type:       Access Point
  Rx type:       Client
  Channel:       1
  Rx Power:      -91.0373 dBm
  MODCOD: BPSK 1/2
  Gtx Power:     0 dBm
  Grx Power:     0 dBm
  Link Budget:   N-OK
  Link Margin:   -9.0373 dBm
  Inter. Margin: -3.8373 dBm

*****

*****

TX Node  Large UGV

*****

*****

Node Type:      Mesh Access Point
Transceiver:    Mesh Router

  TX Power:      20 dBm
  Channel:       3

Transceiver:    Access Point

  TX Power:      20 dBm
  Channel:       1

Rx AZI Range:  341.6514°
Rx ELE Range:  132.9224°
```

RX Node: Quadrotor

Node Type: Mesh Access Point

Distance: 37.0698 m

Link Type: Mesh Link

Link Budget

Tx type: Mesh Router

Rx type: Mesh Router

Channel: 3

Rx Power: -70.5621 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power: 0 dBm

Grx Power: 0 dBm

Link Budget: OK

Link Margin: 11.4379 dBm

Inter. Margin: 16.6379 dBm

Link Budget

Tx type: Access Point

Rx type: Access Point

Channel: 1

Rx Power: -70.3838 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power: 0 dBm

Grx Power: 0 dBm

Link Budget: OK

Link Margin: 11.6162 dBm

Inter. Margin: 16.8162 dBm

RX Node: FW Base of Operations

Node Type: Mesh Access Point + Gateway

Distance: 291.7276 m

Link Type: Mesh Link

Link Budget

Tx type: Mesh Router

Rx type: Mesh Router 2

Channel: 3
Rx Power: -111.3569 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -29.3569 dBm
Inter. Margin: -24.1569 dBm

Link Budget

Tx type: Access Point
Rx type: Access Point
Channel: 1
Rx Power: -111.1787 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -29.1787 dBm
Inter. Margin: -23.9787 dBm

RX Node: Small UGV

Node Type: Mesh Access Point
Distance: 401.3929 m
Link Type: Mesh Link

Link Budget

Tx type: Mesh Router
Rx type: Mesh Router
Channel: 3
Rx Power: -119.9603 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -37.9603 dBm
Inter. Margin: -32.7603 dBm

Link Budget

Tx type: Access Point
Rx type: Access Point

```

Channel:      1
Rx Power:    -119.7821 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:   0 dBm
Grx Power:   0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -37.7821 dBm
Inter. Margin: -32.5821 dBm

*****

RX Node:     Small Robot
*****

Node Type:   Mesh Access Point
Distance:    397.9052 m
Link Type:   Mesh Link
Link Budget

Tx type:     Mesh Router
Rx type:     Mesh Router
Channel:     3
Rx Power:    -119.8618 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:   0 dBm
Grx Power:   0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -37.8618 dBm
Inter. Margin: -32.6618 dBm

Link Budget

Tx type:     Access Point
Rx type:     Access Point
Channel:     1
Rx Power:    -119.6836 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:   0 dBm
Grx Power:   0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -37.6836 dBm
Inter. Margin: -32.4836 dBm

*****

RX Node:     Robot CAC 2
    
```

```
*****
Node Type:      Mesh Access Point + Gateway
Distance:      378.8316 m
Link Type:     Mesh Link
              Link Budget:  Non Same Channel

*****

RX Node:      Robot CAC 1
*****

Node Type:     Mesh Access Point + Gateway
Distance:     55.5661 m
Link Type:    Mesh Link
Link Budget

  Tx type:     Mesh Router
  Rx type:     Mesh Router 2
  Channel:     3
  Rx Power:    -87.6326 dBm
  MODCOD: BPSK 1/2
  Gtx Power:   0 dBm
  Grx Power:   0 dBm
  Link Budget: N-OK
  Link Margin: -5.6326 dBm
  Inter. Margin: -0.4326 dBm

