



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Estudio del Modelamiento de un Enjambre de RPAs mediante una Red Ad Hoc para
Sistemas de Vigilancia y Reconocimiento en el Centro de Investigación y Desarrollo FAE**

Paste Lasluisa, Daniel Mauricio

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Maestría en Electrónica y Automatización Mención Redes Industriales

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Magíster en Electrónica y
Automatización Mención Redes Industriales

Ing. Rivas Lalaleo, David Raimundo PhD

30 de septiembre del 2022

Latacunga



Reporte de Verificación de Contenido

COPYLEAKS

Tesis Maestria PASTE LASLUIA DANIEL MAURICIO .pdf

Scanned on: 12:27 September 30, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	4414
Words with Minor Changes	1846
Paraphrased Words	2076
Omitted Words	0

Firma:



Firma de este documento por:
DAVID
RAIMUNDO
RIVAS LALALEO

Ing. Rivas Lalaleo, David Raimundo PhD

Director

C.C.: 1802445302



Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, “**Estudio del Modelamiento de un Enjambre de RPAs mediante una Red Ad Hoc para Sistemas de Vigilancia y Reconocimiento en el Centro de Investigación y Desarrollo FAE**” fue realizado por el señor **Paste Lasluisa, Daniel Mauricio**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 20 de septiembre de 2022

Firma:



firmado electrónicamente por:
DAVID
RAIMUNDO
RIVAS LALALEO

Ing. Rivas Lalaleo, David Raimundo PhD

Director

C.C.: 1802445302



Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Responsabilidad de Autoría

Yo **Paste Lasluisa, Daniel Mauricio**, con cédula de ciudadanía n° 0503354805, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Estudio del Modelamiento de un Enjambre de RPAs mediante una Red Ad Hoc para Sistemas de Vigilancia y Reconocimiento en el Centro de Investigación y Desarrollo FAE”** es de mí autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 20 septiembre de 2022

Firma (s)

Paste Lasluisa, Daniel Mauricio

C.C.: 0503354805



Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Autorización de Publicación

Yo **Paste Lasluisa, Daniel Mauricio**, con cédula de ciudadanía n° 0503354805, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Estudio del Modelamiento de un Enjambre de RPAs mediante una Red Ad Hoc para Sistemas de Vigilancia y Reconocimiento en el Centro de Investigación y Desarrollo FAE”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 20 de septiembre de 2022

Firma (s)

Paste Lasluisa, Daniel Mauricio

C.C.: 0503354805



Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Dedicatoria

Dedico mi tesis la cual he llegado a su culminación con esfuerzo y dedicación primeramente A. DIOS quien ha permitido que tome los pasos correctos en toda mi vida y ha permitido que tenga una vida llena de alegría, a niño de Isinche, quien me brindo sus bendiciones siempre, quienes inspiraron mi espíritu para la conclusión de esta tesis de posgrado, en Electrónica y Automatización, a la virgen de la Merced, quien me ha cuidado siempre. A mis padres quienes me dieron la vida, educación, apoyo y consejos. A mis compañeros de estudio, a mis maestros y amigos, quienes sin su ayuda nunca hubiera podido hacer esta tesis. A todos ellos se los agradezco desde el fondo de mi alma. Para todos ellos hago esta dedicatoria y además de agradecerles todo en cuanto me han ayuda y guiado en toda la carrera.

Latacunga, 20 de septiembre de 2022



Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Agradecimiento

Emito mi agradecimiento por mi tesis la cual he llegado a su culminación con esfuerzo y dedicación primeramente A. DIOS quien ha permitido que tome los pasos correctos en toda mi vida y ha permitido que tenga una vida llena de alegría, a niño de Isinche, quien me brindo sus bendiciones siempre, quienes inspiraron mi espíritu para la conclusión de esta tesis, en Electrónica y Automatización, a la virgen de la Merced, quien me a cuida siempre. A mis padres quienes me dieron la vida, educación, apoyo y consejos. A mis compañeros de estudio, a mis maestros y amigos, quienes sin su ayuda nunca hubiera podido hacer esta tesis. A todos ellos se los agradezco desde el fondo de mi alma. Para todos ellos hago este agradecimiento.

Latacunga, 20 de septiembre de 2022

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Cátula.....	1
Reporte de Verificación de Contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Indice de contenidos	8
Indice de figuras	11
Indice de tablas	14
Capítulo I : Aspectos Generales	15
Resumen	15
Abstract.....	16
Antecedentes.....	17
Justificación	19
Objetivos	22
<i>Objetivo General</i>	22
<i>Objetivos específicos</i>	22
Hipótesis	23
Capitulo II : Fundamentos teóricos	24
UAV	24

Tipos de UAV	24
Elementos que conforman a un UAV.....	32
Enjambre de UAVs	38
Protocolos de comunicación.....	40
Estación de control en tierra	41
Red Ad Hoc	42
Clasificación de redes Ad Hoc	43
Aplicaciones de las Redes AD HOC	44
Capitulo III : Dimensionamiento y desarrollo	48
Dimensionamiento del sistema	48
Simuladores de red.....	49
Software de planificación, control y seguimiento de misiones	53
Actividad de uso de los RPAs	54
Selección del tipo de RPAs.....	56
Configuración del enjambre de RPAs y número de RPAs.....	59
Condiciones de vuelo	61
Capitulo IV : Metodología.....	62
Tipo de investigación.	62
Entorno de comunicación de los drones.....	63
Velocidades de procesamiento	79
Hardware (tarjetas comunicación y controladoras)	81

Evaluación de protocolos de comunicación	87
Selección del protocolo de comunicación.....	126
Capítulo V : Analisis y Resulatados	143
Resultados	143
Análisis de los resultados de simulación.	144
Análisis de rendimiento de la red	145
Análisis de la tasa de entrega de paquetes (packet delivery ratio, PDR).	148
Análisis del retardo extremo a extremo	151
Capítulo VI : Conclusiones y recomendaciones.....	155
Conclusiones.....	155
Recomendaciones	156
Bibliografía:	158

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Esquema general de un sistema de UAVs</i>	22
Figura 2	<i>Vista de un UAV de Ala Fija</i>	27
Figura 3	<i>Vista de un UAV de ala rotatoria o multi rotores</i>	28
Figura 4	<i>Vista de un UAV Tricóptero</i>	29
Figura 5	<i>Vista de un UAV Cuadricóptero</i>	29
Figura 6	<i>Vista de un UAV Hexacóptero</i>	30
Figura 7	<i>Vista de un UAV Octocóptero</i>	31
Figura 8	<i>Vista de un UAV Coaxial</i>	32
Figura 9	<i>Vista del Subsistema mecánico</i>	33
Figura 10	<i>Tipos de motores de uso civil</i>	34
Figura 11	<i>Vista de la fuente de energía</i>	34
Figura 12	<i>Vista de la controladora de vuelo</i>	36
Figura 13	<i>Vista del Subsistema de comunicación</i>	38
Figura 14	<i>Vista de un enjambre de RPAs</i>	39
Figura 15	<i>Vista de una Estación en tierra</i>	42
Figura 16	<i>Vista de una Red ADHOC</i>	43
Figura 17	<i>Vista de una Red ADHOC tipo Malla</i>	44
Figura 18	<i>Vista de las aplicaciones de la Red AdHoc</i>	46
Figura 19	<i>Vista de una red AdHoc del tipo Fanet</i>	47
Figura 20	<i>Vista aérea de las instalaciones del aeropuerto CIDFAE</i>	55
Figura 21	<i>Delimitación de la zona perteneciente al aeropuerto</i>	56
Figura 22	<i>Tipos de formaciones de enjambres de RPAs</i>	60
Figura 23	<i>Diagrama de la interacción entre UAVs</i>	64
Figura 24	<i>Interacción Maestro Esclavo</i>	67
Figura 25	<i>Máquina de estados del enjambre de UAVs</i>	69

Figura 26	<i>Algoritmo de despegue propuesto</i>	75
Figura 27	<i>Algoritmo de vuelo</i>	77
Figura 28	<i>Vista de Modulo ESP32</i>	81
Figura 29	<i>Vista del Módulo ESP8266</i>	83
Figura 30	<i>Vista de los elementos que integran la red Ad Hoc en el software OPNET</i>	88
Figura 31	<i>Protocolo AODV con el protocolo físico Salto de frecuencia</i>	90
Figura 32	<i>Protocolo AODV con el protocolo físico Frecuencia Directa</i>	91
Figura 33	<i>Protocolo AODV con el protocolo físico Infrared</i>	92
Figura 34	<i>Protocolo AODV con el protocolo físico OFDM (802.11a)</i>	93
Figura 35	<i>Protocolo AODV con el protocolo físico Tarifa extendida PHY (802.11g)</i>	94
Figura 36	<i>Protocolo DSR con el protocolo físico Salto de frecuencia</i>	98
Figura 37	<i>Protocolo DSR con el protocolo físico Secuencia directa</i>	99
Figura 38	<i>Protocolo DSR con el protocolo físico Infrared</i>	100
Figura 39	<i>Protocolo DSR con el protocolo físico OFDM (802.11a)</i>	101
Figura 40	<i>Protocolo DSR con el protocolo físico Tarifa extendida PHY (802.11g)</i>	102
Figura 41	<i>Protocolo OLSR con el protocolo físico Salto de frecuencia</i>	106
Figura 42	<i>Protocolo OLSR con el protocolo físico Secuencia directa</i>	107
Figura 43	<i>Protocolo OLSR con el protocolo físico Infrared</i>	108
Figura 44	<i>Protocolo OLSR con el protocolo físico OFDM (802.11a)</i>	109
Figura 45	<i>Protocolo OLSR con el protocolo físico Tarifa extendida PHY (802.11g)</i>	110
Figura 46	<i>Protocolo TORA con el protocolo físico Salto de frecuencia</i>	113
Figura 47	<i>Protocolo TORA con el protocolo físico Secuencia directa</i>	114
Figura 48	<i>Protocolo TORA con el protocolo físico Infrared</i>	115
Figura 49	<i>Protocolo TORA con el protocolo físico OFDM (802.11a)</i>	116
Figura 50	<i>Protocolo TORA con el protocolo físico Tarifa extendida PHY (802.11g)</i>	117
Figura 51	<i>Protocolo GRP con el protocolo físico Salto de frecuencia</i>	120

Figura 52	<i>Protocolo GRP con el protocolo físico Secuencia directa</i>	121
Figura 53	<i>Protocolo GRP con el protocolo físico Infrared</i>	122
Figura 54	<i>Protocolo GRP con el protocolo físico OFDM (802.11a)</i>	123
Figura 55	<i>Protocolo GRP con el protocolo físico Tarifa extendida PHY (802.11g)</i>	124
Figura 56	<i>Implementación de la red AD HOC en el software matlab</i>	131
Figura 57	<i>Distancia total en cada ruta vinculada con saltos = 2</i>	132
Figura 58	<i>Consumo de energía para diferentes tasas de transferencia de datos</i>	133
Figura 59	<i>Gráfico de vida útil de la red para diferentes tasas de transferencia de datos</i>	134
Figura 60	<i>Gráfico de rendimiento de la red</i>	135
Figura 61	<i>Grafica de Tasa de Error de Paquetes para un canal vehicular</i>	137
Figura 62	<i>Gráfica de la relación rendimiento - SNR</i>	138
Figura 63	<i>Diagrama de constelación</i>	139
Figura 64	<i>Cuadro de recursos PUSCH EVM</i>	140
Figura 65	<i>Gráfico de seguimiento de vuelo del enjambre de UAVs</i>	141
Figura 66	<i>Gráfico de datos de posicionamiento del enjambre de UAVs</i>	142
Figura 67	<i>Evaluación del Rendimiento de la red con el Protocolo de enrutamiento AODV</i> ...	146
Figura 68	<i>Evaluación del Rendimiento de la red con el Protocolo de enrutamiento DSDV</i> ...	147
Figura 69	<i>Evaluación del Rendimiento de la red con el Protocolo de enrutamiento OLSR</i>	148
Figura 70	<i>Porcentaje de entrega de paquetes con el Protocolo de enrutamiento AODV</i>	149
Figura 71	<i>Porcentaje de entrega de paquetes con el Protocolo de enrutamiento DSDV</i>	150
Figura 72	<i>Porcentaje de entrega de paquetes con el Protocolo de enrutamiento OLSR</i>	151
Figura 73	<i>Retardo extremo a extremo con el Protocolo de enrutamiento AODV</i>	152
Figura 74	<i>Retardo extremo a extremo con el Protocolo de enrutamiento DSDV</i>	153
Figura 75	<i>Retardo extremo a extremo con el Protocolo de enrutamiento OLSR</i>	154

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Clasificación de los UAVs en función del método de sustentación utilizado.....</i>	26
Tabla 2	<i>Autopilotos más populares del mercado</i>	37
Tabla 3	<i>Clasificación de protocolos de enrutamiento de red ad hoc</i>	40
Tabla 4	<i>Metodológica para implementación de una red para un enjambre de RPAs</i>	48
Tabla 5	<i>Características de los simuladores de red</i>	52
Tabla 6	<i>Comparación de los programas de control para UAVs más usados.....</i>	54
Tabla 7	<i>Características de los Drones y UAV UX5, ALTI Transition, tabla de ponderación.</i>	58
Tabla 8	<i>Condiciones de vuelo.....</i>	61
Tabla 9	<i>Comparativa de características entre tarjeta ESP32 y ESP8266.....</i>	85
Tabla 10	<i>Características de los distintos tipos de estándar 802.11.....</i>	127
Tabla 11	<i>Parámetros de configuración para las simulaciones realizadas.....</i>	144

Capítulo I

Aspectos generales

Resumen

Los UAV tienen experimentado un desarrollo significativo; debido al avance tecnológico continuo durante los últimos años; tanto en el campo de las operaciones militares como en el alcance de aplicaciones civiles; esperamos que en el futuro cercano sea un 33 por ciento de los UAVs militares no estarán ocupados por tripulantes; su uso implicará algunas ventajas y desventajas, que deben ser analizadas por el comandante de teatro de operaciones, su incorporación a las fuerzas armadas es un desafío y una oportunidad de trabajo en el campo de la seguridad. Por lo que los vehículos aéreos no tripulados ya están siendo usados en maniobras militares se vio este proyecto como una alternativa de investigación, lo que lleva a la necesidad de que no solo un UAV realice maniobras militares, sino que sea un grupo de ellos para poder realizar tareas de una manera rápida y con mayor exactitud, además de evitar que el personal militar este inmerso en ambientes peligrosos. Para lo cual se pretende crear una red de ADHOC para un enjambre de RPAs para lo que se va a realizar la modelación de la red del enjambre de RPAs, además que el enjambre de RPAs estará formado en una red Ad Hoc por brindar características de que es un conjunto de redes donde todos los nodos tienen el mismo estado dentro de la red y son libres de asociarse con cualquier otro dispositivo inmerso en redes del mismo tipo dentro del rango de enlace, por lo que se tendrá la particularidad de que si el maestro de la red pierde la conexión cualquiera de los otros RPAs puede suplirlo evitando que toda la red se pierda. Las redes Fanet en la actualidad no poseen un protocolo de enrutamiento certificado por lo que, usan los protocolos de enrutamiento de pertenecientes a las redes Manet.

Palabras Clave: UAV, Enjambre de RPAs, Red Ad hoc, Fanet

Abstract

UAVs have undergone significant development; due to continuous technological advancement during the last few years; both in the field of military operations and in the scope of civil applications; we expect that in the near future 33 percent of military UAVs will be unmanned; its use will imply some advantages and disadvantages, which must be analyzed by the commander of the theater of operations, its incorporation into the armed forces is a challenge and a job opportunity in the field of security. Due to the fact that unmanned aerial vehicles are already being used in military maneuvers, this project was seen as a research alternative, which leads to the need for not only a UAV to carry out military maneuvers, but also a group of them to be able to perform tasks quickly and with greater accuracy, in addition to preventing military personnel from being immersed in dangerous environments. For which it is intended to create an ADHOC network for a swarm of RPAs for which the modeling of the RPA swarm network will be carried out, in addition to the fact that the RPA swarm will be formed in an Ad Hoc network to provide characteristics that is a set of networks where all nodes have the same status within the network and are free to associate with any other device immersed in networks of the same type within the link range, so it will have the peculiarity that if the master of the network loses the connection, any of the other RPAs can supply it, preventing the entire network from being lost. Fanet networks currently do not have a certified routing protocol, so they use the routing protocols belonging to Manet networks.

Keywords: UAV, RPA Swarm, Ad hoc Network, Fanet

Antecedentes

Los robots aéreos son más conocidos por la comunidad científica como UAV (Unmanned Aerial Vehicle), vehículos aéreos no tripulados controlados por radio control o por un programa previamente cargado. Mientras que los robots y los helicópteros tripulados tienen serios inconvenientes, debido principalmente a las limitaciones físicas de los pilotos y a la restricción de no poner en peligro sus vidas con ciertas operaciones, a los UAVs se le puede encargar una serie de actividades para que las ejecute. Indistintamente la ilusión de volar debe de estar presentes siempre las personas, el vuelo sin tripulantes es una evolución de las áreas de vuelo ejecutadas de manera tradicional. En la evolución de esta técnica, su desarrollo principal fue promovido en aplicaciones militares donde el UAV se destaca en áreas en reconocimiento aéreo, vigilancia aérea, adquisición objetiva, evaluación de daños, investigación y rescate en áreas de combate, etc. (Silva Bohórquez et al., 2014) Sin embargo, de forma paralela a este renovamiento se diseñó menos aplicativos de menos peligrosidad, esencialmente en las áreas de reconocimiento del aire e incluso la exploración espacial. Se puede considerar también que los UAV de la misma manera sobresalen en otras actividades, como ayuda en entrega de artículos o materiales en áreas de difícil acceso, investigación y rescate, turismo, ocio, etc. Además de esto ya hay disponible dos tipos principales de UAV, los cuales se los puede clasificar de acuerdo al método de control de estos dispositivos, para que tengamos un UAV controlado de manera remota desde un control en mar, tierra o UAVs autocontrolados, que anteriormente están programados para que responda ente el medio ambiente y de la misma forma interactuar con él.

Los tipos de drones más populares debido al tipo de sustentación son los aerodinos que por sus características en el manejo de rotores o hélices son más utilizados que los aerostatos, por lo que se hace referencia exclusivamente a los aerodinos, los cuales pueden ser clasificados en tres grandes áreas: ala fija, ala rotatoria e híbridos(González, 2017). En la

actualidad el uso de drones tiene una frecuencia mayor en tareas de gran importancia para los países del mundo como se puede indicar a continuación en las siguientes tareas: El uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) o drones en la agricultura se está extendiendo a un ritmo acelerado, se estima que actualmente el sector agrícola es el séptimo mayor usuario de drones en el mundo y en los próximos cinco años llegara a ser el segundo (Bustamante & Jiménez, 2019). Los vehículos aéreos no tripulados han experimentado un importante desarrollo; debido al continuo avance tecnológico en los últimos años; tanto en el ámbito de operaciones militares como en el ámbito de aplicaciones civiles; se prevé que, en un futuro cercano, un tercio de las aeronaves militares serán no tripuladas; su uso conllevará ciertas ventajas y desventajas, que deberán ser analizadas por el Comandante de un Teatro de Operaciones, su incorporación en las Fuerzas Armadas constituye un reto y una oportunidad para su empleo en el ámbito de la seguridad. (Baquero Montoya & Vásquez Briones, 2019). Actualmente actividad primordial para lo cual los drones de alto rendimiento son usados es el centrado en el campo militar, de manera principal en las misiones de reconocimiento y vigilancia, y en algunas circunstancias para el ataque.(Márquez Díaz, 2018).

En la actualidad usar los sistemas multi-UAV en la esfera civil experimentan un aumento significativo, por lo que brinda importantes logros que trae este tipo de sistema. Ya que usar un gran número de aeronaves permite aumentar significativamente el grado de eficiencia y seguridad durante la ejecución de misiones con altos grados de complejidad, lo que aumenta los límites impuestos por un solo dron. (Santana Cruz, 2017). Este es el objetivo esencial del TFG el diseñar un método de comunicación para la escuadra de UAVs incluyendo, por una parte, la comunicación del controlador de vuelo perteneciente a cada uno de los UAV con una ventaja que regula la misión y, por otro parte, la comunicación de dicha PC con una estación en tierra u otros UAVs. Para lograr cumplir con el objetivo es esencial poder realizar pruebas para la verificación correcta de las tareas con facilidad y seguridad, además de la operación correcta

de los diferentes dispositivos que están integrados el sistema. (Jiménez, 2019). Por lo que un antecedente de trascendencia que se observó en la aplicación de enjambres de UAVs en el mundo son que los drones o vehículos aéreos no tripulados (UVA, por sus siglas en inglés, Unmanned Aerial Vehicle) llegan a Colombia a través de las Fuerzas Militares y de Policía debido al interés del gobierno por incrementar su uso en el mantenimiento de la seguridad, la lucha contra el terrorismo y el narcotráfico. Esto con el fin de disminuir los factores de riesgo en escenarios en que se llegase a atentar contra la soberanía o la seguridad ciudadana, especialmente en aquellos lugares de alta presencia poblacional, como las ciudades capitales; que en este caso se focalizan en la ciudad de Bogotá (Carrillo Peña, 2018).