Link Budget

  Tx type:     Access Point
  Rx type:     Access Point
  Channel:     1
  Rx Power:    -87.4544 dBm
  MODCOD: BPSK 1/2
  Gtx Power:   0 dBm
  Grx Power:   0 dBm
  Link Budget: N-OK
  Link Margin: -5.4544 dBm
  Inter. Margin: -0.2544 dBm

*****

RX Node:      Human Urban SAR 2
*****

Node Type:     Station
```

```

Mode Type:      Client
Distance:       394.6746 m
Link Type:      Access Link
Link Budget
    Tx type:     Access Point
    Rx type:     Client
    Channel:     1
    Rx Power:    -119.5915 dBm
    MODCOD:     BPSK 1/2
    Gtx Power:   0 dBm
    Grx Power:   0 dBm
    Link Budget: N-OK
    Link Margin: -37.5915 dBm
    Inter. Margin: -32.3915 dBm

*****
RX Node:      Endurance UAS
*****
Node Type:     Mesh Gateway
Distance:      208.8566 m
Link Type:     Mesh Link
Link Budget
    Tx type:     Mesh Router
    Rx type:     Mesh Router 2
    Channel:     3
    Rx Power:    -92.5836 dBm
    MODCOD:     BPSK 1/2
    Gtx Power:   0 dBm
    Grx Power:   0 dBm
    Link Budget: N-OK
    Link Margin: -10.5836 dBm
    Inter. Margin: -5.3836 dBm

*****
RX Node:      Base of Operations
*****
Node Type:     Mesh Router
Distance:      475.621 m
Link Type:     Mesh Link
    Link Budget: Non Same Channel
    
```

RX Node: Human Urban SAR 1

Node Type: Station

Mode Type: Client

Distance: 44.7937 m

Link Type: Access Link

Link Budget

Tx type: Access Point

Rx type: Client

Channel: 1

Rx Power: -69.6258 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power: 0 dBm

Grx Power: 0 dBm

Link Budget: OK

Link Margin: 12.3742 dBm

Inter. Margin: 17.5742 dBm

TX Node Human Urban SAR 2

Node Type: Station

Mode Type: Client

Transceiver: Client

TX Power: 20 dBm

Channel: 1

Rx AZI Range: 341.6514°

Rx ELE Range: 132.9224°

RX Node: Quadrotor

Node Type: Mesh Access Point

Distance: 420.3859 m

Link Type: Access Link

Link Budget

Tx type: Client
 Rx type: Access Point
 Channel: 1
 Rx Power: -94.3042 dBm
 MODCOD: BPSK 1/2
 Gtx Power: 0 dBm
 Grx Power: 0 dBm
 Link Budget: N-OK
 Link Margin: -12.3042 dBm
 Inter. Margin: -7.1042 dBm

RX Node: FW Base of Operations

Node Type: Mesh Access Point + Gateway

Distance: 146.4572 m

Link Type: Access Link

Link Budget

Tx type: Client
 Rx type: Access Point
 Channel: 1
 Rx Power: -82.3978 dBm
 MODCOD: BPSK 1/2
 Gtx Power: 0 dBm
 Grx Power: 0 dBm
 Link Budget: N-OK
 Link Margin: -0.3978 dBm
 Inter. Margin: 4.8022 dBm

RX Node: Small UGV

Node Type: Mesh Access Point

Distance: 6.8605 m

Link Type: Access Link

Link Budget

Tx type: Client
 Rx type: Access Point

```
Channel:      1
Rx Power:    -45.1801 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:   0 dBm
Grx Power:   0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 36.8199 dBm
Inter. Margin: 42.0199 dBm
```

```
*****
```

```
RX Node:     Small Robot
```

```
*****
```

```
Node Type:   Mesh Access Point
```

```
Distance:    4.7187 m
```

```
Link Type:   Access Link
```

```
Link Budget
```

```
  Tx type:   Client
  Rx type:   Access Point
  Channel:   1
  Rx Power:  -40.304 dBm
  MODCOD: BPSK 1/2
  Gtx Power: 0 dBm
  Grx Power: 0 dBm
  Link Budget: OK
  Link Margin: 41.696 dBm
  Inter. Margin: 46.896 dBm
```

```
*****
```

```
RX Node:     Robot CAC 2
```

```
*****
```

```
Node Type:   Mesh Access Point + Gateway
```

```
Distance:    41.8488 m
```

```
Link Type:   Access Link
```

```
Link Budget
```

```
  Tx type:   Client
  Rx type:   Access Point
  Channel:   1
  Rx Power:  -68.2531 dBm
  MODCOD: BPSK 1/2
  Gtx Power: 0 dBm
```

```

Grx Power:      0 dBm

Link Budget:    OK

Link Margin:    13.7469 dBm

Inter. Margin:  18.9469 dBm

*****

RX Node:      Robot CAC 1

*****

Node Type:     Mesh Access Point + Gateway

Distance:      353.1809 m

Link Type:     Access Link

Link Budget

Tx type:       Client

Rx type:       Access Point

Channel:       1

Rx Power:      -92.3372 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power:     0 dBm

Grx Power:     0 dBm

Link Budget:   N-OK

Link Margin:   -10.3372 dBm

Inter. Margin: -5.1372 dBm

*****

RX Node:      Large UGV

*****

Node Type:     Mesh Access Point

Distance:      394.6746 m

Link Type:     Access Link

Link Budget

Tx type:       Client

Rx type:       Access Point

Channel:       1

Rx Power:      -119.5915 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power:     0 dBm

Grx Power:     0 dBm

Link Budget:   N-OK

Link Margin:   -37.5915 dBm

Inter. Margin: -32.3915 dBm
    
```

RX Node: Endurance UAS

Node Type: Mesh Gateway

Distance: 276.8903 m

Link Type: Dummy Link

Link Budget: Non Same Channel

RX Node: Base of Operations

Node Type: Mesh Router

Distance: 378.2944 m

Link Type: Dummy Link

Link Budget: Non Same Channel

RX Node: Human Urban SAR 1

Node Type: Station

Mode Type: Client

Distance: 434.3248 m

Link Type: Dummy Link

Link Budget

Tx type: Client

Rx type: Client

Channel: 1

Rx Power: -130.6725 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power: 0 dBm

Grx Power: 0 dBm

Link Budget: N-OK

Link Margin: -48.6725 dBm

Inter. Margin: -43.4725 dBm

```

TX Node   Endurance UAS
*****
*****
Node Type:   Mesh Gateway
Transceiver: Mesh Router 1
              TX Power:    19 dBm
              Channel:     2
Transceiver: Mesh Router 2
              TX Power:    20 dBm
              Channel:     3
Rx AZI Range: 341.6514°
Rx ELE Range: 132.9224°

*****
*****
RX Node:   Quadrotor
*****
Node Type:   Mesh Access Point
Distance:    212.6687 m
Link Type:   Mesh Link
Link Budget
              Tx type:     Mesh Router 2
              Rx type:     Mesh Router
              Channel:     3
              Rx Power:    -74.7878 dBm
              MODCOD: BPSK 1/2
              Gtx Power:   0 dBm
              Grx Power:   0 dBm
              Link Budget:  OK
              Link Margin:  7.2122 dBm
              Inter. Margin: 12.4122 dBm

*****
*****
RX Node:   FW Base of Operations
*****
Node Type:   Mesh Access Point + Gateway
Distance:    229.3369 m
Link Type:   Mesh Link
Link Budget
              Tx type:     Mesh Router 1

```

Rx type: Mesh Router 1
Channel: 2
Rx Power: -76.5512 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 5.4488 dBm
Inter. Margin: 10.6488 dBm

Link Budget

Tx type: Mesh Router 2
Rx type: Mesh Router 2
Channel: 3
Rx Power: -75.6399 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: OK
Link Margin: 6.3601 dBm
Inter. Margin: 11.5601 dBm

RX Node: Small UGV

Node Type: Mesh Access Point

Distance: 282.886 m

Link Type: Mesh Link

Link Budget

Tx type: Mesh Router 2
Rx type: Mesh Router
Channel: 3
Rx Power: -84.0094 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power: 0 dBm
Grx Power: 0 dBm
Link Budget: N-OK
Link Margin: -2.0094 dBm
Inter. Margin: 3.1906 dBm