Otra perspectiva de trascendencia del proyecto es el tener la virtualización como en este ejemplo nos explica que la virtualización como estrategia comercial se usa nuevamente, como causa de esto se puede observar una producción efectiva, ahorro de energía, reducción de componentes electrónicos, recuperación rápida de datos y eficiencia en los procesos diarios de las empresas. (Lima-Morales et al., 2018). Por lo tanto, de acuerdo a los antecedentes obtenidos de trabajos realizados el proyecto se basará en el modelamiento de una red Ad Hoc de un enjambre de UAVs en entornos virtuales para la seguridad y vigilancia de las fronteras de Ecuador. (García-Aunon et al., 2020).

Justificación

Acortar las actividades de vigilancia de fronteras, reducción de los costos por tarea y eliminación de riesgos físicos para el personal militar en la tarea de vigilancia de fronteras lleva al personal militar que incursionen en caminos por varias horas a la vez que puedan ser atacados en su labor. Por lo que se vio como alternativa de solución a esta problemática la modelación de la red de un enjambre de UAVs los cuales ayuden en la vigilancia y

reconocimiento para que en lo posterior se realice una implementación física basada en este estudio de la investigación.

Para la realización de este proyecto se tiene que realizar un estudio muy minucioso en cada una de los elementos que conforman la red tanto en la parte de comunicación de los dispositivos, como en las características físicas que se tienen que tener en cuenta para el modelamiento por lo que se divide en tres puntos destacados para la modelación.

a. Selección de dispositivos: para la selección de dispositivos es el punto más importante en el modelamiento del proyecto por lo que es de aquí de donde se parte para poder realizar un modelamiento óptimo.

En primera instancia se seleccionará los UAVs y cada uno de los componentes que serán necesarios para que puedan tener una operación autónoma al modelar la red, por lo que como primer paso se tiene que delimitar en que actividad se va usar los UAVs, como en nuestro caso es para actividades militares esencialmente en vigilancia y reconocimiento, como segundo paso la selección del tipo de UAVs de acuerdo a la actividad en que se lo va usar, en donde se debe identificar claramente las características de cada uno de los UAVs existentes, tercer paso la configuración del enjambre que se va modelar las configuraciones de UAVs que se puede realizar depende al número de UAVs que se tiene para poder conformar la red que en este caso son 6 dispositivos, paso 4 es la determinación del software de modelación para la virtualización de la red a la vez que se delimitara cada uno de los protocolos a ser usados en el modelamiento de la red, paso 5 es el vuelo del enjambre en donde se verifica las diferentes formas para poder escoger la mejor de acuerdo a la actividad a realizar además que unos puntos importantes en este paso para poder saber el alcance del enjambre son la señal y el tráfico de datos para tener la mejor funcionalidad.

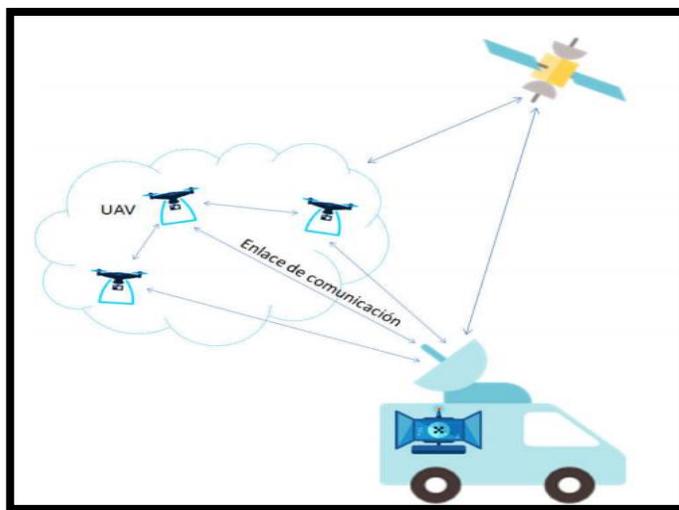
- b. Modelado de la red:** para el modelamiento se tiene que considerar tanto las características de los elementos de la red como los protocolos de comunicación por lo que se tendrá los diferentes valores de velocidad de conexión entre los UAVs del enjambre, tipo de configuración del enjambre, protocolos de comunicación de los UAVs del enjambre, duración de las baterías para determinar la autonomía de vuelo para cumplimiento de la misión, tipo de conectividad para mantener una buena supervisión y control del enjambre, el tipo de red a ser usada será una red Ad Hoc por brindar características que nos permitirá tener una red robusta y en lo cual se basa el estudio de este modelamiento.
- c. Evaluación del sistema:** Los criterios que se tomarán en cuenta para la evaluación serán los siguientes: a) Tasa de entrega de paquetes: es considerada como la cantidad de paquetes de datos enviados con relación a los entregados; b) Rendimiento de red: estos son paquetes exitosos enviados a través de un canal de comunicación en un determinado tiempo y c) Retardo de comunicación: este es el tiempo que lleva lograr que la información enviada desde un nodo principal llegue a su destino. Estos criterios se consideran para la evaluación de la red porque nos brindaran información destacada de la eficacia y la calidad de la red a ser estudiada, además que determina cuál de los protocolos es el que posee las características necesarias para implementarlo en la red física en posteriores estudios.

Este método de simulación nos brinda múltiples ventajas para el la realización de análisis de la red, características como la capacidad de modificación de parámetros generalizados que ayudan a desarrollar situaciones construidas y así poder evaluar en diferentes etapas para la red ADHOC. El conjunto considerado para operar en la línea de vista al menos distancias de 500 metros donde se realizarán los diversos cambios de topología en la red dentro del territorio que consta aeropuerto perteneciente al CIDFAE.

En la siguiente figura 1 que se encuentra la red a ser modelada.

Figura 1

Esquema general de un sistema de UAVs



Nota. Vista de una red de enjambre de UAVs físicamente. (Santana Cruz, 2017)

Objetivos

Objetivo General

Modelar una red Ad Hoc de un enjambre de RPAs para el sistema de seguridad y reconocimiento en el Centro de Desarrollo e Investigación de la Fuerza Aérea Ecuatoriana.

Objetivos específicos

- Investigar en bases de datos científicas sobre vigilancia de territorios, configuración de enjambres, tarjetas controladores y protocolos de comunicación con RPAs con la finalidad de ser usados en el estudio.

- Seleccionar las características físicas, tarjetas de control, protocolos de comunicación a ser usados en el modelamiento del enjambre de RPAs.
- Desarrollo del modelo experimental de la red Ad Hoc en base a los elementos seleccionados.
- Evaluar los resultados obtenidos en la fase experimental y obtener el modelo óptimo.

Hipótesis

El modelamiento de la red del enjambre de RPAs podrá ser integrada en sistemas de vigilancia y reconocimiento mejorando las maniobras militares ejecutadas por el Centro de Investigación y Desarrollo de las Fuerzas Armadas.

Capítulo II

Fundamentos teóricos

UAV

Un vehículo aéreo que no posee tripulación, un dispositivo el cual se controla de manera remota (RPA) o un dron generalmente llamado de esta forma es un aeroplano dirigido desde una estación de control que generalmente se encuentra en tierra. Otra de sus características, es que el modo de control vuelo no estrictamente sea de manera manual, lo que brinda que sean vuelos asistidos o vuelos automáticos, porque una medida de la seguridad que debe de existir es que posea una vigilancia continua para controlar el ejercicio ante los casos de colisión. La principal contabilidad de los vehículos aéreos no tripulados, debido a los efectos del aeronáutico estadounidense, por lo tanto, siguiendo el ejemplo, Organización Internacional de Aviación Civil (ICAO) considera la creación de estos aviones con estándares de seguridad. La causa antes mencionada condujo a la modificación de la definición de la aeronave, por lo cual ya se toman en cuenta a los VANTs dentro de la misma. (SUQUI CONGACHA & PAREDES CARRILLO, 2019).

Tipos de UAV

Tipos de drones por definición

Un dron es un aeroplano sin tripulación a bordo que se es administrada por un acceso remoto. Aunque la definición principal es esta, tenemos varios conceptos que ayudan para la denominación de este tipo de aeroplanos:

- RPA o RPAS, son el acrónimo en inglés Remotely Piloted Aircraft y Remotely Piloted Aircraft System. Esta definición se relaciona con el comando del aeroplano a distancia.
- Dron, el nombre mayormente usado entre las personas que se encuentran en este ambiente cuando se refieren a aeroplanos sin tripulación a bordo. Su origen viene del acrónimo en inglés Drone, que significa zángano.
- UAV o UAS, acrónimo de inglés de Unmanned Aerial Vehicle y Unmanned Aerial System. La definición tiene como referencia en que no existe un piloto físico a bordo del aeroplano. Un dron es una aeronave no tripulada que se maneja a través de un control remoto. Aunque esta es la definición general, existen diferentes conceptos para referirnos a esta clase de aeroplanos:

Ya que se tiene una mayor variedad de UAVs en el mercado y varias misiones que pueden realizar, no hay una clasificación estricta normalizada, pero varias taxonomías que es habitual para las personas que lo rodean confundirse. Varias técnicas los clasifican de acuerdo al uso que le dan en:

Este criterio de clasificación reúne a los UAVs en dos grupos mayores, en uno de ellos hay todos aerodinámicos (aeroplano más pesado que el aire) y en un segundo grupo los aerostatos (los aeroplanos que tienen una suspensión en el aire debido al uso de un gas más liviano que el mismo aire). La Tabla 1 indica la clasificación en un diagrama. (Santana Cruz, 2017)

Tabla 1

Clasificación de los UAVs en función del método de sustentación utilizado

UAVs	
Aerodinos	Aerostatos
Ala fija	Globo Aerostático
Ala rotatoria	Dirigible
Híbrido	

Nota. Tipos de UAVs de acuerdo al método de sustentación utilizado (Santana Cruz, 2017)

La clasificación principal para los tipos de drones depende de la función de estar basada en el aire. El tipo de autorización práctica también variará de esta característica. que el piloto tendrá que hacer para permitir. Hoy hay dos tipos: drones de ala fija y drones multirotor.

- **Drones de ala fija.** Estos aeroplanos necesitan una velocidad de vuelo inicial para que puedan basarse en el aire. No pueden despegar solos, por lo necesitan de una persona o de un mecanismo que los arroje hacia él aire. De forma estructural están más cerca de un aeroplano común. La aerodinámica de este tipo de dron les ofrece una excelente autonomía de vuelo; pueden volar durante varias horas, por esta razón son los indicados para tareas de vigilar y tomar datos de superficies de gran tamaño. En la figura 2 podemos observar un UAV de ala fija.

Figura 2

Vista de un UAV de Ala Fija



Nota. UAV de la fija en vuelo. (Rodriguez, 2020)

- **Drones de ala rotatoria o multirrotores.** Son de los aeroplanos no pilotados que se venden de gran manera en el mercado y son comunes entre las personas. Estos drones reciben el apoyo gracias a la propulsión que se incorporó en los extremos de cada brazo. Las hélices que lo conforman esta impulsada por un motor y brinda una estabilidad en el vuelo. En comparativa con los drones de ala fija, los multi rotores aún pueden sobrevolar en el mismo lugar permanentemente. En el conjunto de drones de ala rotatoria, se agrupan en subcategorías de acuerdo al número de brazos o motores que tienen. En la figura 3 se representa un dron de ala rotatoria.

Figura 3

Vista de un UAV de ala rotatoria o multi rotores



Nota. Vista de un UAV de ala rotatoria. (HispaDrones, 2019)

Tipología por número de brazos

Los drones se pueden clasificar, de acuerdo a la cantidad de brazos que tienen la cual es la más común y fácil identificar. El brazo de cada dron generalmente tiene un motor, aunque en algunos casos pueden presentar un número mayor:

Tricóptero. Este tipo de drones se encuentran conformados por tres brazos y tres motores: los cuales la función de los dos delanteros es de girar en dirección opuesta para repelerse entre sí, y el tercer brazo el trasero conformado por servomotor trabaja y da la estabilidad que se necesita en el vuelo. En la figura 4 podemos observar un tricóptero.

Figura 4

Vista de un UAV Tricóptero



Nota. Vista de un UAV Tricóptero. (HispaDrones, 2019)

- **Cuadricóptero.** Son drones que están conformados por cuatro brazos y cuatro motores, un motor en cada uno de los brazos. Este tipo de drones son los más comunes y los más comercializados en el mercado por sus bondades. En la figura 5 se puede observar un cuadricóptero.

Figura 5

Vista de un UAV Cuadricóptero



Nota. Vista de un UAV cuadricóptero. (HispaDrones, 2019)

- **Hexacópteros.** En los drones que se usan profesionalmente los drones de seis brazos son los más comunes. Por tener la capacidad de una buena estabilidad en captura de fotos y videos aéreos. Por lo que, tienen la cualidad de poder aterrizar de forma segura ya que si por algún motivo pierden un motor durante la ejecución de las tareas encomendadas. En la figura 6 se representa un hexacóptero.

Figura 6

Vista de un UAV Hexacóptero



Nota. Vista de un UAV hexacóptero. (HispaDrones, 2019)

- **Octocópteros.** Mientras el número de brazos sea mayor y los motores de la misma manera un dron, tendrá características de funcionamiento altas como son más estabilidad y más potencia será permitida. Por lo que, se tiene que tomar aumentara su pesado y será aún más difícil de manejar en donde exista espacios pequeños. En la figura 7 se representa un octocóptero.

Figura 7

Vista de un UAV Octocóptero



Nota. Vista de UAV del tipo Octocóptero. (HispaDrones, 2019)

- **Coaxiales.** Este tipo de drones nos brinda una cualidad esencial que no es el número de brazos, por otra parte, es la cantidad de motores por brazo que posee. Por esta razón es que los drones coaxiales poseen en cada uno de sus brazos dos motores lo que aumenta su capacidad para soportar mayores pesos que drones normales. Por estas razones son la mejor elección para trabajos profesionales. En la figura 8 se representa un UAV coaxial.

Figura 8

Vista de un UAV Coaxial



Nota. Vista de un UAV del tipo coaxial. (HispaDrones, 2019)

Elementos que conforman a un UAV

Los UAVs están conformados en su interior por varios subsistemas y/o elementos los cuales están interrelacionados uno con otro para lograr sustentar el vuelo del aeroplano. En las siguientes descripciones se presentará brevemente a los subsistemas más sobresalientes:

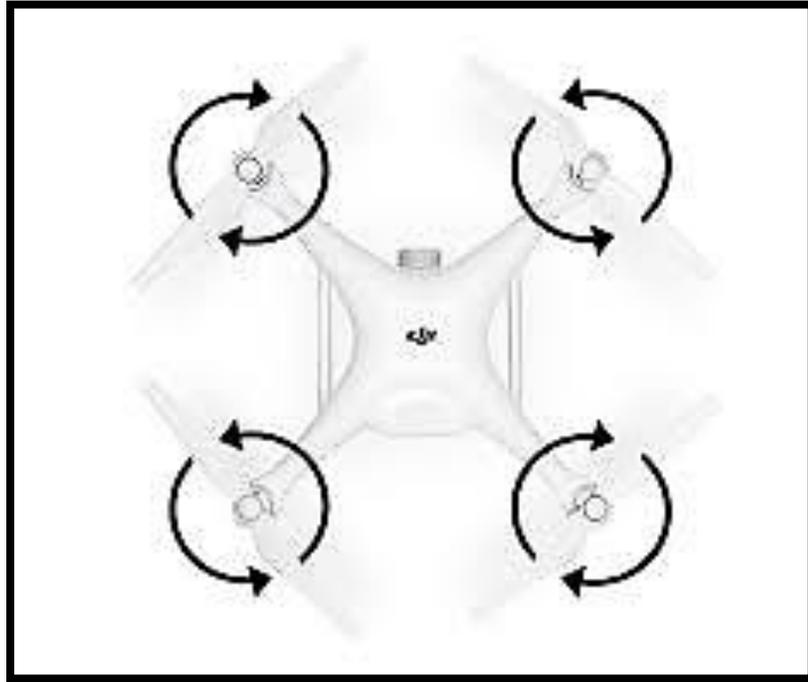
➤ **Subsistema mecánico**

Está conformado por todos los elementos que determinan el comportamiento aerodinámico del aeroplano. Se observan en la figura 9.

- **Frame**
- **Helices**

Figura 9

Vista del Subsistema mecánico



Nota. Vista del subsistema mecánico que forma a un UAV. (HispaDrones, 2019)

➤ **Subsistema de propulsión**

Se encuentra conformado por los motores, el número de motores depende del tipo de aeroplano, la función que desempeña es de generar la fuerza de propulsión la cual facilite que los aeroplanos puedan mantenerse en el aire. De acuerdo a las características del UAV se tiene diversidad de clases de motores. Por consiguiente, indicaremos dos tipos de motores que son usualmente usados por UAVs de uso civil. Se observan en la figura 10.

- **Motores eléctricos**
- **Motores de combustión interna de 2 tiempos**

Figura 10

Tipos de motores de uso civil



Nota. Tipos de motores usados en un UAV. (HispaDrones, 2019)

➤ Fuente de energía

Un elemento esencial el cualquier tipo de UAV es la fuente de energía ya que es la encargada de suministrar la energía que solicita la aeronave para poder volar y que depende del tipo propulsión que está siendo usado. Cuando los UAVs usan motores eléctricos se usa de manera regular baterías de corriente directa, ahora que cuando los UAVs usan motores de combustión se usan de manera general combustibles líquidos como por ejemplo la gasolina. Se observa en la figura 11.

Figura 11

Vista de la fuente de energía



Nota. Vista de un tipo de fuente usada en los UAVs. (HispaDrones, 2019)

➤ Subsistema de control

Controlador de vuelo

El controlador de vuelo es una parte esencial del cual está conformado un VANT, es el centro de control del mismo, y está conformado de manera general por los siguientes componentes:

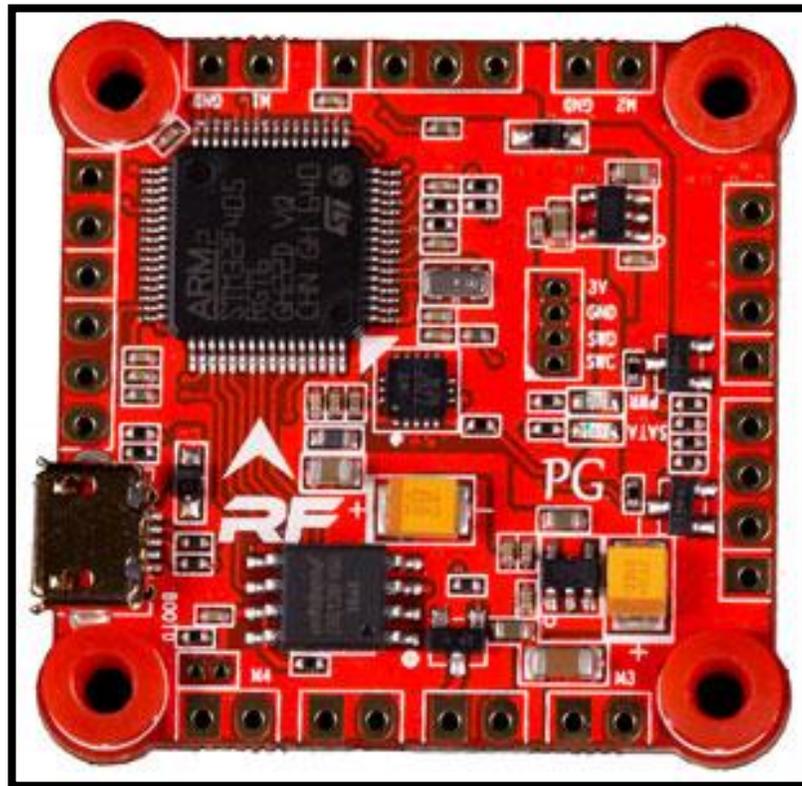
- **Procesador:** tiene la función de leer todas las cadenas de datos que son enviadas desde los diferentes sensores y ejecutar cada una de las instrucciones lo más rápido posible por lo general en operaciones por segundo entonces debe ser potente y versátil.
- **Magnetómetro:** entre todos los elementos es uno de los principales y la función de este es de actuar como si se tratara de una brújula lo que permite conocer en diferentes instantes de tiempo la dirección hacia donde se encuentra apuntado la cara frontal del UAV.
- **Giroscopio:** mide la velocidad angular cuando se produce cambios de posición por parte del UAV.
- **Acelerómetro:** mide la inercia en cada uno de los instantes que el UAV ejecute los distintos movimientos.
- **Sensor Barométrico:** determina la altura con gran precisión.
- **GPS:** determina las coordenadas precisas del posicionamiento del UAV en un determinado espacio, para realizar vuelos autónomos.

Para dimensionar de la manera correcta los actuadores que facilitan el vuelo, tanto en la selección y al combinar cada uno de los componentes es la parte esencial el indicar la información necesaria la conformación del sistema en conjunto.