```

RX Node:   Small Robot
*****
Node Type:   Mesh Access Point
Distance:    279.9656 m
Link Type:   Mesh Link
Link Budget
    Tx type:   Mesh Router 2
    Rx type:   Mesh Router
    Channel:    3
    Rx Power:  -83.8923 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:  0 dBm
    Grx Power:  0 dBm
    Link Budget: N-OK
    Link Margin: -1.8923 dBm
    Inter. Margin: 3.3077 dBm
*****
RX Node:   Robot CAC 2
*****
Node Type:   Mesh Access Point + Gateway
Distance:    272.8655 m
Link Type:   Mesh Link
Link Budget
    Tx type:   Mesh Router 1
    Rx type:   Mesh Router 2
    Channel:    2
    Rx Power:  -78.5135 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:  0 dBm
    Grx Power:  0 dBm
    Link Budget: OK
    Link Margin: 3.4865 dBm
    Inter. Margin: 8.6865 dBm
Link Budget
    Tx type:   Mesh Router 2
    Rx type:   Mesh Router 1
    Channel:    3
    Rx Power:  -77.6022 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    
```

```
Gtx Power:      0 dBm
Grx Power:      0 dBm
Link Budget:    OK
Link Margin:    4.3978 dBm
Inter. Margin:  9.5978 dBm

*****
RX Node:      Robot CAC 1
*****

Node Type:     Mesh Access Point + Gateway
Distance:     193.7497 m
Link Type:     Mesh Link
Link Budget

Tx type:       Mesh Router 1
Rx type:       Mesh Router 1
Channel:       2
Rx Power:      -74.6471 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  OK
Link Margin:   7.3529 dBm
Inter. Margin: 12.5529 dBm

Link Budget

Tx type:       Mesh Router 2
Rx type:       Mesh Router 2
Channel:       3
Rx Power:      -73.7358 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  OK
Link Margin:   8.2642 dBm
Inter. Margin: 13.4642 dBm

*****
RX Node:      Large UGV
*****

Node Type:     Mesh Access Point
Distance:     208.8566 m
```

Link Type: Mesh Link

Link Budget

Tx type: Mesh Router 2

Rx type: Mesh Router

Channel: 3

Rx Power: -86.5836 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power: 0 dBm

Grx Power: 0 dBm

Link Budget: N-OK

Link Margin: -4.5836 dBm

Inter. Margin: 0.6164 dBm

RX Node: Human Urban SAR 2

Node Type: Station

Mode Type: Client

Distance: 276.8903 m

Link Type: Dummy Link

Link Budget: Non Same Channel

RX Node: Base of Operations

Node Type: Mesh Router

Distance: 469.1987 m

Link Type: Mesh Link

Link Budget

Tx type: Mesh Router 1

Rx type: Mesh Router

Channel: 2

Rx Power: -84.6342 dBm

MODCOD: BPSK 1/2

Gtx Power: 0 dBm

Grx Power: 0 dBm

Link Budget: N-OK

Link Margin: -2.6342 dBm

Inter. Margin: 2.5658 dBm

```
*****
RX Node:   Human Urban SAR 1
*****

Node Type:   Station
Mode Type:   Client
Distance:    244.9845 m
Link Type:   Dummy Link
            Link Budget:   Non Same Channel

*****
*****

TX Node   Base of Operations
*****
*****

Node Type:   Mesh Router
Transceiver: Mesh Router
            TX Power:      20 dBm
            Channel:       2
Rx AZI Range: 341.6514°
Rx ELE Range: 132.9224°

*****
*****

RX Node:   Quadrotor
*****

Node Type:   Mesh Access Point
Distance:    496.9874 m
Link Type:   Mesh Link
            Link Budget:   Non Same Channel