En la figura 12 se observa la controladora de vuelo. En la tabla 2 tenemos las controladoras más comerciales usadas y existentes en el mercado. (SUQUI CONGACHA & PAREDES CARRILLO, 2019)

Figura 12

Vista de la controladora de vuelo



Nota. Vista de una de las controladoras de vuelo usadas en los UAVs. (SUQUI CONGACHA & PAREDES CARRILLO, 2019)

Tabla 2

Autopilotos más populares del mercado

Producto/Fabricante	Sensores	Peso (g)	Software	Plataforma
osFlexPilot/Airware	INS/GPS/AM/MM	300	Propietario	Ala fija, Ala rotatoria
osFlexPilot/Airware	INS/GPS/AM/MM	32	Propietario	Multirotor
MP2128/MicroPilot	INS/GPS/BA/AM	24	Propietario	Ala fija, Ala rotatoria
MP2128/MicroPilot	INS/GPS/BA/AM	28	Propietario	Ala fija, Ala rotatoria
PiccoloNano/CloudCap Technologies	GPS/AM/BA	65	Propietario	Ala fija, Ala rotatoria
Piccolo II/CloudCap Technologies	INS/GPS/BA/AM	226	Propietario	Ala fija, Ala rotatoria
Vector/ Uav Navigation	INS/GPS/MM/BA/AM	180	Propietario	Ala fija
Ardupilot Mega 2.5/ 3DRobotics	INS/MM/BA/AM	17	Código abierto	Ala fija, Ala rotatoria
Pixhawk/ 3DRobotics	INS/MM/BA/AM	38	Código abierto	Ala fija, Ala rotatoria

Nota. Características de autopilotos más populares de mercado. (SUQUI CONGACHA & PAREDES CARRILLO, 2019)

➤ **Subsistema de comunicación embarcado**

Este subsistema está encargado de gestionar que los enlaces de comunicación entre el autopiloto, con la estación de control que se encuentra en tierra y otras fuentes de información que pueden ser en este caso el módulo de sistema de posicionamiento global, o GPS por sus siglas en inglés. Enlistaremos los elementos que integran el subsistema, se indicaran de una manera generalizada los elementos de comunicación que comúnmente se integran en los UAVs para luego hablar con más detalle del sistema de comunicación de todo el sistema UAV. En la figura 13 se puede observar los elementos del subsistema de comunicación.

- Módulos GPS
- Radio control
- Telemetría

Figura 13

Vista del Subsistema de comunicación



Nota. vista de los diferentes elementos que conforman un subsistema de comunicación.

(HispaDrones, 2019)

Enjambre de UAVs

La inteligencia colectiva es una disciplina de la inteligencia artificial inspirada en la observación del comportamiento emergente en seres sociales como enjambres de abejas, colonias de hormigas, cardúmenes de peces o parvadas de aves, entre otros. Estos seres poseen habilidades individuales muy simples, pero al vivir en grandes grupos logran realizar tareas más complejas como la búsqueda y recolección de comida o escapar de algún depredador.

Los enjambres de robots se basan en la aplicación de la inteligencia colectiva al diseño y construcción de sistemas multi-robot para que exhiban características similares a las observadas en animales sociales. Utilizando grandes cantidades de robots simples, con reglas de comportamiento sencillas y sin el uso de una unidad central para controlar el enjambre, se espera que un comportamiento deseado emerja de la interacción entre robots y la interacción de robots con el ambiente.

En la naturaleza los enjambres suelen estar formados por cientos o miles de individuos, sin embargo, los enjambres de robots reportados en la literatura están formados por pocas unidades. Esto se debe a que un gran obstáculo para poder experimentar con un gran número de robots reales recae en el elevado costo de fabricación y mantenimiento de los robots. Es difícil establecer un límite inferior en el número de robots de un enjambre; en lugar de eso algunos autores señalan que el campo debería estar abierto a trabajos realizados con pocos robots, pero con la visión de escalar el comportamiento a enjambres de mayor tamaño. De manera similar Beni menciona que el uso del término enjambre de robots no debe ser en función del número de unidades en el sistema, en lugar de eso el factor principal debe ser los principios fundamentales de la coordinación del sistema multi-robot. Es decir, que la arquitectura del enjambre debe ser escalable de unas pocas unidades a cientos o miles. En la figura 14 se puede observar un enjambre de UAVs. (Aguilera Ruiz, 2021)

Figura 14

Vista de un enjambre de RPAs



Nota. Vista de un enjambre de RPAs en cumplimiento de una misión. (Aguilera Ruiz, 2021)

Protocolos de comunicación

Los protocolos de las redes ad hoc son protocolos especiales debido a que los nodos podrían moverse lo que modificaría la topología de la red, es por ello que se debe tener en cuenta la característica dinámica de este tipo de red. Asimismo, se debe recalcar que cada nodo debe tener la capacidad de un router.

Para las redes inalámbricas ad hoc, los algoritmos de enrutamiento se pueden clasificar en tres categorías: proactivas, reactivas e híbridas. En la Tabla 3 se observa los diferentes tipos de protocolos de enrutamiento existentes.

Tabla 3

Clasificación de protocolos de enrutamiento de red ad hoc

Protocolos de enrutamiento AD HOC		
Proactivos	Reactivos	Híbridos
DSDV	AODV	CEDAR
WRP	DSR	STARA
OLSR	TORA	ZRP

Nota. Se indican los protocolos de enrutamiento que posee una red Ad Hoc. (SUQUI CONGACHA & PAREDES CARRILLO, 2019)

Los protocolos de tipo proactivas mantienen constantemente actualizada la información de enrutamiento a través de intercambios de paquetes a intervalos temporales fijos, lo que permite tener un enrutamiento disponible en cada petición; sin embargo, la desventaja de esta es producir tráfico de señalización incluso cuando no se transmite ningún paquete de datos. Esto puede generar la sobrecarga en la red. Los protocolos de tipo reactivo poseen un

procedimiento para determinar el correcto enrutamiento solo en el momento en el que el paquete requiera ser transmitido. De este modo, se reduce el tráfico de señalización correspondiente a los tiempos de entrega.

Los protocolos híbridos buscan juntar las ventajas de ambos protocolos previamente descritos, limitando la aplicación de los algoritmos proactivos solo a los nodos adyacentes del que quiere transmitir. (SUQUI CONGACHA & PAREDES CARRILLO, 2019)

Estación de control en tierra

La estación de control que se encuentra en tierra es un conjunto formado de hardware y software, lo cual ayuda a tener un ambiente virtual de la cabina de un UAV en estado real. El equipo puede ser un joystick el cual sería considerado como el hardware o a su vez puede ser otro dispositivo electrónico con el que el piloto toma el control del VANT. El software acula todos los datos de telemetría antes de usar cualquier comunicación y muestra una interfaz de usuario donde el piloto puede saber su estado de ubicación, altitud, cursos, estado de la misión, etc. En la figura 15 se muestra una estación en tierra. (SUQUI CONGACHA & PAREDES CARRILLO, 2019)

Figura 15

Vista de una Estación en tierra



Nota. Vista de una estación en tierra física para el monitoreo de un enjambre de UAVs. (SUQUI CONGACHA & PAREDES CARRILLO, 2019)

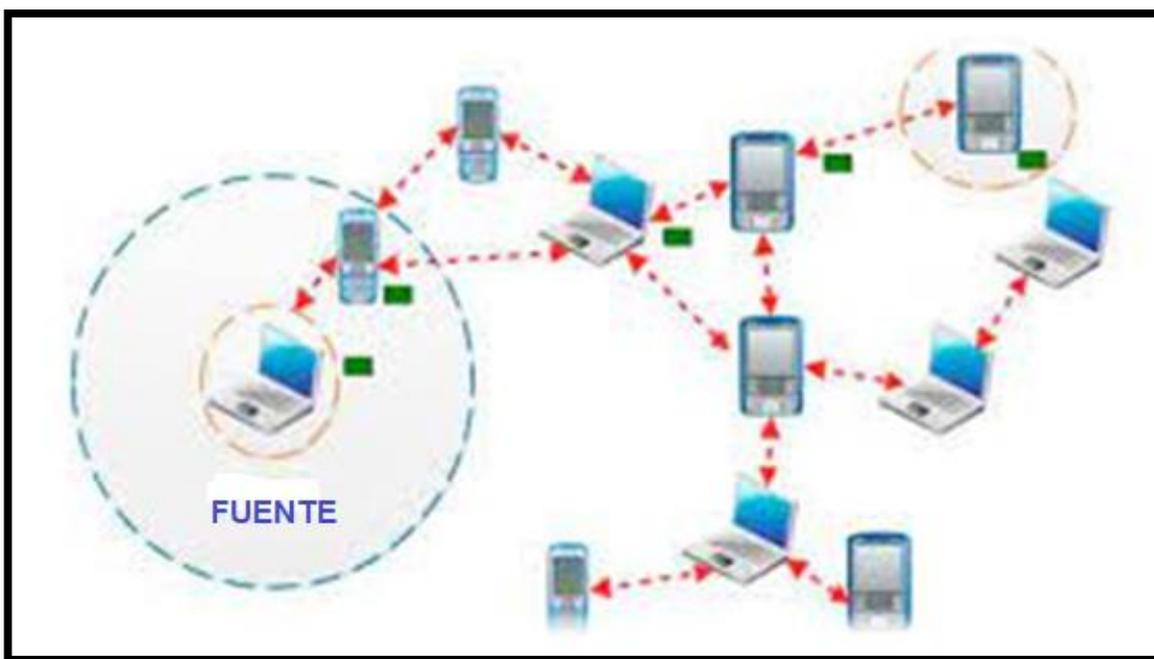
Red Ad Hoc

Una red ADHOC puede ser considerada como una clase de red con la característica que es inalámbrica descentralizada porque no necesita de una infraestructura desarrollada con anterioridad, un ejemplo, puede ser un enrutamiento o puntos de acceso preexistentes en una red inalámbrica controlada. Se considera una red ad hoc para la red inalámbrica de múltiples saltos (varios saltos inalámbricos), que tienen varios nodos en movimiento. Cada nodo provee al enrutar la transferencia de datos de otros nodos para que la determinación de estos nodos ayude a que la información se transmita dinámicamente proveniente de la conectividad de red. La red ad hoc tiene varias áreas de implementación, pueden ser de carácter militar, emergencias, conferencias y aplicaciones con sensores. Cada una de estas áreas tiene sus propios requisitos para sus protocolos de enrutamiento; por ejemplo, en aplicaciones militares,

la baja probabilidad de la detección y la interpretación son un factor importante para la efectividad del enrutamiento; además, en el área de aplicación del sensor, bajo o mínimo la cantidad de consumo de energía es un requisito previo para las operaciones de trabajado por cuenta propia; y, finalmente, en las solicitudes de la conferencia, debe estar garantizada la calidad del servicio para servicios multimedia sea estable. en la figura 16 se presenta un ejemplo de una red ADHOC. (Ramirez Marocho, 2017)

Figura 16

Vista de una Red ADHOC



Nota. Vista del funcionamiento de una red AdHoc con diferentes elementos. (Ramirez Marocho, 2017)

Clasificación de redes Ad Hoc

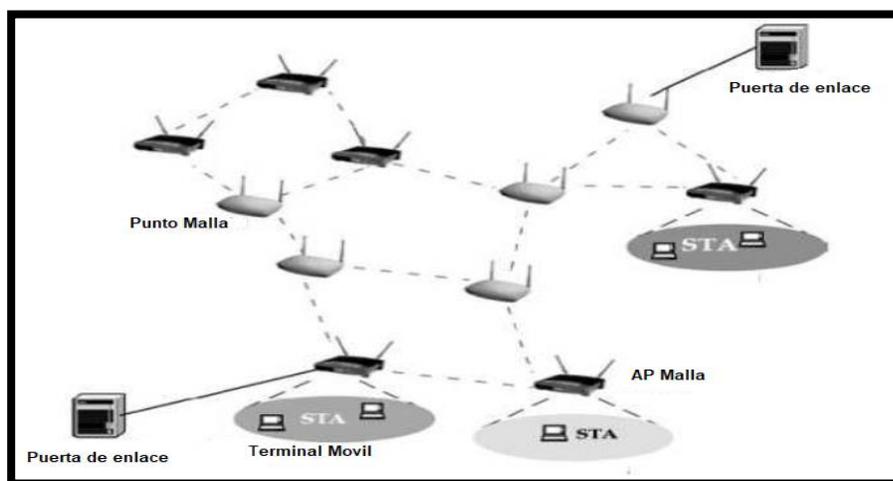
Al tener una diversidad de redes ad hoc lo cual nos ayuda que al tener una infinidad de posibles aplicaciones en las que la central no depende de los nodos y viceversa, lo que mejora

la escalabilidad de las redes en comparación con las redes inalámbricas administradas; a pesar de que límites identificados en estas redes, ambas en la práctica como en teoría. En la figura 17 se ve un ejemplo de los diferentes tipos de red ADHOC. De acuerdo a su aplicativo las redes ad hoc se clasifican de una, manera que se describe a continuación:

- (MANET) Mobile ad hoc network
- Red Malla inalámbrica
- Redes de sensores

Figura 17

Vista de una Red ADHOC tipo Malla



Nota. Vista del funcionamiento de una red AdHoc del tipo malla. (Ramirez Marocho, 2017)

Aplicaciones de las Redes AD HOC

En las redes Ad hoc, se puede clasificar en diferentes clases. La red móvil Ad-hoc (MANET) es aquella red móvil que consta de dispositivos inalámbricos autónomos sin red principal o infraestructura, pero tiene las características de Auto configurarse. Las redes del tipo MANET tienen varias áreas de aplicación, como ayuda en el caso de fenómenos naturales,

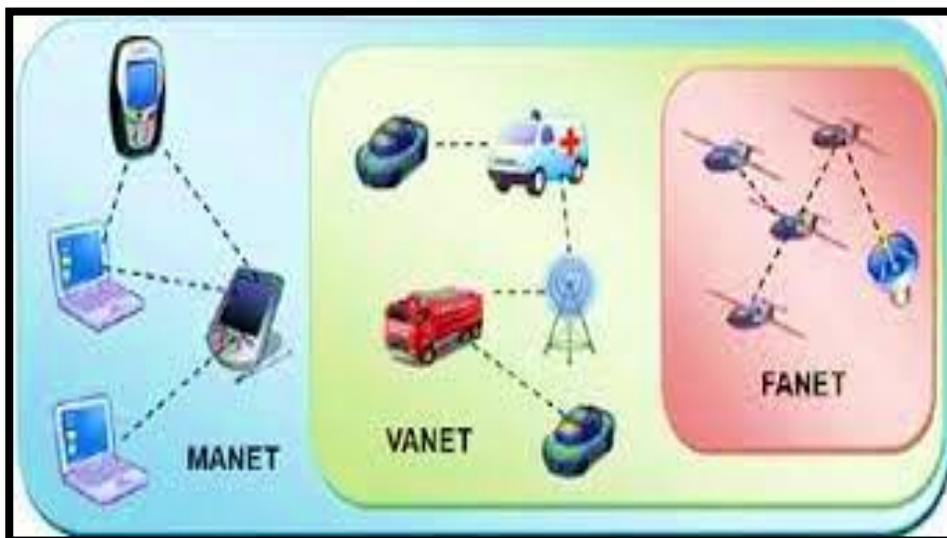
comunicación militar, reuniones comerciales urgentes, etc. La ventaja de las redes Manet considerada como esencial es su portabilidad o movilidad. El gran número de aplicaciones con la ayuda de las redes MANET han ayudado a tener subcategorías de tecnologías de redes ADHOC como redes de vehículos ADHOC (VANETs) y redes de vuelo ADHOC (FANET). Para que en general, estas redes tienen una gran movilidad con cambios rápidos en la topología. en el interior en la comparación con las redes MANET típicas, como en Vanet y Fanet, la mayoría de los nodos son vehículos y drones (vehículos aéreos no tripulados) respectivamente.(Montoya Osete, 2019)

Las VANETs tiene las ventajas que son redes en las que se mantiene la comunicación del vehículo a vehículo (V2V) y desde el vehículo hacia la infraestructura preinstalada. Principalmente los objetivos de las Vanets mejoran la eficiencia y la congestión de Tráfico, además que al acceder a la información se evita accidentes. (Montoya Osete, 2019)

Flying Ad-hoc Network (FANET) está definida como una clase mejorada de las redes MANET que poseen características especiales de que soportan una movilidad elevada. Las redes FANETs, consta de nodos que por lo general son vehículos aéreos que está presente tripulación (UAVs). (Montoya Osete, 2019) En la figura 18 se representa las distintas aplicaciones de las redes ADHOC.

Figura 18

Vista de las aplicaciones de la Red AdHoc



Nota. Vista de las diferentes aplicaciones de una red AdHoc. (Montoya Osete, 2019)

➤ **Redes FANET**

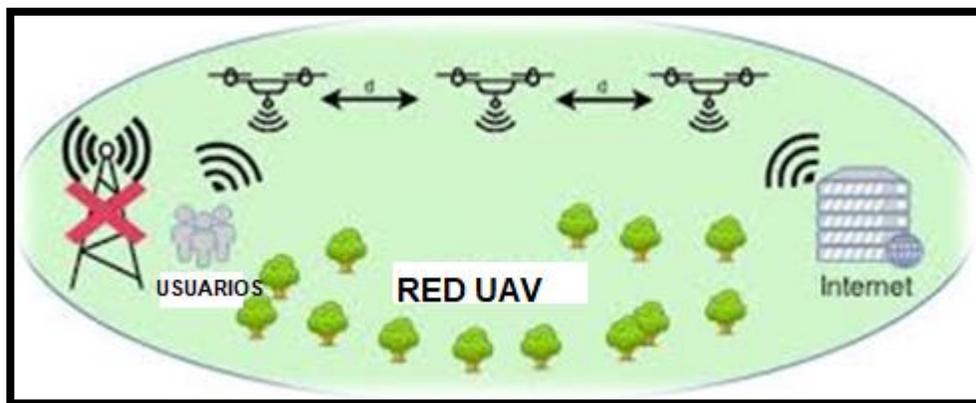
Las redes de clase FANET es un subconjunto de las redes AD HOC y se organizan dentro de las redes Vanet de manera más específica, que quiere decir, que son dispositivos que componen esta red son Vehículos, que poseen la cualidad de volar, además estos dispositivos son conocidos como UAV. Por lo que se necesita hacernos la pregunta ¿Y qué es un UAV? UAV proviene del acrónimo Unmanned Ariel Vehicles, lo que significa, no vehículos aéreos que no tiene tripulación; se los conoce también como RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) o frecuentemente conocido como dron. (Montoya Osete, 2019)

A pesar de que estos tres términos generalmente se usan indiscriminadamente, verdaderamente esto quiere decir que tengan el mismo significado, puesto que existe características que los diferencia uno de otro. UAV hace referencia al término drones que

suelen ser usados en estrategias militares, puesto que, los aeroplanos civiles, son comúnmente conocidos como drones en el mercado; y finalmente, los RPAS es un sistema organizado el cual consta de él dron, los controles que lo gobiernan y la persona que los administra. Se tiene que dejar en claro que un UAV no necesariamente tiene que ser manipulado por un piloto, por lo que, un UAV y un RPA no son dispositivos iguales. Lo aclaró en este proyecto usaremos el término "dron" para facilitar el trabajo y ser el más adecuado debido a las pruebas que tendremos que hacer. (Montoya Osete, 2019) En la figura 19 se representa una red AdHoc del tipo fanet.

Figura 19

Vista de una red AdHoc del tipo Fanet



Nota. Vista de los diferentes elementos que forman una red AdHoc del tipo Fanet. (Montoya Osete, 2019)

Una mejora en las redes FANET está en el enrutamiento la topología de la red puede cambiar esto es mientras los UAVs tienen movimientos muy rápidos. Los protocolos de enrutamiento deben poder actualizar dinámicamente las tablas de enrutamiento según los cambios de topología. Sin embargo, este trabajo es verificar qué protocolo ofrece las mejores ventajas.(Montoya Osete, 2019)

Capítulo III

Dimensionamiento y Desarrollo

3.1. Dimensionamiento del sistema

Para el debido dimensionamiento del sistema se tiene que partir de un cronograma de actividades establecido en este estudio las cuales nos ayudaran a determinar características necesarias para el desarrollo de la red a ser simulada, en la tabla 4 podemos observar cada uno de estos lineamientos:

Tabla 4

Metodológica para implementación de una red para un enjambre de RPAs

Paso 1	Actividad	Ámbito	Civil
			Militar
			Científico
Paso 2	Selección de drones	Método de sustentación	Aerodinós Aerostatos
		Tipo de dron en el mercado	Listo para volar Armable
		Configuración de arranque	Integrado Instalable
		Aplicaciones de vuelo	Abiertas

			Cerradas
		Kit de desarrollo de vuelo	Fabricantes Desarrolladores Propios
Paso 3	Configuración del enjambre	Tipo de enjambre Número de drones	Homogéneo Heterogéneo 2 o más drones
Paso 4	Estación de control en tierra	Hardware Aplicaciones para gestión de enjambres	Fabricantes Desarrolladores Propios
Paso 5	Vuelo	Programación y configuración de vuelo Trayectoria de vuelo Señal Tráfico de datos	

Nota. Se establece los pasos que se seguirá para la implementación de la red.

Simuladores de red

Para el desarrollo de la tesis se han encontrado en la literatura especializada diferentes tipos de simuladores para realizar el experimento con la red FANET, estas son: ns-3 (The VINT Project, 2011), GloMoSim (UCLA Parallel Computing Laboratory, 1999; Zeng, Barodia y Gerla 1998) y OPNET (OPNET Technologies, Inc. 2012). Estos simuladores comparten el hecho de que están basados en simulación de eventos discretos, lo que significa que el comportamiento de la red a simular es modelado a través del procesamiento, en el orden de los eventos que

ocurren. Estos eventos se definen como respuesta a lo que ocurren en la red ad hoc: envío de mensaje, recepción de mensaje, detección de colisión de transmisiones, entre otros eventos.

(Ramirez Marocho, 2017) Asimismo, incluyen mecanismos para generar y simular el movimiento de los nodos que participan en la simulación:

➤ **NS-3**

El NS-3 es un simulador de red que posee código abierto distribuido bajo la licencia de DNU GLPv2, y que se desarrolla de forma colaborativa. Su utilización es netamente con fines educativos y de investigación. Las extensiones de este simulador y la implementación de nuevos protocolos se realizan en el lenguaje de programación C++. La configuración de los medios de simulación y los diferentes eventos a simular durante el desarrollo del experimento se lleva a cabo utilizando el lenguaje Tcl. El ns-3 posee un problema en su escalabilidad para simular grandes redes debido al incremento de los recursos de computación necesarios.

➤ **GloMoSim,**

El GloMoSim es un simulador de red basado en la utilización de eventos discretos y utiliza un lenguaje de programación paralela llamado Parsec, desarrollado por UCLA Parallel Computing Laboratory. Todas las extensiones y nuevos protocolos que se desean incluir en una simulación deben ser desarrolladas en este mismo lenguaje de programación. En este simulador solo es posible experimentar con entornos de redes inalámbricas. Una de sus principales ventajas, es que se puede ejecutar de forma paralela en varios procesadores y reducir el tiempo de ejecución de una simulación.

➤ **OPNET**

Es un simulador comercial desarrollado por la empresa OPNET Technologies. Tiene un gran uso tanto en el ámbito empresarial como educacional y dispone de una edición limitada para el uso no comercial. Es, al igual que los demás, un simulador basado en eventos, en donde su principal ventaja resalta en el hecho de que integra los procesos de modelado, simulación y análisis de redes. Asimismo, a diferencia de los simuladores anteriores, todo el proceso se desarrolla de forma gráfica, lo que simplifica en gran cantidad el uso y aprendizaje.

➤ **MATLAB**

MATLAB, el lenguaje de cálculo técnico desarrollado por MathWorks, es un entorno de programación para el desarrollo de algoritmos, análisis de datos, visualización y cálculo numérico. Simulink es un entorno gráfico para simulación y diseño basado en modelos de sistemas dinámicos multidominio e integrados. (MathWorks, 2018)

Beneficios:

- Simulación de procesos.
- Permite construir modelos simples para testear teorías.
- Ofrece Toolboxes complementarias para amplia variedad de aplicaciones de ingeniería e investigación.
- Lenguaje de alto nivel para cálculos científicos e ingeniería.
- Identificación y simulación de sistemas.
- Visualiza, explora y analiza datos.
- Diseño de control, procesamiento de señales e imágenes.

- Creación de gráficos para visualizar datos.
- Rapidez y precisión en la ejecución de proyectos.

En la tabla 5 se observa las características de los softwares usados en la simulación de la red.

Tabla 5

Características de los simuladores de red

	NS - 3	Glomosim	OPNET
Lenguaje	C++	C/Parsec	C++
Redes inalámbricas	Si	Si	Si
Escenarios	Tcl	Parsec	Interfaz gráfica
Cliente Java	Si (AgentJ)	No	No
Licencia	CNU GLPv2	Uso Educativo	Edición Limitada
Otros	Utilizado con mayor frecuencia, posee gran variedad de documentación	Posibilidad de ejecución en paralelo	Simplicidad de uso

Nota. Comparativa de las características de los simuladores.

Software de Planificación, Control y Seguimiento de Misiones

Como ya fue mencionado anteriormente, el software de planificación, control y seguimiento es la parte fundamental del centro de mando en tierra, porque ofrece al operador todas las herramientas necesarias para planificar las misiones de vuelo y, a su vez, son responsables de administrar la tarea de la red de comunicación entre la estación de control y la aeronave. En su gran parte de los fabricantes de UAV incluyen software para cada uno de sus dispositivos tanto para la planificación como para el control de las misiones. Sin embargo, también hay una gran variedad de soluciones de software de código abierto, que tienen la mayoría de los recursos ofrecido por los paquetes que son de uso propietario y, a su vez, permita que el operador cree nuevas características modificando el código fuente.

Los paquetes de software para planificación y control de misiones para UAVs de uso cotidiano más usados actualmente son los siguientes:

- Mission Planner
- QGroundControl
- APM Planner
- Tower
- AndroPilot
- UGCS
- Drone Deploy
- Open Pilot
- DJI Ground Station
- FreeFlight3
- DJI Go

- Hover

A continuación, en la tabla 6, se presenta una comparación, de los paquetes de software anteriormente citados:

Tabla 6

Comparación de los programas de control para UAVs más usados

Software	Protocolo Mavlink	Codigo Abierto	Compatibilidad con APM y/o PX4	Sistema operativo
Mission Planner	Si	Si	Si	
QGroundControl	Si	Si	Si	
APM Planner	Si	Si	Si	
Tower	Si	Si	Solo APM	
AndroPilot	Si	Si	Si	
UGCS	Si	No	Si	
Drone Deploy	Si	Si	Si	
OpenPilot	Si	Si	Si	
DJI Ground Station	Si	Si	Si	
DroidPlanner2	Si	Si	Si	
FreeFlight3	Si	Si	Solo APM	
DJI Go	Si	Si	No	
Hover	Si	Si	No	

Nota. Comparativa de Software de planificación, control y seguimiento de misiones.

Actividad de uso de los RPAs

La actividad de uso de los RPAs será en la formación de la red AdHoc para que se empleada en el enjambre de RPAs es para tareas de vigilancia de las inmediaciones del aeropuerto tanto la infraestructura perteneciente a este como las pistas de aterrizaje para control de intrusos y tareas variadas de supervisión de maniobras en las inmediaciones del aeropuerto. En la figura 20 se puede apreciar en vista aérea el lugar en donde será analizada la

red para el enjambre de RPAs en funcionamiento en posteriores investigaciones una vez culminado este estudio.

Figura 20

Vista aérea de las instalaciones del aeropuerto CIDFAE

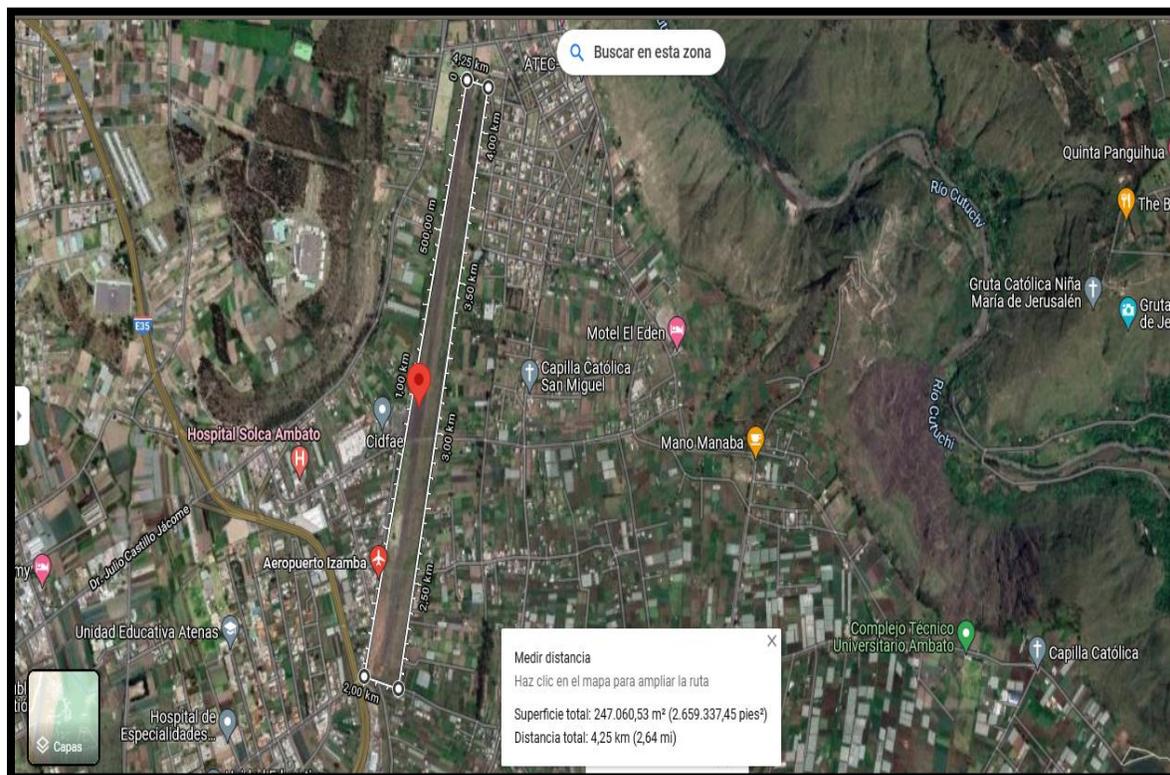


Nota. Toma aérea de las instalaciones del CIDFAE

En la figura 21 se puede apreciar la delimitación de la zona de operación de la red en donde será usado el enjambre de RPAs, lo cual nos permitirá obtener características para poder ser usadas en la simulación de la red y obtener resultados reales.

Figura 21

Delimitación de la zona perteneciente al aeropuerto



Nota. Vista de la delimitación de la zona perteneciente al aeropuerto del CIDFAE.

Selección del tipo de RPAs

El empleo del Dron Matrice 100 y el UAV Trimble UX5 del Instituto Geográfico Militar, ha sido un valioso aporte para la generación de productos cartográficos, proyectos fotogramétricos y aplicaciones de investigación; sus beneficios se han extendido a la adquisición de imágenes de alta calidad y precisión, proyectos de catastro, monitoreo de grandes extensiones de cultivos, incendios, apoyo a la gestión de riesgos y reconocimientos militares en zonas de difícil acceso, con una mayor eficiencia y reducción de costos operativos. El UAV Trimble UX5 ha participado exitosamente en dos misiones en la Estación Científica Pedro Vicente Maldonado ubicada en la Antártida donde se generaron ortofotografías y modelos digitales del terreno,

también participó en el terremoto del 16 abril de 2016 en las provincias de Esmeraldas y Manabí, en apoyo a la gestión de riesgo, mediante el levantamiento de la infraestructura colapsada en Pedernales, Chamanga y otras zonas afectadas, además fue empleado en el levantamiento del área de explotación minera en Panantza donde se realizaron 6 misiones de vuelo de un promedio de 30 minutos de operación. (Baquero Montoya & Vásquez Briones, 2019)

Entre las principales actividades en apoyo a los Comandos Operacionales, el GMREC ha realizado operaciones de seguridad y monitoreo electrónico, obtención de información a partir de la interceptación electrónica, reconocimientos aéreos y vigilancia con medios técnicos en los sectores donde se desarrollan actividades de contrabando de combustibles, gas licuado de petróleo (GLP), minería ilegal, tráfico de armas munición y explosivos (TAMEX). Entre los principales medios de reconocimiento aéreo el GMREC cuenta con los Drones Mavic Pro, Phamthom 3 y 4, Inspire 1 y 2 y Matrice 100. Además, esta unidad ha sido dotado recientemente del UAV ALTI Transition; esta aeronave no tripulada es un sistema VTOL (vertical take off land) que no requiere pista de despegue ni aterrizaje, ni el uso de catapulta; se eleva como un Dron, pero se desplaza como un avión. El tiempo de permanencia en el aire es de 6 horas de vuelo, lo que le permite alcanzar una mayor desplazamiento en el control y vigilancia del terreno; el sistema de comunicación Data Link le brinda un alcance de transmisión de hasta 10 km, la aeronave tiene una velocidad promedio de 72 Km que le favorece para un rápido desplazamiento, la capacidad de carga permite llevar sensores electro-ópticos para observación diurna y nocturna, además el sistema integrado es más compacto y puede ser desplazado en un puesto de mando móvil para cubrir sectores lejanos de los principales centros urbanos. (Baquero Montoya & Vásquez Briones, 2019)

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS DRONES Y UAV

Una vez realizado la gráfica del radio de acción de los Drones y UAV, a continuación, se realizará una representación gráfica con la comparación de las cinco características más importantes de estos equipos. Los parámetros escogidos han sido el radio de acción, el tiempo de vuelo, la velocidad de crucero, la capacidad de carga y el costo de operación; como estas variables tienen diferentes magnitudes Km, Horas, Km/h, Kg y \$, se ha utilizado una tabla 7 de ponderación del 1 al 10, para apreciar mejor sus cualidades. (Baquero Montoya & Vásquez Briones, 2019)

Tabla 7

Características de los Drones y UAV UX5, ALTI Transition, tabla de ponderación.

CARACTERÍSTICAS				
Dron/UAV	Matrice 100	Inspire 2	UX5	Alti Transition
Radio de acción	5	7	5	10
Tiempo de vuelo Horas	0,38	0,45	0,83	6
Velocidad crucero Km/h	61	94	80	72
Peso Kg	2,4	3	2,5	16
Costo Equipo \$	5.000	8.000	20.000	360.000
CARACTERÍSTICAS CON TABLA DE PONDERACIÓN A 10				
Dron/UAV	Matrice 100	Inspire 2	UX5	Alti Transition
Radio de acción	7	10	7	10
Tiempo de vuelo Horas	5	5	10	10
Velocidad crucero Km/h	6	10	9	8
Peso Kg	8	10	8	10
Costo Equipo \$	10	6	3	1
Total	36	41	36	39

Nota. Ponderación y Características de los Drones y UAV UX5, ALTI Transition. (Baquero Montoya & Vásquez Briones, 2019)

Configuración del enjambre de RPAs y número de RPAs

La tasa de desarrollo de las aplicaciones de UAV pudo demostrar que, para la mayoría de las tareas, el uso de varios drones contribuye simultáneamente a mejorar los resultados y la eficiencia en las tareas encomendadas.

El vuelo en formación de drones puede ser utilizado en diversas aplicaciones. Desde misiones de fotogrametría y reconocimiento, donde el uso de varios drones puede reducir significativamente el tiempo de la misión, hasta la vigilancia de objetivos, tanto móviles como estáticos, donde se puede adquirir una gran eficiencia y cobertura.

En cualquiera de estos casos, el vuelo en formación es clave para optimizar el posicionamiento de cada uno de los nodos, con el fin de maximizar la cobertura evitando puntos ciegos.

Línea/Cuadrícula

Se utiliza para el reconocimiento, mapeo o misiones de búsqueda. Tanto las formaciones en cuadrícula como en línea permiten garantizar que se cubra la mayor parte del terreno. Evitando puntos ciegos y superposición, lo que permite cubrir grandes áreas en muy poco tiempo.

Acompañamiento/Escolta

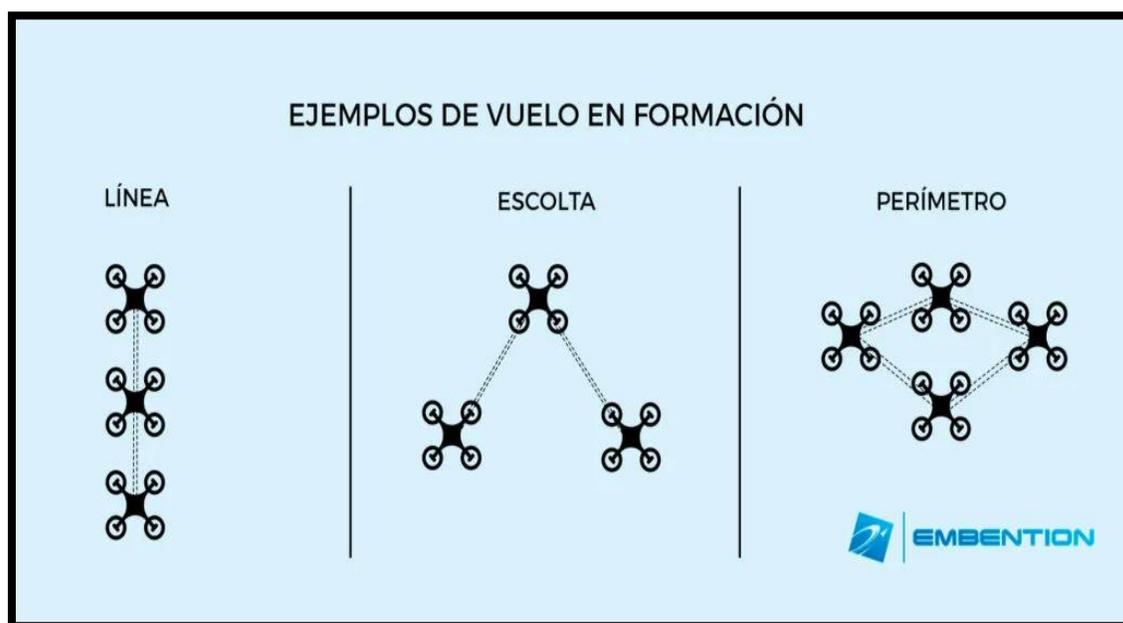
Estas formaciones son óptimas tanto para equipos tripulados y no tripulados. Los drones, situados a los laterales, brindan apoyo a, por ejemplo, un piloto de combate. Los UAVs seguirán el camino del piloto sin interrumpir su movimiento, proporcionándole apoyo de carga útil o simplemente esperando a que se les asigne una misión diferente.

Perímetro

Los drones en enjambre pueden realizar esto en cuestión de minutos. Despliega todos los drones y selecciona el área a inspeccionar. Cada nodo de la red ocupará su lugar alrededor del centro y se asegurará de que no queden puntos ciegos. Esta formación es también útil para un convoy o puntos móviles de interés, ya que el posicionamiento de enjambre puede ser relativo a una unidad terrestre. En la figura 22 se representa las distintas formaciones que puede tener un enjambre de RPAs.

Figura 22

Tipos de formaciones de enjambres de RPAs



Nota. Se puede observar en la figura los diferentes tipos de formación de un enjambre de UAVs. (CESDEN, 2012)

El número de RPAs seleccionados de acuerdo a las necesidades de la investigación son de seis los cuales tendrán que cumplir satisfactoriamente las tareas que sean destinados al enjambre que estos conformaran en las distintas formaciones.

Condiciones de vuelo

Las condiciones de vuelo estarán directamente relacionadas con la tarea a ejecutar por el enjambre de RPAs para el cual será simulada la red por lo que se ha establecido varios requerimientos los cuales serán detallados a continuación en la siguiente tabla 8 de acuerdo a las necesidades que se presentaron al inicio de la ejecución de la investigación:

Tabla 8

Condiciones de vuelo

Necesidad	Característica
Autonomía de vuelo	30 minutos
Numero de RPAs	6 dispositivos
Vuelo	Por trayectoria establecida
Configuración del enjambre	Homogéneo o heterogéneo
Red	Red Ad Hoc Adaptable al tipo de enjambre
Validación la red del enjambre de RPAs	Rendimiento, Perdida de datos, Latencia

Nota. Determinación de las condiciones de vuelo del enjambre de RPAs

Capítulo IV

Metodología

Tipo de investigación.

La investigación está basada en el enfoque de la Investigación experimental y cuantitativa de tal manera que parte desde Investigaciones que fueron realizadas en el análisis de las que las características y requisitos de la Red ADHOC en sistemas de enjambres de UAVs. Además, la investigación se estableció desde el análisis se ha realizado, está tentado a usar parámetros y características similares a lo que sería una verdadera red en ejecución.

Método de investigación.

Este proyecto se utilizó los métodos deductivos y experimental para el diseño estructural del código de simulación en distintos softwares para diseño de la red ADHOC para el enjambre de RPAs, transmisión y recepción necesarias para la implementación de la red, que se basa en el análisis y el uso de protocolos de la red AD HOC.

Fuentes de información.

Para un desarrollo sistemático de la investigación está establecido una revisión de la documentación estos en diferentes bases científicas, revistas, artículos entre otros. Las bases científicas analizadas fueron IEEE, la revista Scielo, publicaciones científicas dirigidas al análisis de AD -CHOC y sus protocolos de enrutamiento de red establecido en artículos científicos. También fue consultado los registros y estudios con resultados que respaldan la posibilidad de ejecutar la investigación, proporcionando información importante sobre dispositivos electrónicos y si es que la red admite la implementación de protocolos de enrutamiento ADHOC en redes aéreas, mejor conocidas como redes de FANET que forman parte de las redes ADHOC.

Instrumentos de investigación.

El desarrollo de este documento tiene un instrumento esencial el cual ayudara en la ejecución de las distintas pruebas como son los softwares de simulación de red, Ns3, que es un Software de código abierto con licencia GNU gratuito desarrollado por investigadores de diferentes partes del mundo, también se utilizó las siguientes técnicas de investigación:

Observación directa: consiste en una selección explícita de un objeto de estudio que desea analizar mediante visualización en detalles de una o más situaciones especiales que le permiten saber los objetivos que se proponen inicialmente.

Análisis de documentos: se partió desde publicaciones destacadas con contenido científico, como manuales, artículos y dispositivos electrónicos, esto para determinar una base de la viabilidad del proyecto.

Procedimiento experimental: en esta parte se usó diferentes tipos de software de tal manera que nos permita la selección del modelo experimental optimo, los softwares usados fueron OPNET, MATLAB y NS-3 utilizado para la simulación y la evaluación de una red con protocolos de enrutamiento ADHOC y se utiliza para comparar con resultados reales que podrán ser ejecutados en un futuro.

Entorno de comunicación de los drones

Solución propuesta

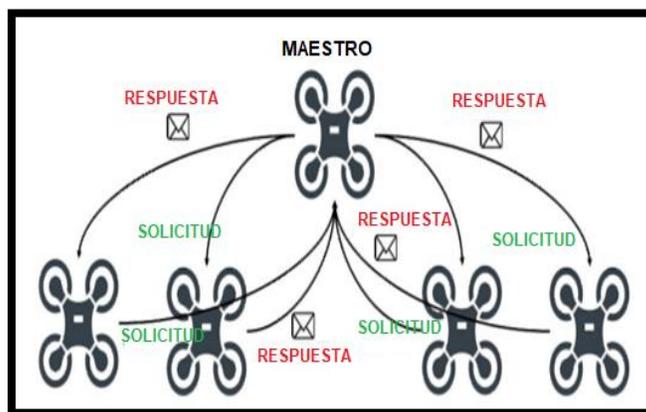
El algoritmo sigue durante todos sus pasos la realización de una máquina Estados finitos desarrollados para la ocasión. El desarrollo de esto es que cada dron puede trabajar en sus propios equipos y sincronizarse con él otros usando el protocolo IEEE 802.11a a una frecuencia de 5.8 GHz. Un nivel de transporte, la red ad hoc es responsable de la transferencia

información desde entonces, a través de este protocolo, podemos obtener las mejores latencias y tasas de transferencia que en este caso son las mejores opciones.