*****
*****

RX Node:   FW Base of Operations
*****

Node Type:   Mesh Access Point + Gateway
Distance:    279.5331 m
Link Type:   Mesh Link
Link Budget
```

```

Tx type:      Mesh Router
Rx type:      Mesh Router 1
Channel:      2
Rx Power:     -77.7861 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:   0 dBm
Grx Power:   0 dBm
Link Budget:  OK
Link Margin:  4.2139 dBm
Inter. Margin: 9.4139 dBm

*****
RX Node:      Small UGV
*****
Node Type:    Mesh Access Point
Distance:     378.6582 m
Link Type:    Mesh Link
              Link Budget:  Non Same Channel

*****
RX Node:      Small Robot
*****
Node Type:    Mesh Access Point
Distance:     375.8894 m
Link Type:    Mesh Link
              Link Budget:  Non Same Channel

*****
RX Node:      Robot CAC 2
*****
Node Type:    Mesh Access Point + Gateway
Distance:     337.3106 m
Link Type:    Mesh Link
              Link Budget:  Non Same Channel

*****
RX Node:      Robot CAC 1

```

```
*****
Node Type:      Mesh Access Point + Gateway
Distance:      421.328 m
Link Type:     Mesh Link
Link Budget
    Tx type:    Mesh Router
    Rx type:    Mesh Router 1
    Channel:    2
    Rx Power:   -82.419 dBm
    MODCOD:    BPSK 1/2
    Gtx Power:  0 dBm
    Grx Power:  0 dBm
    Link Budget: N-OK
    Link Margin: -0.419 dBm
    Inter. Margin: 4.781 dBm

*****
RX Node:      Large UGV
*****
Node Type:    Mesh Access Point
Distance:    475.621 m
Link Type:   Mesh Link
    Link Budget: Non Same Channel

*****
RX Node:    Human Urban SAR 2
*****
Node Type:    Station
Mode Type:    Client
Distance:    378.2944 m
Link Type:   Dummy Link
    Link Budget: Non Same Channel

*****
RX Node:    Endurance UAS
*****
Node Type:    Mesh Gateway
Distance:    469.1987 m
```

Link Type: Mesh Link

Link Budget

Tx type: Mesh Router
 Rx type: Mesh Router 1
 Channel: 2
 Rx Power: -83.6342 dBm
 MODCOD: BPSK 1/2
 Gtx Power: 0 dBm
 Grx Power: 0 dBm
 Link Budget: N-OK
 Link Margin: -1.6342 dBm
 Inter. Margin: 3.5658 dBm

RX Node: Human Urban SAR 1

Node Type: Station
 Mode Type: Client
 Distance: 485.6874 m
 Link Type: Dummy Link
 Link Budget: Non Same Channel

TX Node Human Urban SAR 1

Node Type: Station
 Mode Type: Client
 Transceiver: Client
 TX Power: 20 dBm
 Channel: 1
 Rx AZI Range: 341.6514°
 Rx ELE Range: 132.9224°

RX Node: Quadrotor

```

Node Type:      Mesh Access Point
Distance:       40.1833 m
Link Type:      Access Link
Link Budget
    Tx type:     Client
    Rx type:     Access Point
    Channel:     1
    Rx Power:    -71.7945 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:   0 dBm
    Grx Power:   0 dBm
    Link Budget: OK
    Link Margin: 10.2055 dBm
    Inter. Margin: 15.4055 dBm

*****
RX Node:      FW Base of Operations
*****
Node Type:     Mesh Access Point + Gateway
Distance:     324.0172 m
Link Type:    Access Link
Link Budget
    Tx type:     Client
    Rx type:     Access Point
    Channel:     1
    Rx Power:    -107.3641 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:   0 dBm
    Grx Power:   0 dBm
    Link Budget: N-OK
    Link Margin: -25.3641 dBm
    Inter. Margin: -20.1641 dBm

*****
RX Node:      Small UGV
*****
Node Type:     Mesh Access Point
Distance:     440.9656 m
Link Type:    Access Link
Link Budget

```