El intercambio de mensajes es bidireccional entre la aeronave y la aplicación realiza la solicitud la técnica de comunicación de medios. Durante todos los pasos del algoritmo los drones de los esclavos se comunican con el maestro de los drones para estar de acuerdo como este algún parámetro de vuelo, como: la ruta de vuelo, la velocidad, la altura de despegue, el orden en que despegue y una serie de parámetros adicionales. La Figura 23 muestra la interacción entre los UAVs en una red.

Figura 23

Diagrama de la interacción entre UAVs



Nota. Diagrama de interacción de los UAVs al entrar en funcionamiento la red. (Reyes, 2018)

Para la sincronización de la aeronave según se produzcan los eventos, se diseñó una serie de mensajes estándar con el motivo de ayudar al algoritmo a mantener la sincronización y la consistencia en la información, necesaria para la operación apropiada. Además, para asegurar alta confiabilidad, cada uno de estos mensajes debe proporcionar un ACK limpio, para informar al dron esclavo que ninguna de sus órdenes es evidente o está perdido por los medios de comunicación. Los pasos de cada vuelo son: el cálculo del algoritmo de acuerdo con

el estado actual de los RPAs, ruta de despegue, vuelo y aterrizaje. Para que estas fases se hagan se han implementado varios métodos como:

- **Takeoff:** se usa para despegar sincronizado los todos los elementos pertenecientes al enjambre, evitando la posible colisión entre ellos. Para hacer una salida segura, se realiza en dos fases. Primero alcanza una altura intermedia calculada de acuerdo con la altura final y, según el cálculo realizado por el maestro, se ordena gradualmente la salida de cada UAV.
- **WpReached:** asegura de que haya pasado un UAV por cada uno de los puntos de su ruta. Para hacer eso, por medio de una fórmula matemática, un perímetro es establecido alrededor de los puntos de referencia, y mediante el algoritmo se confirma si se ha alcanzado o no este punto de referencia.
- **Land:** responsable del aterrizaje de los drones de manera de manera adecuada y segura. Basado en WpReached, define que se detecte si es el último punto de referencia de misión fue sincronizado. En este caso, todos los drones deben esperar que lleguen a la posición final y luego proceda con el aterrizaje paralelo.

Gracias a estas características, el algoritmo puede hacer que siga el entrenamiento de vuelo estable y uniforme.

Sistema maestro esclavo

Las redes informáticas, maestro / esclavo o primario / secundario es un modelo de comunicación en el que un dispositivo o proceso (conocido como Maestro) controla uno o más dispositivos o procesos (llamados Esclavos). Desde que se estableció la relación maestra /

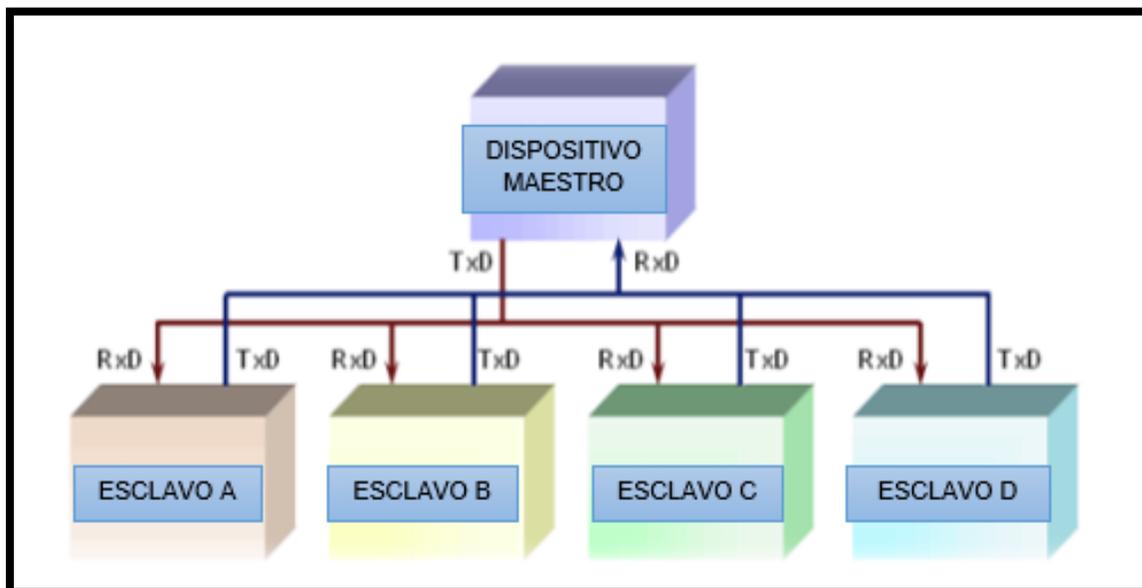
esclavo, la dirección el control siempre es del maestro a los esclavos, aunque en el caso del algoritmo desarrollado es de dos vías.

El algoritmo desarrollado es un sistema de esclavos bidireccional en el que los esclavos envían información al maestro, ambos de posición como de estado en el que se encuentran. El maestro recibe esa información y es tratada para proporcionar órdenes relevantes a sus esclavos. Se podría decir que el maestro es el jefe del enjambre y es responsable de cada esclavo este en la misma etapa que los demás, y que hay uno que encargado de sincronizar en el movimiento de todos. Esto garantiza que el enjambre se mueve de manera idéntica y minimiza las fluctuaciones o diferencias en el camino a seguir.

Mientras se encuentra en el escenario de despegue el maestro trata de obtener los datos sobre la geo posición de esclavos. Una vez que tenga estos datos son el maestro que calcula el algoritmo de despegue.

Mientras se encuentra en la fase de vuelo, el maestro es responsable de la sincronización de todos sus esclavos en cada punto de la misión. Los puntos de referencia son datos de contacto para ubicar los puntos de referencia de tres dimensiones utilizados en la navegación basada en GPS.

Finalmente, al aterrizar, el maestro lo garantiza cuando los drones esclavos están en la etapa de máquinas estados relevantes y, cuando todos están en su posición final, reciben la orden de aterrizaje maestro. En la Figura 24, puedes ver la interacción entre el maestro y el esclavo.

Figura 24*Interacción Maestro Esclavo*

Nota. Vista de la interacción de los diferentes dispositivos de la red. (Reyes, 2018)

Máquina de estados

Las máquinas de estado son un método para el modelado de sistemas cuyas salidas (outputs) dependen de la historia completa de sus entradas (inputs). Es decir, el valor de las entradas condiciona al valor de las salidas. En comparación con los sistemas puramente funcionales donde la salida está claramente determinada por la entrada, las máquinas de estado hacen que su rendimiento dependa de su historial. También se conocen como una máquina de estados finitos (FSM por finite state machine) si el conjunto de los estados de la máquina es terminal; este es el único tipo de máquinas de estado que se puede implementar en las computadoras actuales. (Reyes, 2018) Las máquinas de estado sirven para modelar una amplia variedad de sistemas, por ejemplo:

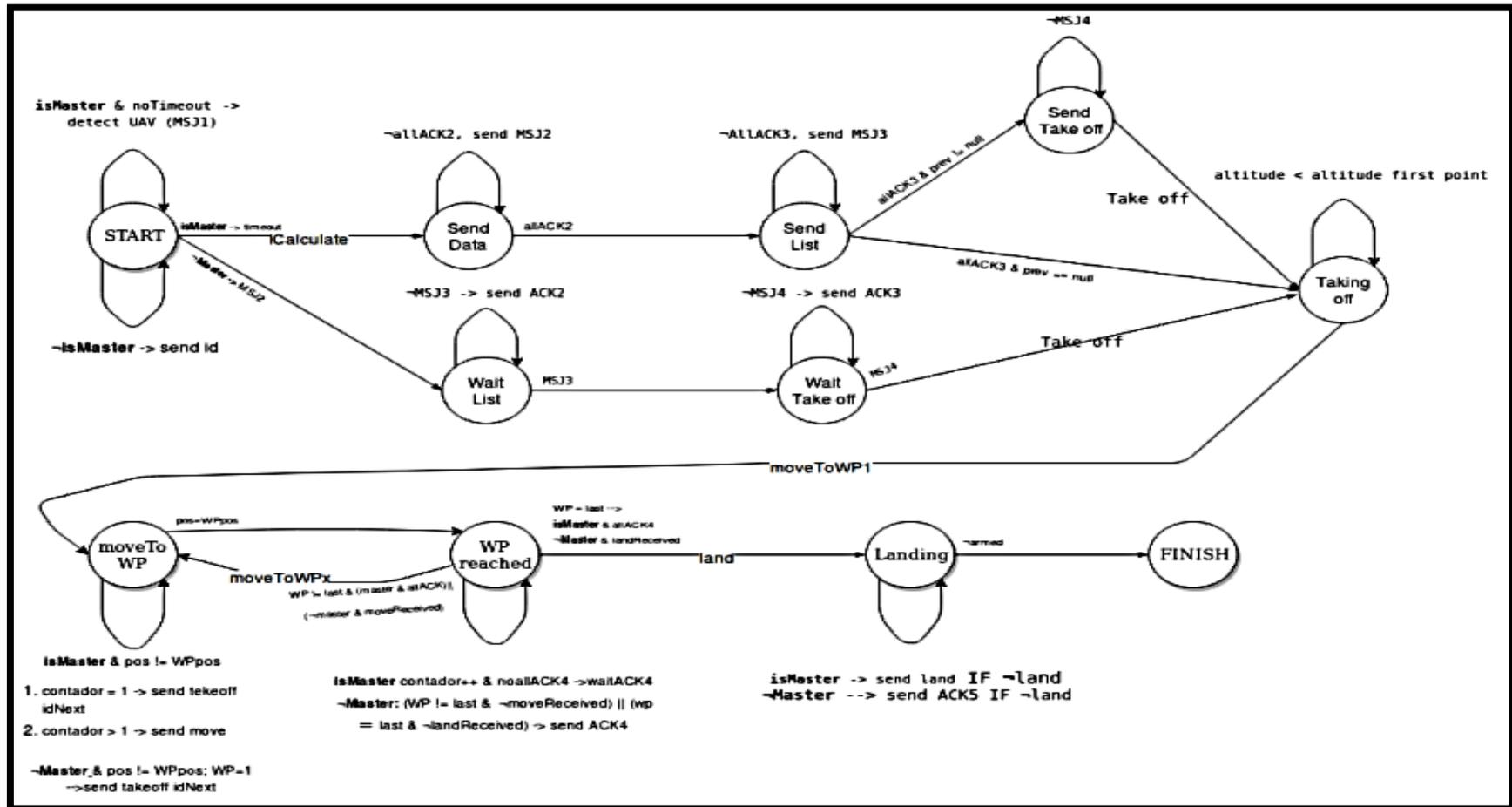
- Diseño en la interacción con la interfaz de usuario.
- Desarrollo de IA para juegos por computador
- Maquinaria industrial
- El estado de una nave espacial, incluidas las válvulas que están abiertas y cerradas, los niveles de combustible y oxígeno, etc.

Como se puede verificar, las máquinas de estado sirven para muchas situaciones diferentes. En este caso, se aplicará a control de un enjambre de drones, en particular para el control de la condición que se encuentran cada uno de los drones y para la sincronización de los mismos. En todas las etapas, el UAV tiene dos puertas de comunicación, en particular un tema de lectura y otra escritura. Esto es requerido para múltiples versiones que se puede comunicar y recibir información al mismo tiempo, para recibir y enviar información para el maestro y de él.

A continuación, en la figura 25 se expone la máquina de estados desarrollada, se procede a definir cada uno de los estados, y a la definición de funcionalidad de los mismos.

Figura 25

Máquina de estados del enjambre de UAVs



Nota. Vista de la máquina de estados a ser usada en el estudio. (Reyes, 2018)

Para el análisis de la máquina de estado, se indicarán las etapas que lo forman, pero primero, desde el punto de vista del maestro y luego, desde el punto de vista de sus esclavos. A lo largo del desarrollo dado si es un dron simulado o real, porque dependía si estamos en un entorno u otro, el algoritmo se variará ligeramente.

Un ejemplo para entender, son los identificadores de plan de simulación de los UAV, estos son enteros almacenados en una tabla (1, 2, 3 ... n), y en el verdadero UAV, esta es la dirección MAC de los controladores WI -FI. Esto garantiza que sean únicos y permitan identificar los UAVs de manera exacta.

Estados del UAV maestro:

- **START:** en este estado, el UAV es responsable de recibir el mensaje 1, por lo tanto, de sus dos activos (Listener y Talker) el Listener solo se usa. Este mensaje proviene de todos los esclavos y el palo de drones se informa de la posición desde la cual tiene la intención de despegar e identificar al UAV (MAC o ID entero). El dron maestro ejecuta la función de almacenar en cada uno de los UAVs registrados en un hashmap para darles de alta en el vuelo y finalmente entendido todo se incluye a sí mismo.
- **SEND DATA:** durante este paso, el tema Talker es el responsable de enviar el mensaje 2. Este mensaje contiene información relacionada con la altura de la primera subida. Esta vez se usó durante un paso para hacer una partición ordenada y escalar. De aquí, el hilo Listener espera el ACK de este mismo mensaje.
- **SEND LIST:** en esta etapa, el dron maestro está a cargo del mensaje de envío 3. Este mensaje se envía con datos de vuelo personalizado para cada UAV. Para comprender este cálculo en el futuro las secciones se explican con más detalle su operación. En resumen,

envíe rutas preestablecidas, específico de cada plan de cada uno de los UAVs, creando así el enjambre de UAVs. Mientras tanto, el cable Listener escucha el ACK enviado por los esclavos, confirmando así la recepción de sus datos.

- SEND TAKE OFF / TAKING OFF: en esta fase se incluyen ambos estados porque, según las condiciones iniciales, dará un paso u otro.
- SEND TAKE OFF: este paso solo puede ser posible si el UAV maestro no es el primero en despegar. Lo cual verá en la sección dedicada al algoritmo de despegue, los UAVs se eliminan de acuerdo con su proximidad al primer punto de referencia. Por eso si el maestro no es el primero, permanece en esta etapa mientras espera que los esclavos ordenen su despegue. Cuando esto suceda, irá al escenario TAKE OFF.
- TAKING OFF: si el UAV Maestro es el primero en la lista de despegue será enviado para esta fase desde SEND LIST y suba al primer viaje (Altura intermedia del primer punto de referencia). Si no es el primero, solo lo tiene el estado SEND TAKE OFF.
- MOVE TO WAYPOINT: durante esta etapa el UAV maestro tiene diferentes funciones. El primero es dar la orden de que vaya al primer punto geográfico indicado (punto de partida desde el punto final), la segunda función se realiza mientras el UAV está en vuelo, a la que debería escuchar el hilo Listener correspondiente al ACK pertenecientes a esta orden.
- WP REACHED: En esta etapa, el maestro espera la llegada (ACK 9) de todos los UAVs al punto indicado en el movimiento hacia el escenario MOVE TO WAYPOINT. Si todavía hay puntos de referencia en la misión, regrese a la escena móvil MOVE TO WAYPOINT para continuar la misión. Si ya no hay puntos de misión, continúa en el estado LANDING.
- LANDING: este paso se toma cuando todos alcanzaron los puntos de la misión. Dado que el UAV maestro esta en este punto, escuche sus Listener con el paquete ACK 10 enviado

Para los esclavos. después de detectar los todos los UAVs, aterriza de forma autónoma simultáneamente.

- FINISH: los UAVs ya han hecho el aterrizando y se encuentran en un terreno desarmado. Los resultados se obtienen de la experiencia.

Estados de los UAVs esclavos:

- START: los esclavos envían al UAV Maestro la Información a través de su hilo de Talker; específicamente envían el mensaje 1. A este mensaje incluye información de geo posición y de Heading del UAV. Durante esta fase, el cable Listener escucha el mensaje 2, enviado por el UAV, maestro, que contiene la altura del punto intermedio de despegue. Una vez enviado y recibido la información, se transmiten a lo siguiente escenario.
- WAIT LIST: en esta etapa, los UAV esclavos envían el ACK correspondiente a la información recibida durante la fase inicial, y escuchar el mensaje 3, que contiene información personalizada para cada UAV, que cubre la ruta de vuelo y un campo con la orden de despegue.
- WAIT TAKE OFF: durante esta etapa, los UAVs esclavos envían el ACK correspondiente al escenario WAIT LIST (ACK 3), y permanecen que llegue el mensaje 4, responsable de indicar el despegue de los esclavos. En algunos cálculos, este mensaje puede no ser recibido por un esclavo de 32 si es el primero en despegar. Si es así solo envía el ACK y despega.
- TAKING OFF: este paso accede a los UAVs esclavos de dos maneras diferentes:
 - Directamente: cuando el UAV esclavo es el primero en la lista de despegue.

- Indirectamente: cuando el UAV esclavo espera que su turno se haga. Ahora el UAV predecesor llega a su altura elevada, envía el comando a que este esclavo despegue a la altura intermedia.
- MOVE TO WAYPOINT: durante esta etapa, los UAVs esclavos escuchan el orden de movimiento hacia un punto de información. Una vez recibido esta solicitud puede hacer el viaje al siguiente punto de referencia. Si se acabó desde el primer punto de referencia, este viaje está hecho desde la altura intermedia hasta el altura y posición del inicio de la ruta y, si no la primera, avanza al siguiente punto de la ruta.
- WP REACHED: una vez en el punto de la ruta de vuelo indicada en el paso anterior, este paso se logra. Los UAVs esclavos envían un mensaje ACK que confirma que han llegado a este punto. Por lo tanto, dependiendo del punto en el que esté: intermedio o final, vaya a la transición MOVE TO WAYPOINT o aterrizar a través del estado LANDING.
- LANDING: este paso se da cuando los esclavos alcanzan su último punto. Una vez llegó, envían un mensaje de confirmación ACK informando al UAV maestro de que están listos para un aterrizaje. Mientras tanto, esperan mediante Listener la orden de descender emitida por el maestro y una vez recibida aterrizan.
- FINISH: el UAV ya ha aterrizado y se encuentra en tierra desarmado. Se obtienen los resultados de la experiencia.

Algoritmo para el enjambre de UAVs

Algoritmo de despegue

Uno de los momentos más críticos durante el vuelo de un enjambre de UAVs es el despegue. Cuando los UAVs despegan, generalmente se encuentran en una pequeña

localización, muy cerca de otros. Para hacer un despegue seguro y sincronizado, se debe implementar un algoritmo para responder a estas dos necesidades.

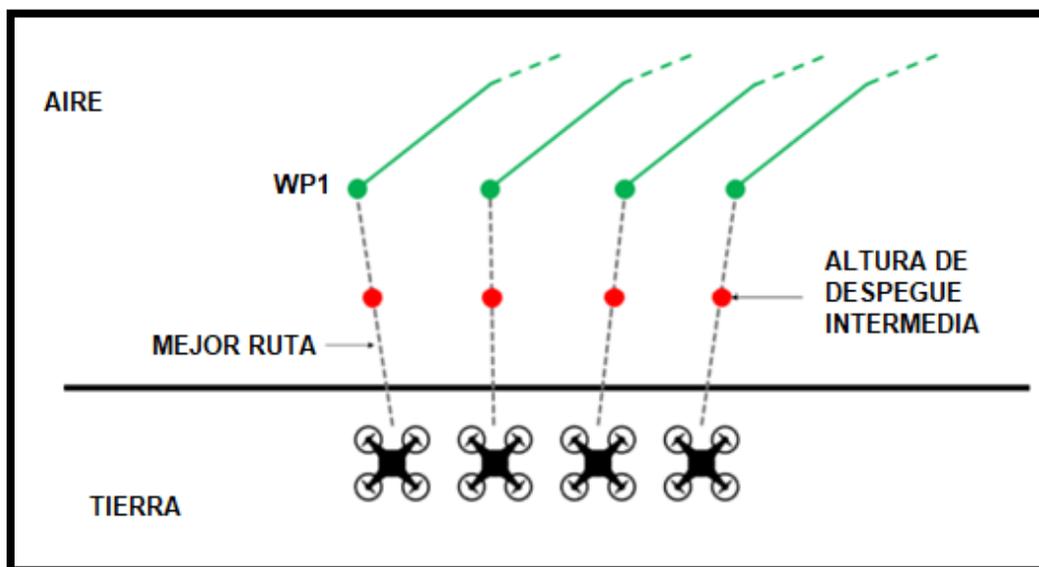
El algoritmo desarrollado funciona de la siguiente manera: el UAV Master, durante su estado inicial, recibe información de todos los UAVs que quieren ser parte del algoritmo del enjambre. La información que el maestro recibe es la ubicación actual del esclavo y su identificador único. Por el momento, el UAV maestro tiene tres datos necesarios para calcular el despegue:

1. Ubicación de los Esclavos.
2. Identificador de los Esclavos.
3. Rutas calculadas por el Maestro para la cantidad exacta que forma el enjambre.