```

Tx type:      Client
Rx type:      Access Point
Channel:      1
Rx Power:     -130.8438 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  N-OK
Link Margin:  -48.8438 dBm
Inter. Margin: -43.6438 dBm

*****
RX Node:      Small Robot
*****

Node Type:    Mesh Access Point
Distance:     437.3816 m
Link Type:    Access Link
Link Budget

Tx type:      Client
Rx type:      Access Point
Channel:      1
Rx Power:     -130.7517 dBm
MODCOD: BPSK 1/2
Gtx Power:    0 dBm
Grx Power:    0 dBm
Link Budget:  N-OK
Link Margin:  -48.7517 dBm
Inter. Margin: -43.5517 dBm

*****
RX Node:      Robot CAC 2
*****

Node Type:    Mesh Access Point + Gateway
Distance:     416.3447 m
Link Type:    Access Link
Link Budget:  Non Same Channel

*****
RX Node:      Robot CAC 1

```

```
*****
Node Type:      Mesh Access Point + Gateway
Distance:      83.3825 m
Link Type:     Access Link
Link Budget
    Tx type:    Client
    Rx type:    Access Point
    Channel:    1
    Rx Power:   -97.0373 dBm
    MODCOD:    BPSK 1/2
    Gtx Power:  0 dBm
    Grx Power:  0 dBm
    Link Budget: N-OK
    Link Margin: -15.0373 dBm
    Inter. Margin: -9.8373 dBm

*****
RX Node:      Large UGV
*****
Node Type:      Mesh Access Point
Distance:      44.7937 m
Link Type:     Access Link
Link Budget
    Tx type:    Client
    Rx type:    Access Point
    Channel:    1
    Rx Power:   -69.6258 dBm
    MODCOD:    BPSK 1/2
    Gtx Power:  0 dBm
    Grx Power:  0 dBm
    Link Budget: OK
    Link Margin: 12.3742 dBm
    Inter. Margin: 17.5742 dBm

*****
RX Node:      Human Urban SAR 2
*****
Node Type:      Station
Mode Type:     Client
Distance:      434.3248 m
```

```

Link Type:      Dummy Link
Link Budget
    Tx type:      Client
    Rx type:      Client
    Channel:      1
    Rx Power:     -130.6725 dBm
    MODCOD: BPSK 1/2
    Gtx Power:    0 dBm
    Grx Power:    0 dBm
    Link Budget:  N-OK
    Link Margin:  -48.6725 dBm
    Inter. Margin: -43.4725 dBm

*****
RX Node:      Endurance UAS
*****
Node Type:    Mesh Gateway
Distance:     244.9845 m
Link Type:    Dummy Link
    Link Budget:  Non Same Channel

*****
RX Node:      Base of Operations
*****
Node Type:    Mesh Router
Distance:     485.6874 m
Link Type:    Dummy Link
    Link Budget:  Non Same Channel