Se observó en los datos anteriores, el UAV maestro toma datos para realización el precálculo de las rutas de los UAVs esclavos, conociendo solo la cantidad de UAVs que formarán el enjambre. Más tarde, el algoritmo de aterrizaje es responsable de asignar a cada uno de estos caminos hacia el UAV esclavo que está más cerca de cada uno de ellos, Para evitar cualquier colisión entre ellos. Como medida seguridad adicional, el despegue se realiza en dos fases, primero despegan hacia el punto medio y, una vez que se alcanza el punto, se da el orden que el próximo UAV despegue. Finalmente va a su primer Waypoint como podemos ver en la Figura 26:

Figura 26

Algoritmo de despegue propuesto



Nota. Vista de la trayectoria de despegue. (Reyes, 2018)

El algoritmo desarrollado sigue los siguientes puntos durante su ejecución:

1. Las posiciones iniciales de todos los UAVs que son parte del enjambre son obtenidas.
4. Se intercambia el UAV seleccionado A cada una de las rutas precalculadas por el maestro y se identifica el camino más cercano a él.
5. El punto "2" es ejecutado para cada uno de los UAVs para determinar el mejor posicionamiento de cada uno.
6. La mejor posición se determina mediante el siguiente cálculo: Ajuste mínimo cuadrado entre UAVs. Este cálculo le permite usar el conocimiento de la posición geográfica de cada una de los UAVs exagera la distancia que separa a cada uno del suelo. Esto significa que un orden de la tierra en la que los UAVs están relativamente cercanos se puede determinar

claramente cuál es el mejor UAV para cada misión. Prerrequisito del maestro. Se realiza el siguiente cálculo iterativo para cada distanciaDronSeleccionado':

$$acumulación = acumulación + distanciaDronSeleccionado^2$$

7. Dado que la distancia se expande entre los UAVs en tierra, se calcula la mejor posición de cada aeronave en posiciones más cercana de cada UAV.
8. Determinada las posiciones más cercanas a cada una de las rutas, se seleccionan rutas que serán las mejores adaptaciones a la ruta central y proceda a su misión.
9. Finalmente, cada uno de los esclavos recibe la ruta precalculada por el maestro más cercano que está en su posición inicial.

Algoritmo de vuelo

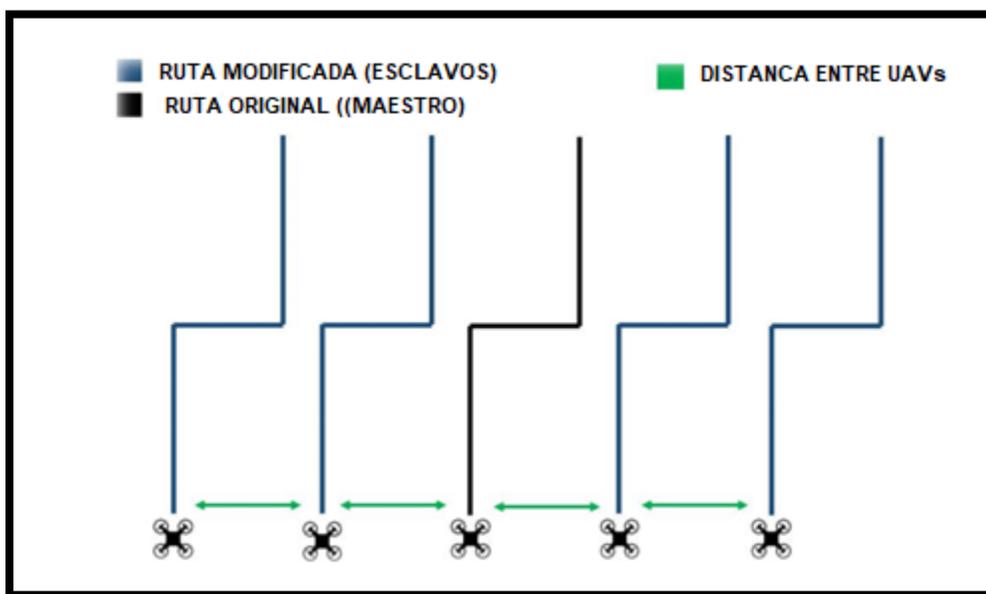
Durante el vuelo del UAV se requiere un sistema que sincroniza el movimiento de él mismo. Cuando vuela en formación de un enjambre, adquiere una relevancia significativa de sincronización entre todos los participantes del enjambre. Para que sea posible debe haber un cierto tipo de comunicación en toda la trayectoria para volar.

En el algoritmo desarrollado, optaron por sincronizar todos los UAVs en cada uno de los puntos de pase que componen la ruta de vuelo. Esta solución establece que, para cada uno de los puntos en el camino, el maestro tiene que ser responsable de verificar que todos los UAVs han llegado al mismo punto. Dado que todos están al mismo tiempo, el UAV maestro continúa con enviar la solicitud para continuar la misión y para que los UAVs pasen al siguiente Waypoint.

El componente principal del algoritmo de vuelo es la ruta que cada UAV tiene. Esta ruta es calculada por el maestro y cada una son exactamente los mismos que los demás, pero con una variación de distancia entre UAVs. La Figura 27 aclara este concepto:

Figura 27

Algoritmo de vuelo



Nota. Vista de la trayectoria de vuelo. (Reyes, 2018)

Para hacer posible esta replicación de ruta, se ha desarrollado la siguiente fórmula matemática que replica en el eje X e Y la posición del Maestro:

$$X_2 = X_1 \times \cos \alpha + Y_1 \times \sin \alpha + X_0$$

$$Y_2 = Y_1 \times \cos \alpha - X_1 \times \sin \alpha + Y_0$$

El cálculo reproduce cada uno de los puntos de interés según la ruta original y la cantidad de drones que componen el enjambre. El camino original es el que almacena el UAV maestro en

la memoria. Durante la configuración de vuelo, esta fórmula permite modificar la separación existente entre los UAVs de la ruta, permitiendo adaptarse a las diferentes necesidades del usuario.

Algoritmo de waypoint alcanzado

Las rutas de vuelo almacenadas en el UAV son formadas por Waypoints. Estos puntos de vuelo son responsables de los puntos de señalización a través del cual el UAV debe ir para cumplir su misión. Si no se desarrolla una solución para controlar estos eventos, los UAVs dejarían el vuelo hacia cada punto, reduciendo su velocidad para acercarse de forma segura y lentamente al Waypoint. Después tomarían su próximo punto en la misión.

En un vuelo de un enjambre, este comportamiento no es requerido ya que el vuelo sería lento y con interrupciones. Para evitarlo se desarrolló un método de detección a lo que se considera la distancia que se logró el Waypoint ser alcanzado. Esta medida es posible gracias a la inclusión de un parámetro llamado threshold.

La modificación del threshold nos ayudara a definir a que distancia con referencia al Waypoint puede considerarse alcanzado, ofreciendo, durante este intervalo de tiempo (hasta que realmente llegues al Waypoint), la posibilidad de hacer envío de datos entre UAVs y cree un paso a través de los Waypoints más suaves y rápidos.

Algoritmo para el aterrizaje

Para aterrizar, se tuvieron en cuenta diferentes opciones. Dependiendo del uso que se dará al algoritmo, algunos pueden ser mejor que otros, por ejemplo, aterrizar en espacios

pequeños sería práctico que todos los UAVs se acercan a la distancia mínima de seguridad entre ellos y la tierra. Esta solución es más pesada en términos de tiempo de aterrizaje que lo usaron en el algoritmo, y sería práctico cuando tuvieran que usar grandes cantidades de UAVs. La solución final que fue elegido es la más simple y más rápido de realizar, pero a su vez las necesidades terrestres se agrandan, porque el aterrizaje se mantiene la distancia existente entre el UAV en su último punto de vista de la misión.

Para que el enjambre pueda aterrizar, los esclavos deben informar al maestro a través de un mensaje, lo que indica que ya están en su punto final de la misión. Una vez en ese momento, los esclavos y el maestro verifique la información recibida y, si es correcta, el maestro envía un mensaje de informe que todos deberían ir a su etapa LANDING.

Una vez que se reciba la orden, el UAV irá a su aterrizaje autónomo, que terminará cuando llegue a la tierra. Automáticamente el controlador de vuelo cambiará su condición para desarmar el aterrizaje. Esto significa que el UAV está en la tierra con todos los motores apagados y que ha sido satisfecho tu aterrizaje.

Velocidades de procesamiento que se requieren y cantidad de paquetes a procesar

El proceso de análisis se realiza considerando diferentes medidas cuantitativas, algunas medidas influyen directamente en el rendimiento de la red que permite un estudio comparativo de estos protocolos para declaración de la simulación. Entonces a continuación se describen cada uno de los las medidas a evaluar:

Throughput. - Define como el número de paquetes que el receptor recibe con éxito el transmisor en un período de tiempo. Se puede definir como la cantidad de datos totales recibidos por el receptor del remitente realmente dividido por el momento que toma el receptor para obtener el último paquete, se mide en bits por segundo.

La fórmula para calcular el Throughput se define a continuación:

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Paquetes entregados exitosamente}}{\text{Tiempo de transmision}} [\text{bps}]$$

Tasa de entrega de paquetes (Packet Delivery Ratio, PDR). – Esta es la relación entre el número de paquetes de dato enviados y los datos realmente recibidos; Generalmente esta medida está representada como porcentaje. Cuanto mayor es la PDR, mejor el desempeño de la red. La fórmula para calcular la tasa de entrega del paquete es:

$$\text{Tasa de entrega de paquetes} = \frac{\text{Paquetes recibidos}}{\text{Paquetes perdidos}} \times 100$$

Retardo extremo a extremo. – Esta métrica representa el retraso promedio de un extremo al otro e indica el tiempo que llevó un paquete para viajar de origen al destino; su unidad es expresado en segundos.

La fórmula para calcular el Retardo de extremo a extremo es la siguiente:

$$\text{Retardo extremo a extremo} = \text{tiempo de recepción} - \text{tiempo de envio} [\text{seg}]$$

La demora en un sistema de comunicación es una métrica que debe tenerse en cuenta porque se puede ver un alto retraso como un bajo rendimiento de la red en general.

Ocupando un total de 240 bits. Cada paquete puede tener un payload de máximo 1472 Bytes, es por ello que realizando el siguiente cálculo:

$$(1472 \times 8) - 240 = 11536 \text{ bits totales para payload}$$

Cada Waypoint está formado por coordenadas X, Y, Z por tanto cada uno ocupa 192

bits. Si se divide el número de bits disponibles en el payload entre el tamaño de un Waypoint:

$$\text{Número de Waypoints} = \frac{11536}{192} = 60$$

Podemos concluir que el número máximo de Waypoints que puede tener una misión es de 60 WP.

Hardware (tarjetas comunicación y controladoras)

Tarjetas para manejo de UAVs

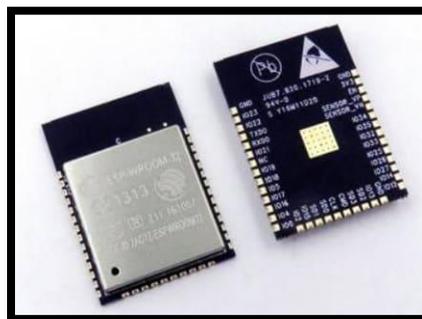
Módulo ESP32

El ESP32 está altamente integrado con interruptores de antena incorporados, balun de RF, amplificador de potencia, amplificador de recepción de bajo ruido, filtros y módulos de gestión de potencia. El ESP32 añade una funcionalidad y versatilidad inestimables a sus aplicaciones con unos requisitos mínimos de placa de circuito impreso (PCB). (Beningo, 2020)

En la figura 28 se aprecia la vista del módulo ESP32.

Figura 28

Vista de Modulo ESP32



Nota. En el grafico se puede observar el módulo ESP32. (Beningo, 2020)

ESP32-WROOM-32 es un potente módulo genérico de Wi-Fi+BT+BLE MCU que se dirige a una amplia variedad de aplicaciones, que van desde redes de sensores de bajo consumo hasta las tareas más exigentes, como la codificación de voz, la transmisión de música y la decodificación de MP3. (Beningo, 2020)

En el núcleo de este módulo está el chip ESP32-D0WDQ6*. El chip incorporado está diseñado para ser escalable y adaptable. Hay dos núcleos de la CPU que pueden ser controlados individualmente, y la frecuencia del reloj de la CPU es ajustable de 80 MHz a 240 MHz. El usuario también puede apagar la CPU y hacer uso del coprocesador de baja potencia para vigilar constantemente los periféricos en busca de cambios o cruce de umbrales. El ESP32 integra un rico conjunto de periféricos, que van desde sensores táctiles capacitivos, sensores Hall, interfaz de tarjeta SD, Ethernet, SPI de alta velocidad, UART, I2S e I2C. (Beningo, 2020)

La integración de Bluetooth, Bluetooth LE y Wi-Fi garantiza que se pueda apuntar a una amplia gama de aplicaciones, y que el módulo sea a prueba de futuro: el uso de Wi-Fi permite un gran alcance físico y la conexión directa a Internet a través de un router Wi-Fi, mientras que el uso de Bluetooth permite al usuario conectarse cómodamente al teléfono o emitir balizas de baja energía para su detección. La corriente de reposo del chip ESP32 es inferior a 5 μ A, lo que lo hace adecuado para aplicaciones electrónicas de batería y vestimenta. (Beningo, 2020)

El ESP32 soporta una velocidad de datos de hasta 150 Mbps, y una potencia de salida de 20,5 dBm en la antena para asegurar el más amplio rango físico. Como tal, el chip ofrece especificaciones líderes en la industria y el mejor rendimiento para la integración electrónica, el alcance, el consumo de energía y la conectividad. El sistema operativo elegido para el ESP32 es freeRTOS con LwIP; TLS 1.2 con aceleración por hardware también está incorporado. También se admite la actualización segura (cifrada) por aire (OTA), de modo que los

desarrolladores pueden actualizar continuamente sus productos incluso después de su lanzamiento. (Beningo, 2020)

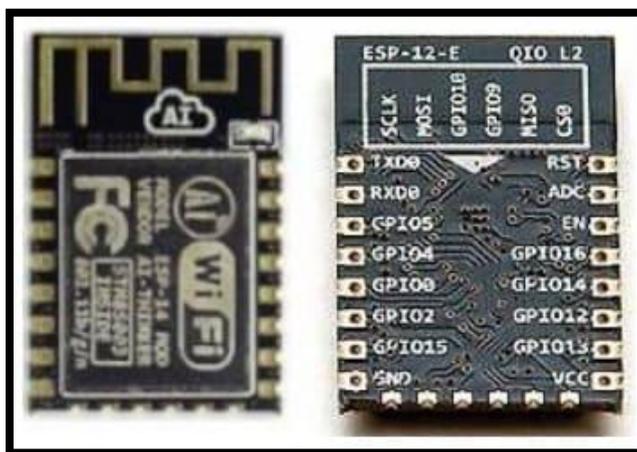
Módulo ESP8266

El ESP8266EX de Espressif ofrece una solución Wi-Fi SoC altamente integrada para satisfacer las continuas demandas de los usuarios de un uso eficiente de la energía, un diseño compacto y un rendimiento fiable en la industria del Internet de las cosas. (Hernández, 2016)

En la figura 29 se observa la vista del módulo ESP8266.

Figura 29

Vista del Módulo ESP8266



Nota. En la figura se puede observar el módulo ESP8266. (Hernández, 2016)

Con las capacidades de red Wi-Fi completas y autónomas, el ESP8266EX puede funcionar como una aplicación autónoma o como esclavo de una MCU anfitriona. Cuando ESP8266EX alberga la aplicación, se inicia rápidamente desde el flash. La caché de alta velocidad integrada ayuda a aumentar el rendimiento del sistema y a optimizar la memoria del sistema. Además, el ESP8266EX puede aplicarse a cualquier diseño de microcontrolador como adaptador Wi-Fi a través de interfaces SPI/SDIO o UART. (Hernández, 2016)

El ESP8266EX integra interruptores de antena, balun de RF, amplificador de potencia, amplificador de recepción de bajo ruido, filtros y módulos de gestión de potencia. El diseño compacto minimiza el tamaño del PCB y requiere circuitos externos mínimos.

Además de las funcionalidades Wi-Fi, el ESP8266EX también integra una versión mejorada del procesador de 32 bits de la serie L106 Diamond de Tensilica y el SRAM en chip. Puede ser interconectado con sensores externos y otros dispositivos a través de las GPIOs. El Kit de Desarrollo de Software (SDK) proporciona códigos de muestra para varias aplicaciones. (Hernández, 2016)

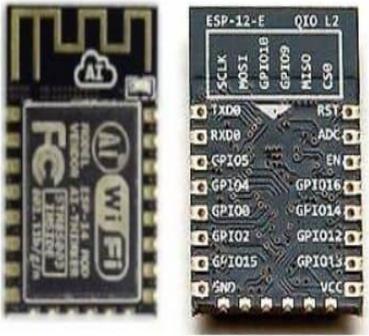
La Plataforma de Conectividad Inteligente de Espressif Systems (ESCP) permite características sofisticadas incluyendo:

- Cambio rápido entre el modo de sueño y el modo de despertar para un propósito de eficiencia energética;
- Sesgo de radio adaptativo para el funcionamiento de baja potencia
- Procesamiento avanzado de la señal
- Mecanismos de cancelación de estímulos y coexistencia de RF para el celular común, el Bluetooth,
- Mitigación de interferencias DDR, LVDS, LCD

Veamos cuál es la diferencia entre los chips ESP32 y ESP8266. Tanto **el ESP32 como el ESP8266 son SOC (Systems on Chip) basados en WiFi**. Ambos tienen un procesador de 32 bits, el ESP32 es un CPU de doble núcleo de 80Mhz a 240MHz y el ESP8266 es un procesador de núcleo único de 160MHz. A continuación, en la tabla 9, vamos a compararlos en profundidad. (Hernández, 2016)

Tabla 9

Comparativa de características entre tarjeta ESP32 y ESP8266

Característica	ESP32	ESP8266
Módulo		
CPU	Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 con 600 DMIPS	Xtensa Single-core 32-bit L106
Velocidad del WiFi	802.11n hasta 150 Mbps	Hasta 72,2 Mbps
Protocolo WiFi	802,11 b/g/n (2,4 Ghz)	802,11 b/g/n (2,4 Ghz)
GPIO	36	17
Bluetooth	SÍ	NO
DAC	Dos canales DAC de 8 bits	NO
ADC	SAR de 12 bits	SAR de 10 bits
Canales ADC	8 canales	Un solo canal

Característica	ESP32	ESP8266
Referencia del CAD V	1100mV	1100mV
SPI/I2C/I2S/UART	4/2/2/3	2/1/2/2
Modos WiFi	Station/SoftAP/SoftAP+Station/P2P	Station/SoftAP/SoftAP+Station/P2P
Sensor táctil	SÍ (8-Canales)	NO
Sensor de temperatura	SÍ	NO
Sensor de efecto Hall	SÍ	NO
SRAM	520 kB (8 kB de SRAM en RTC)	Tamaño de la RAM < 50 kB
FLASH (externo)	4Mbytes (también disponible más alto)	4Mbytes
ROM	448 kB de ROM para el arranque y las funciones básicas	No hay ROM programable
Protocolos de red	IPv4, IPv6, SSL, TCP/UDP/HTTP/FTP/ <u>MQTT</u>	IPv4, TCP/UDP/HTTP/MQTT

Característica	ESP32	ESP8266
Rango de temperatura de funcionamiento	-40°C ~ +85°C	-40°C ~ 125°C
Tensión de funcionamiento	2.5V ~ 3.6V	2.5V ~ 3.6V
Corriente operativa	Promedio: 80 mA	Valor medio: 80 mA
Precio	4 € – 10 €	€3 – €6

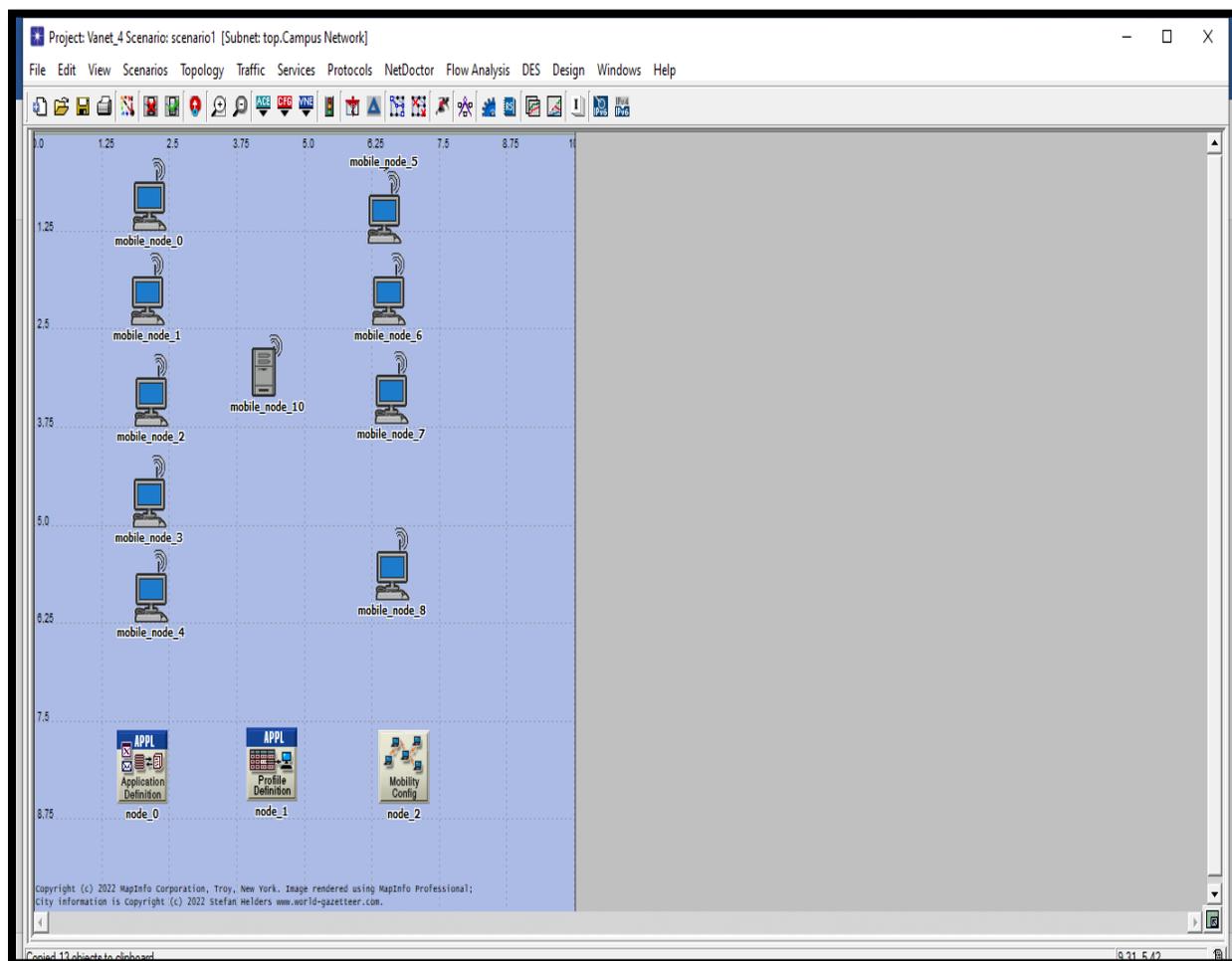
Nota. En la tabla se representa una comparativa de las características de las tarjetas controladoras a ser usadas para el estudio. (Hernández, 2016)

Evaluación de protocolos de comunicación

Para el análisis de las distintas posibilidades de configuración de la red Ad Hoc se tiene la posibilidad de usar el software previamente preseleccionado el cual se observa en la figura 30 en la cual se puede observar cada una de los elementos que son necesarios para formar la red Ad Hoc y su óptimo funcionamiento.

Figura 30

Vista de los elementos que integran la red Ad Hoc en el software OPNET



Nota. En la figura se puede observar los elementos del software OPNET

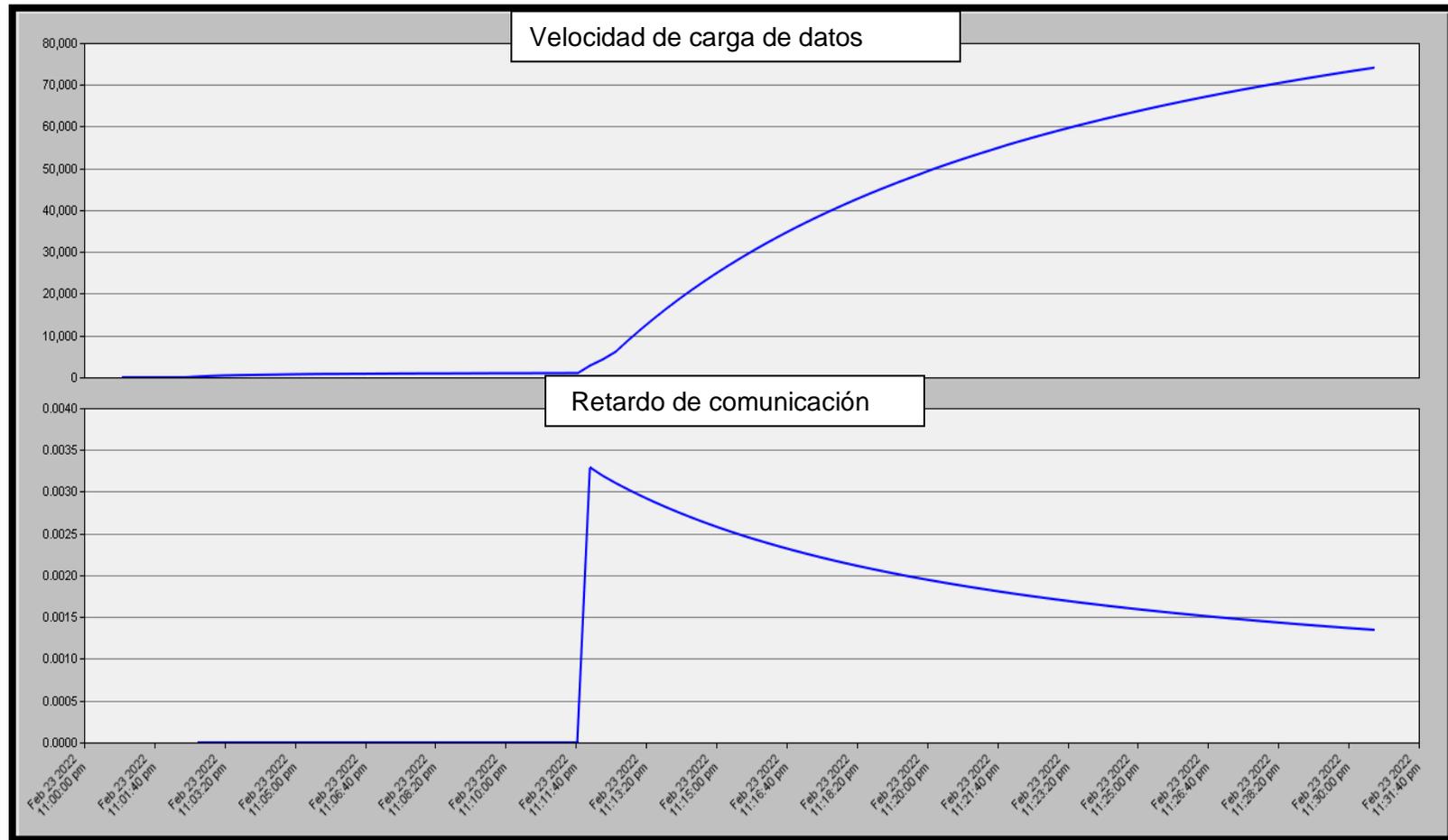
Protocolo AODV

El protocolo AODV (Ad hoc On demand Distance Vector) es un protocolo de enrutamiento reactivo para redes Ad-Hoc, establece las rutas bajo demanda cuando se necesita establecer comunicación entre dos nodos, y sólo mantiene información de la ruta que los comunica, es un protocolo de vector distancia, es decir, su métrica está basada en el número de saltos. Este protocolo es simple y liviano, busca las rutas cuando existe una solicitud, y escoge la ruta que responda primero, ya que asume que la respuesta se transmitió por la ruta más corta. Además, los mensajes de enrutamiento sólo tienen información sobre el Origen y el Destino, y no de la ruta completa, por lo que tienen un tamaño fijo, estos mensajes usan un número de secuencia de destino con el que se puede verificar si la ruta es actual, también se usa para evitar bucles en la red.

Es importante mencionar que no siempre el mensaje que llega primero fue el que usó la ruta más corta, por lo que, para reducir el ancho de banda utilizado, las rutas se mantienen activas hasta que no se necesiten, o falle algún enlace. (Rey et al., 2014)

Figura 31

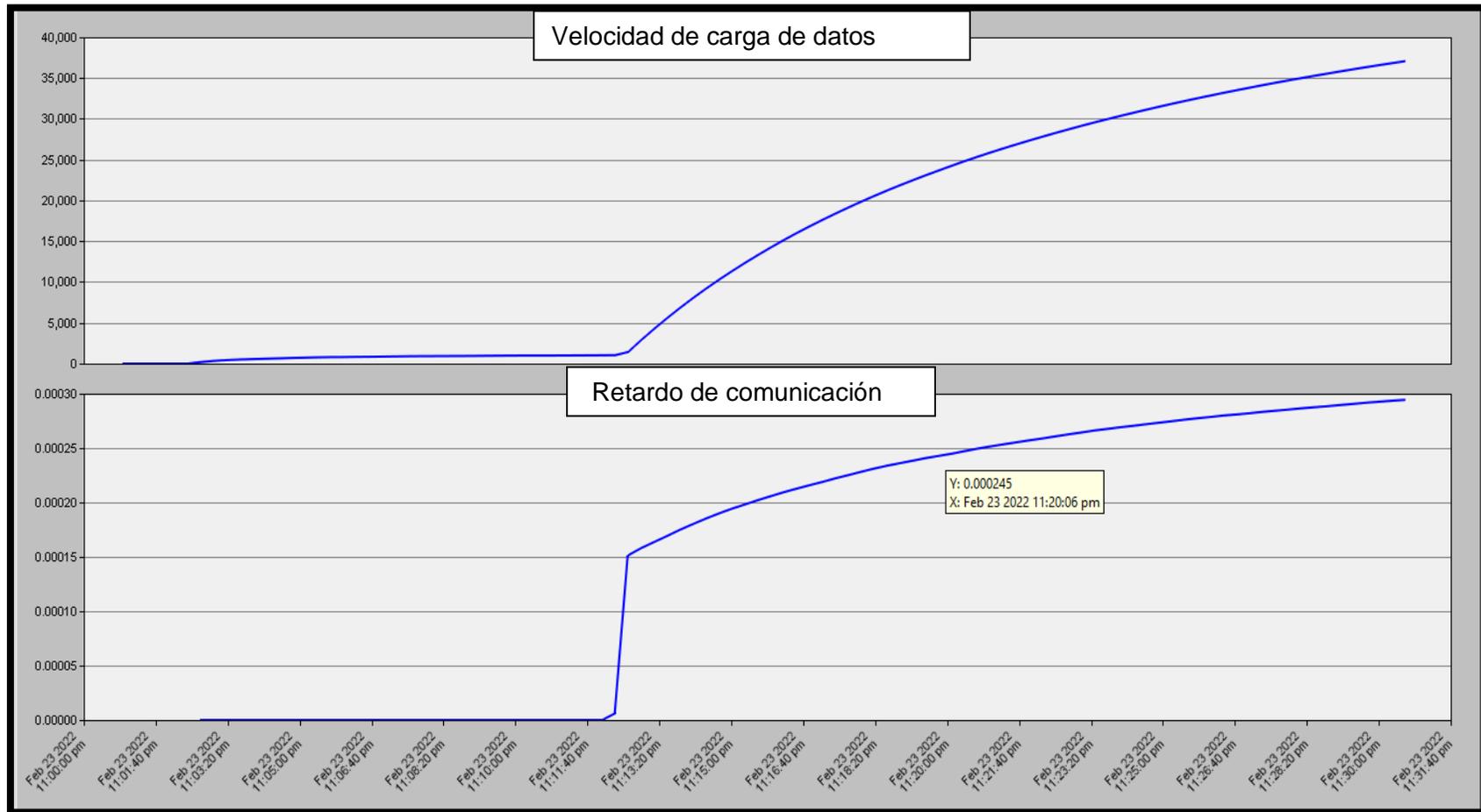
Protocolo AODV con el protocolo físico Salto de frecuencia



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo AODV y protocolo físico Salto de frecuencia.

Figura 32

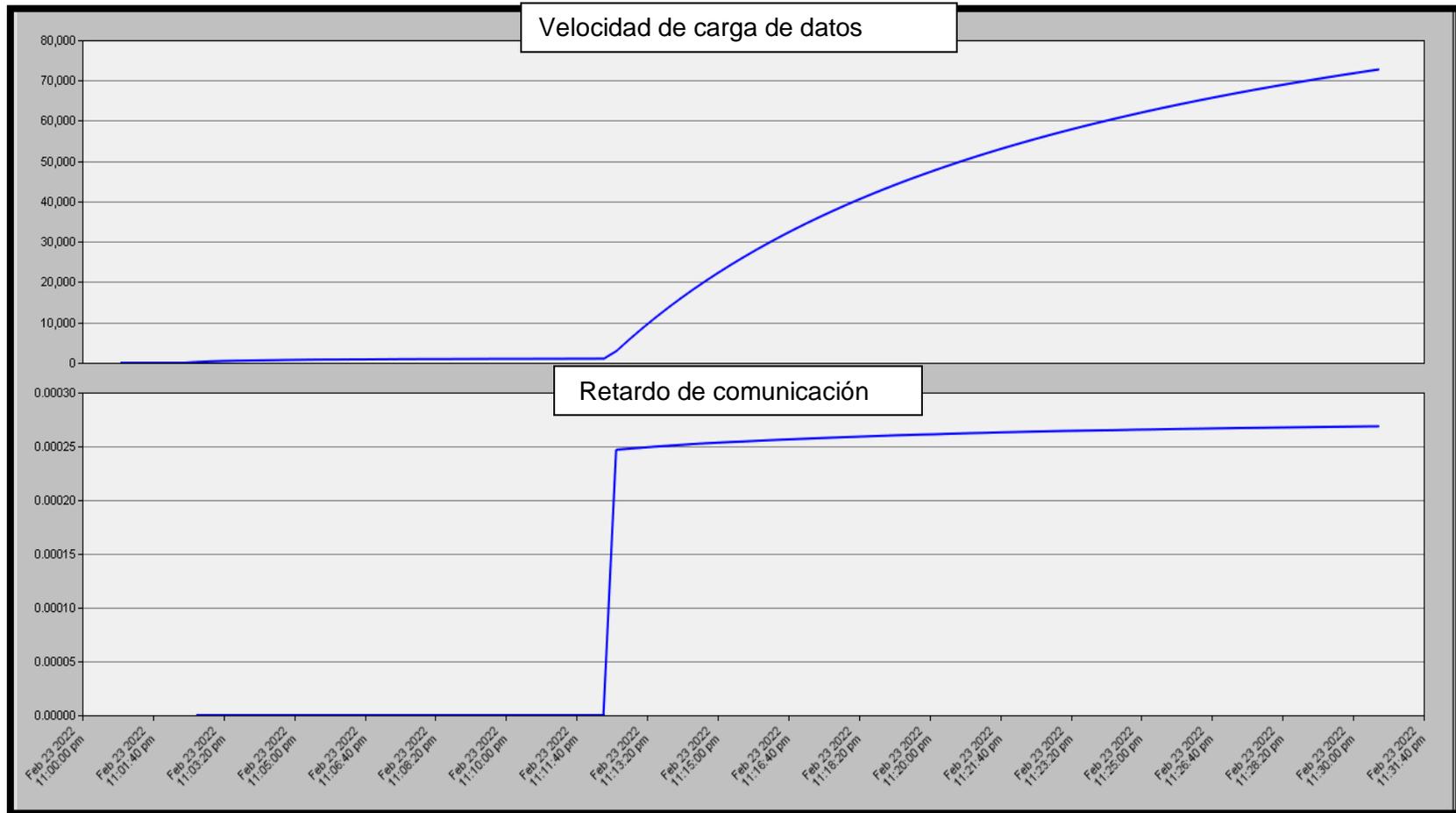
Protocolo AODV con el protocolo físico Frecuencia Directa



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo AODV y protocolo físico frecuencia directa.

Figura 33

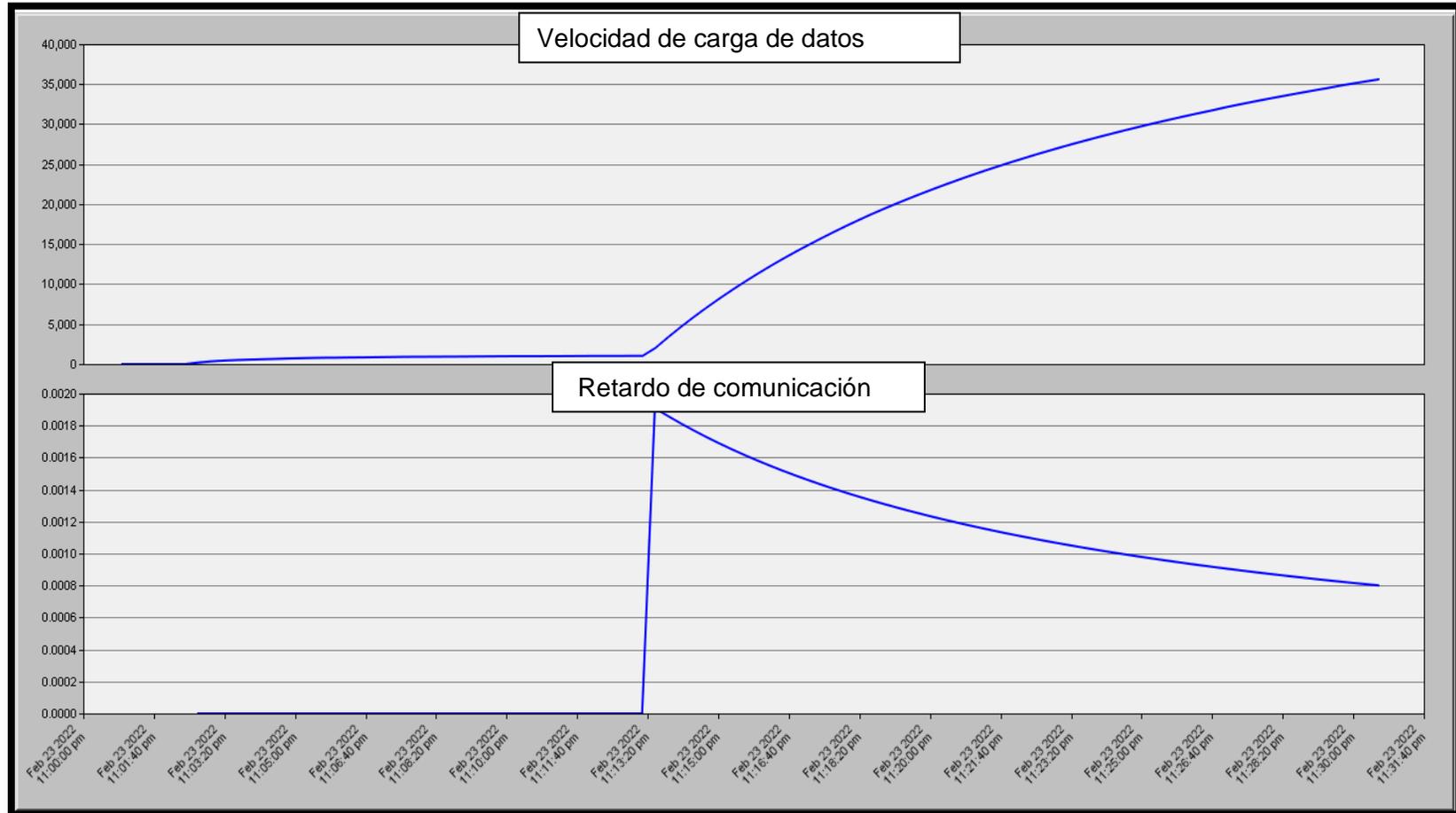
Protocolo AODV con el protocolo físico Infrared



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo AODV y protocolo físico infranet.

Figura 34

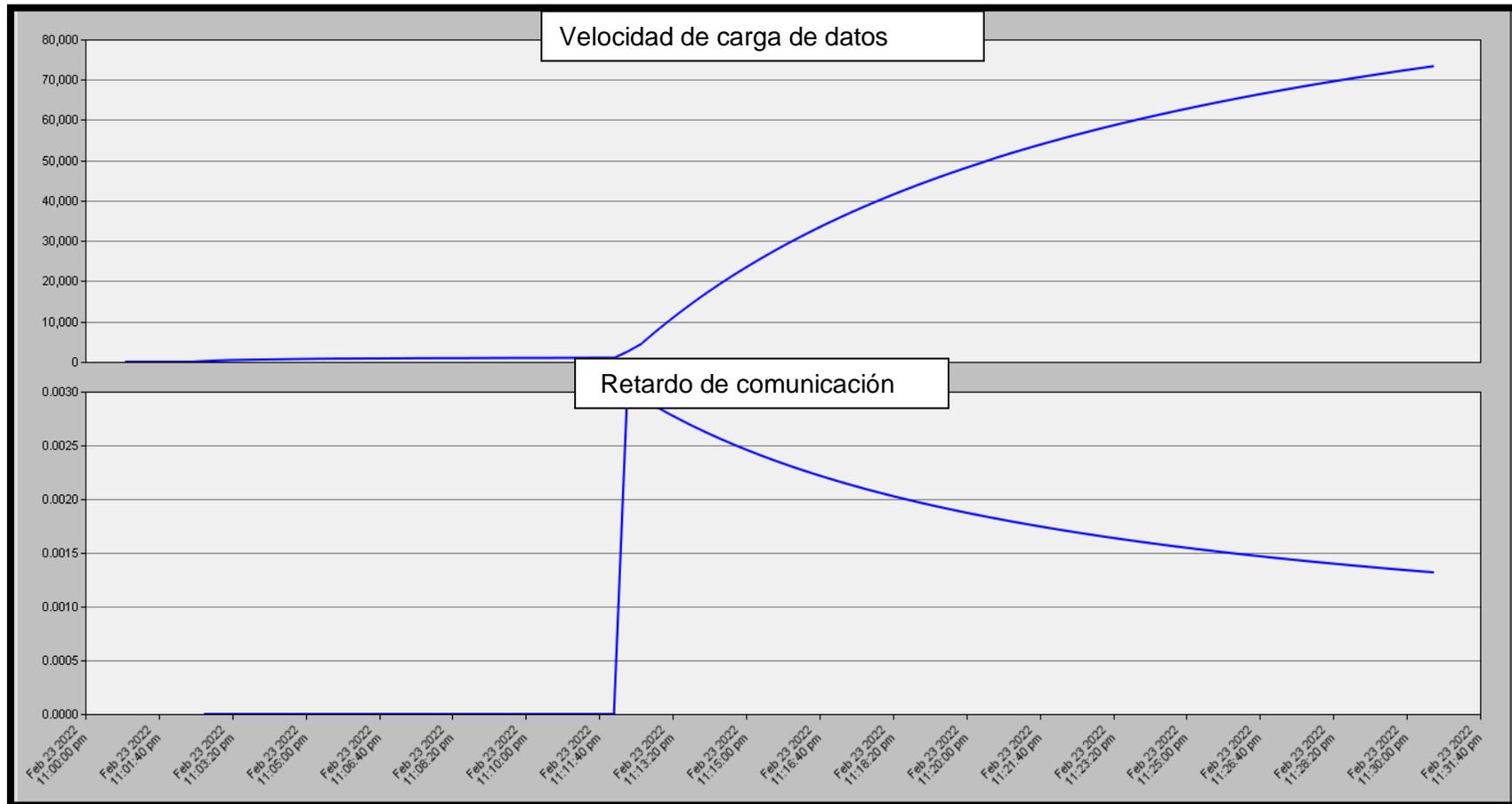
Protocolo AODV con el protocolo físico OFDM (802.11a)



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo AODV y protocolo físico OFDM (802.11a).