*****

```

Tabla 7: Log completo de resultados de balance de enlace

REFERENCIAS

- [1] J. Bicket, S. Biswas, D. Aguayo, y R. Morris, “Architecture and evaluation of an unplanned 802.11b mesh network,” en Proc. of ACM MOBICOM '05, 2005.
- [2] “Rice university Taps Project” – Disponible online: <http://taps.rice.edu>
- [3] A. Raniwala y T. Chiueh, “Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network,” en Proc. of IEEE INFOCOM '05, vol. 3, pp. 2223-2234, 2005.
- [4] D. Wu, D. Gupta, S. Liese, y P. Mohapatra “QuRiNet: Quail ridge reserve wireless mesh network,” en Proc. of the First ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Charecterization (WinTECH 2006).
- [5] J. Garcia-Luna-Aceves, C. Fullmer, E. Madruga, D. Beyer, y T. Frivold, “Wireless internet gateways (wings),” en Proc. of IEEE MILCOM, 1997.
- [6] I. F. Akyildiz, X. Wang, y W. Wang, “Wireless mesh networks: A survey,” Computer Networks Journal (Elsevier), Marzo 2005.
- [7] “Strix systems” - Disponible online: <http://www.strixsystems.com>
- [8] “Belair networks” - Disponible online: <http://www.belairnetworks.com>
- [9] “Tropos” - Disponible online: <http://www.tropos.com>
- [10] “Firetide” - Disponible online: <http://www.firetide.com>
- [11] G. Bianchi. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. IEEE J. Select. Areas Commun., 18(3):535–547, Marzo 2000.
- [12] D. Gu and J. Zhang. A new measurement-based admission control method for IEEE 802.11 wireless local area networks. In Proc. of IEEE PIMRC'03, pages 2009–2013, Beijing, China, Sept. 2003.
- [13] J. Hui and M. Devesikiotis. Performance analysis of IEEE 802.11e EDCA by a unified model. In Proc. of IEEE Globecom' 04, pages 754–759, Dallas, Texas, Nov. 2004.
- [14] Z. Kong, D. Tsang, and B. Bensaou. Measurement-assisted model-based call admission control for IEEE 802.11e WLAN contention-based channel access. In Proc. of IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks, pages 55–60, Apr. 2004.
- [15] A. Zemlianov and G. de Veciana. Capacity of ad hoc wireless networks with infrastructure support. IEEE J. Select. Areas Commun., 23(3):657–667, Mar. 2005.

- [16] Aggeliki Sgora, Dimitris D. Vergados, y Periklis Chatzimisios, "IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks: Challenges and Perspectives", Paper 2009
- [17] Draft Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Amendment: ESS Mesh Networking, IEEE Unapproved draft P802.11s/D2.02 (September 2008)
- [18] Hiertz, G.R., Max, S., Zhao, R., Denteneer, D., Berlemann, L.: Principles of IEEE 802.11s. In: 16th IEEE International Conference Computer Communications and Networks, Honolulu, Hawaii, USA, pp. 1002–1007 (2007)
- [19] Akyildiz, I.F., Wang, X., Wang, W.: A Survey on Wireless Mesh Networks. *Computer Networks* 47(4), 445–487 (2005)
- [20] E. Liu and K. K. Leung, "Fair resource allocation under rayleigh and/or rician fading environments," in Proc. IEEE PIMRC, Cannes, France, September 2008.
- [21] Y. Gao, D-M. Chiu, and J. C. S. Lui, "Determining the end-to-end throughput capacity in multi-hop networks: methodology and applications," SIGMetrics/Performance, Saint Malo, France, June 2006.
- [22] T.S. Rappaport and L.B. Milstein, "Effect of Radio Propagation Path Loss on DSCDMA Cellular Frequency Reuse Efficiency for the Reverse Channel," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, VT-48, 5, August 1999, pp. 1451 – 1452.
- [23] H. Xia, H.L. Bertoni, L.R. Maciel, A. Lindsay-Stewart, and R. Rowe, "Radio Propagation Characteristics for Line-of-Sight Microcellular and Personal Communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-41, 10, October 1993, pp. 1439 – 1447.
- [24] S. Y. Seidel, and T. S. Rappaport, "914 MHz Path Loss Prediction Models for Indoor Wireless Communications in Multifloored Buildings," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 40, no. 2, February 1992, pp. 207 – 217.
- [25] G.D. Durgin, T. S. Rappaport, and H. Xu, "Measurements and Models for Radio Path Loss and Penetration Loss In and Around Homes and Trees at 5.85 GHz," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 46, no. 11, November 1998, pp. 1484 – 1496.
- [26] S. R. Saunders, and F. R. Bonar, "Prediction of Mobile Radio Wave Propagation Over Buildings of Irregular Heights and Spacings," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 2, Feb. 1994, pp. 137 – 144.
- [27] "WorldWind SDK" - Disponible online: <http://worldwind.arc.nasa.gov/java/>
- [28] "Librerías GraphStream" – Disponible online: <http://graphstream-project.org/>
- [29] "Librería JGraphT" – Disponible online: <http://jgrapht.org/>
- [30] "Proyecto Icarus FP7": <http://www.fp7-icarus.eu/>