Figura 35

Protocolo AODV con el protocolo físico Tarifa extendida PHY (802.11g)



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo AODV y protocolo físico Tarifa extendida PHY (802.11g).

Interpretación:

De acuerdo a la figura 31 se puede visualizar que la velocidad de transmisión se encuentra en los rangos calculados para el normal funcionamiento de la red así también que el DELAY (Retraso) va disminuyendo de acuerdo el paso del tiempo lo que nos da una mejor estabilidad en la comunicación de la red.

En la figura 32 se puede observar que la velocidad de transmisión se encuentra entre los rangos calculados para el normal funcionamiento de la red, pero en cambio que el DELAY (Retraso) va aumentando al pasar el tiempo lo que originara problemas en el funcionamiento de la red.

En la figura 33 se observa que la velocidad de transmisión va aumentando con el pasar del tiempo, pero permanece dentro de los rangos calculados para que tenga una óptima comunicación de la red además que el DELAY (Retraso) tiene un cambio en un determinado instante para luego estabilizarse y permanecer constante, lo que beneficia en la comunicación de la red.

En la figura 34 se observa que la velocidad de transmisión se eleva, pero permaneciendo dentro del rango de velocidad calculado beneficiando para una óptima comunicación de la red a su vez que el DELAY (Retraso) con el pasar del tiempo va disminuyendo lo que permite tener una comunicación óptima.

En la figura 35 se obtiene una velocidad de transmisión dentro del rango calculado para tener una red estable además que el DELAY (Retraso) con el pasar del tiempo va disminuyendo lo que beneficia de la gran manera para que los datos de la comunicación de la red no sé pierdan.

Interpretación general del Protocolo AODV y los diferentes protocolos físicos:

Al usar el protocolo AODV se puede apreciar en cada una de las gráficas anteriores que la velocidad de transmisión es la indicada en cada uno de los protocolos físicos indicados salvo que al ir cambiando de protocolo físico el DELAY (Retraso) se ve afectado mejorando la comunicación o siendo un limitante para tener una comunicación óptima, por lo que se determinó que el protocolo físico indicado para ser usado es el PHY (802.11g) el cual nos brinda características óptimas de comunicación necesarias para el funcionamiento óptimo de la red.

Protocolo DSR

El protocolo de enrutamiento DSR (Dynamic Source Routing) es un protocolo reactivo, baja demanda, no almacena información sobre el estado de la red, únicamente rutas calculadas en caché a destinos que hacen parte de esta, es decir, que los nodos no se enteran del estado actual de la red, pero cuando se desea transmitir un mensaje, el nodo inicia una serie de procesos para definir la ruta hasta el destino, el nodo origen decide que ruta va a usar una vez analizadas las opciones, esta ruta se agrega al encabezado del paquete de datos y los nodos intermedios retransmiten el paquete al nodo siguiente, esto hace que se limiten los saltos pero los nodos intermedios disminuyen su procesamiento. (Rey et al., 2014)

DSR posee dos mecanismos, uno para descubrir las rutas desde el nodo origen hasta el nodo destino, llamado Route Discovery, y otro para hacerle mantenimiento a las rutas ya encontradas con el fin de verificar que se encuentren activas en el momento de necesitarlas y además confirmar que los paquetes si llegan correctamente a su destino, llamado Route

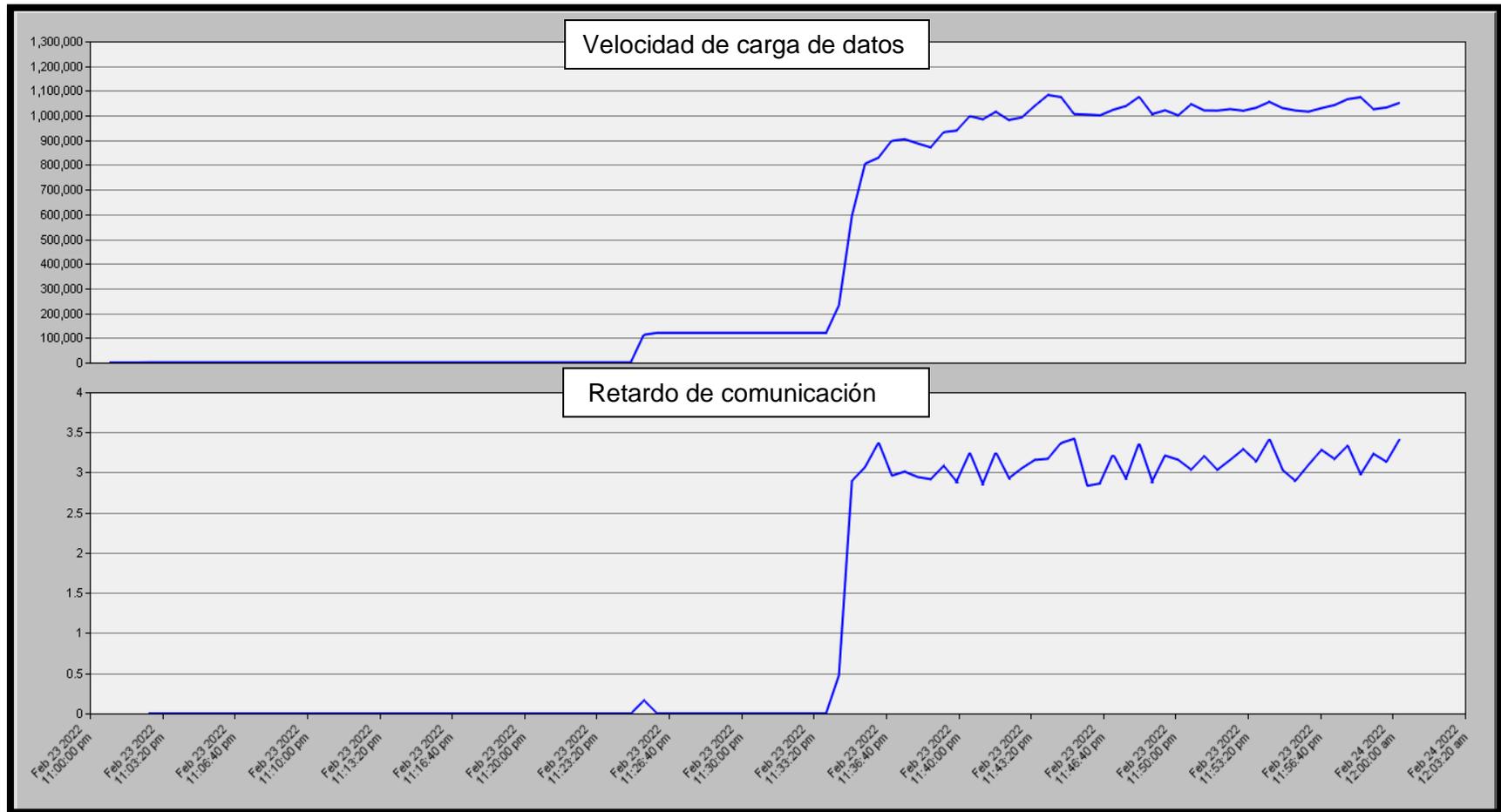
Maintenance.

DSR funciona en dos fases que operan enteramente bajo demanda:

- **Descubrimiento de ruta:** Durante este proceso, el nodo de origen observa la caché de rutas en busca de un trayecto hacia el destino, y de existir esta envía los datos, de lo contrario difunde un paquete RREQ a sus vecinos hasta que se alcanza el destino. Cuando la solicitud llega al destino, una respuesta de ruta RREP es enviada de vuelta al nodo de origen a través de la ruta registrada que tiene el menor número de saltos.
- **Mantenimiento de ruta:** En el proceso de mantenimiento de las rutas, un nodo es capaz de detectar (mientras utiliza una ruta hacia el destino), si la topología de red ha cambiado de tal modo que ya no pueda utilizar este trayecto debido a que un enlace ha dejado de funcionar. Cuando se indica que la ruta hacia el destino ha dejado de ser viable, el nodo puede intentar utilizar cualquier otro trayecto conocido, o puede invocar el proceso de descubrimiento de ruta para encontrar una nueva. El mantenimiento de ruta se utiliza solo cuando el nodo realmente envía paquetes al destino. DSR tiene un mejor desempeño en un entorno estático o de baja movilidad. Algunas de las desventajas del protocolo son que el mecanismo de mantenimiento de las rutas no repara localmente un enlace dañado, que la demora del proceso de establecimiento de la conexión es mayor que en los protocolos basados en tablas y que la sobrecarga de enrutamiento es directamente proporcional al tamaño del trayecto. (Rey et al., 2014)

Figura 36

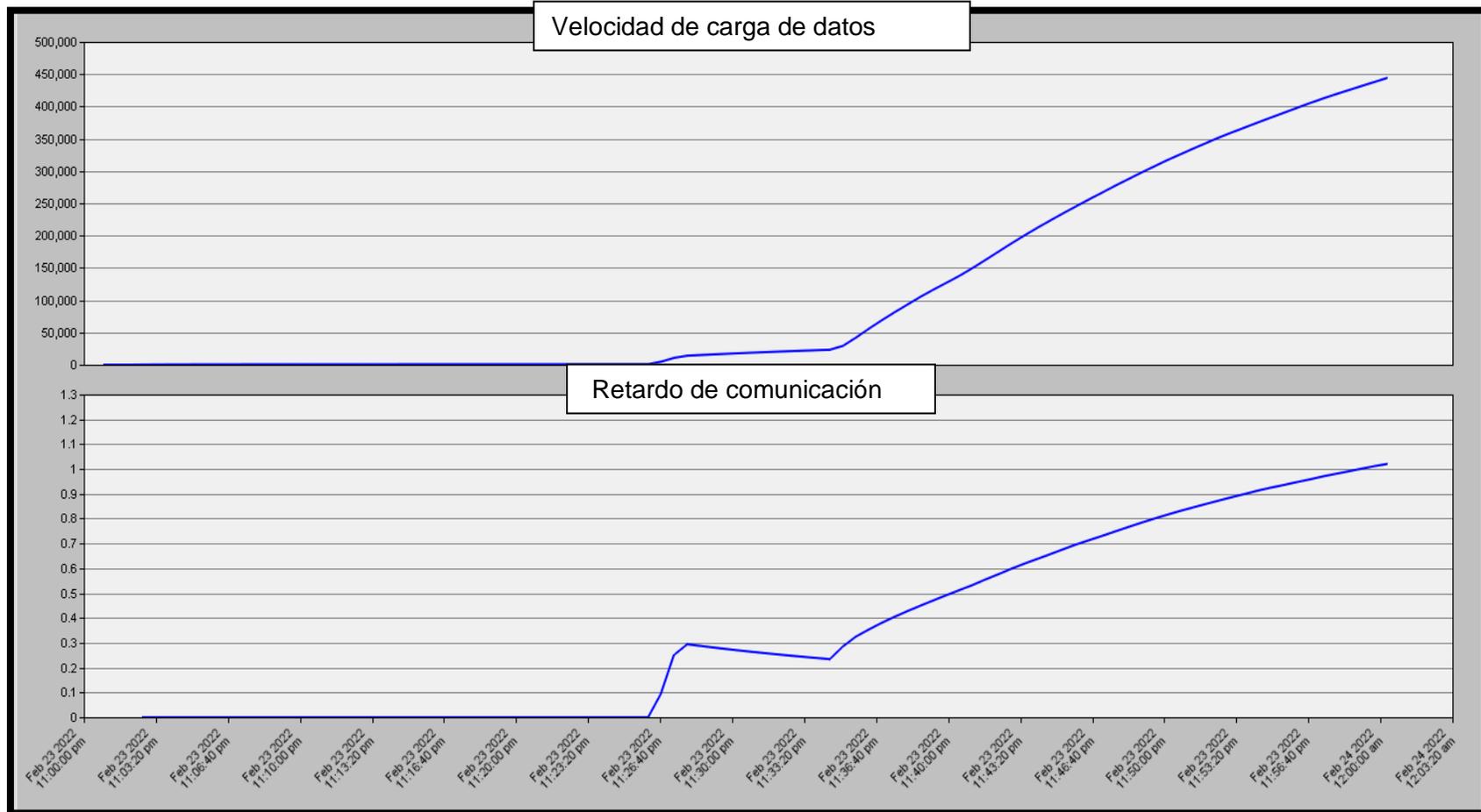
Protocolo DSR con el protocolo físico Salto de frecuencia



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo DSR y protocolo físico Salto de frecuencia.

Figura 37

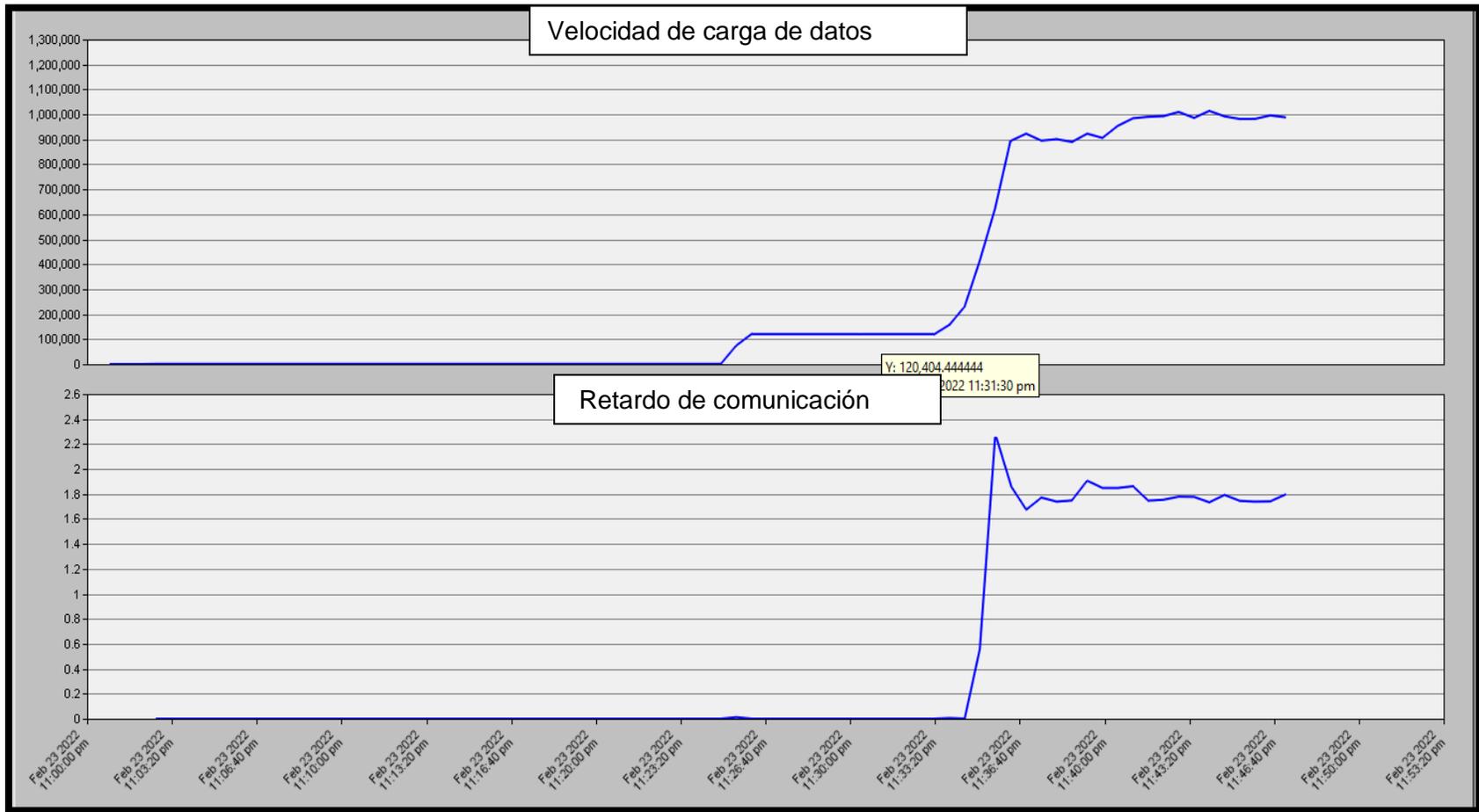
Protocolo DSR con el protocolo físico Secuencia directa



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo DSR y protocolo físico Secuencia directa.

Figura 38

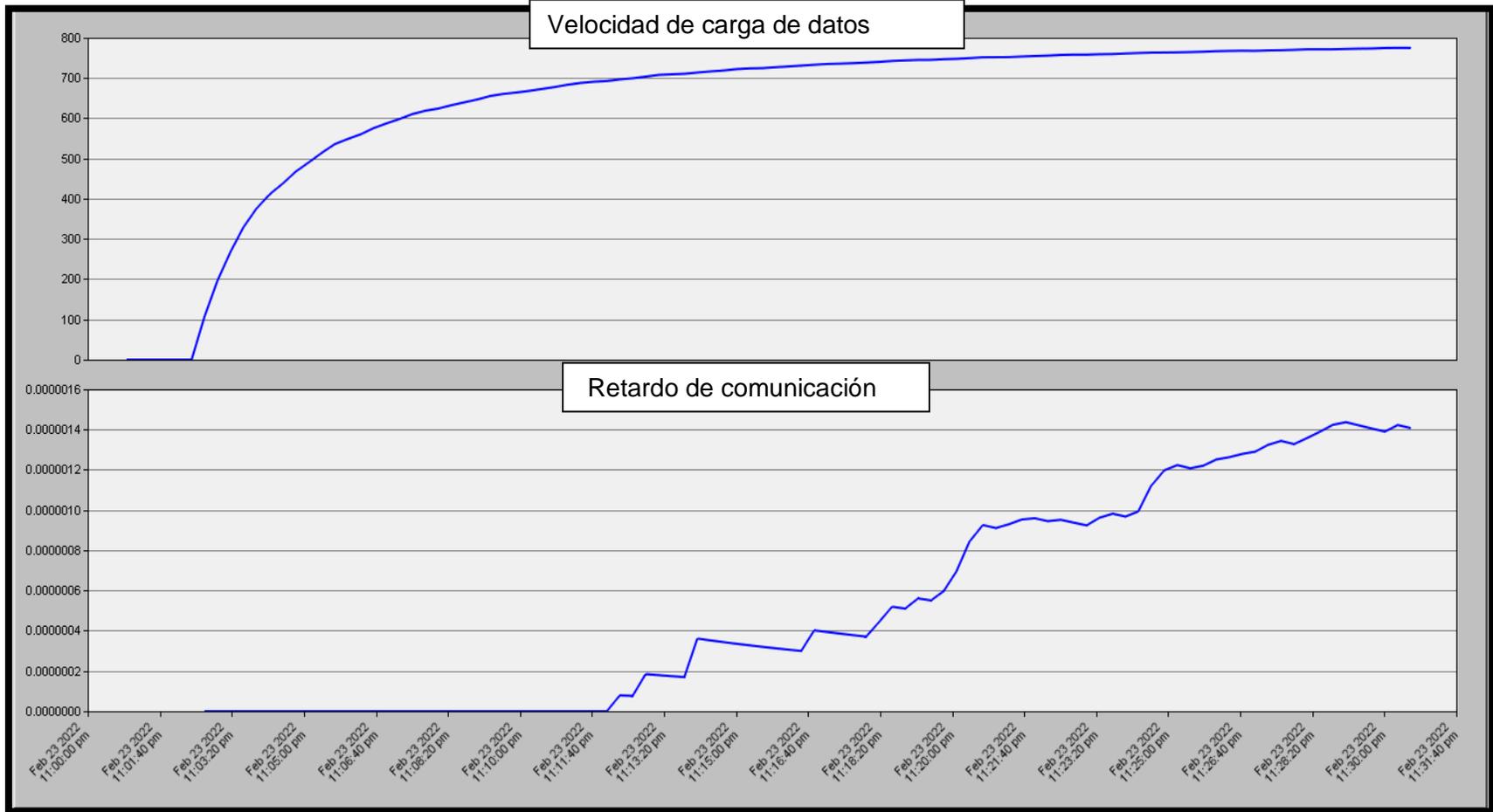
Protocolo DSR con el protocolo físico Infrared



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo DSR y protocolo físico Infrared.

Figura 39

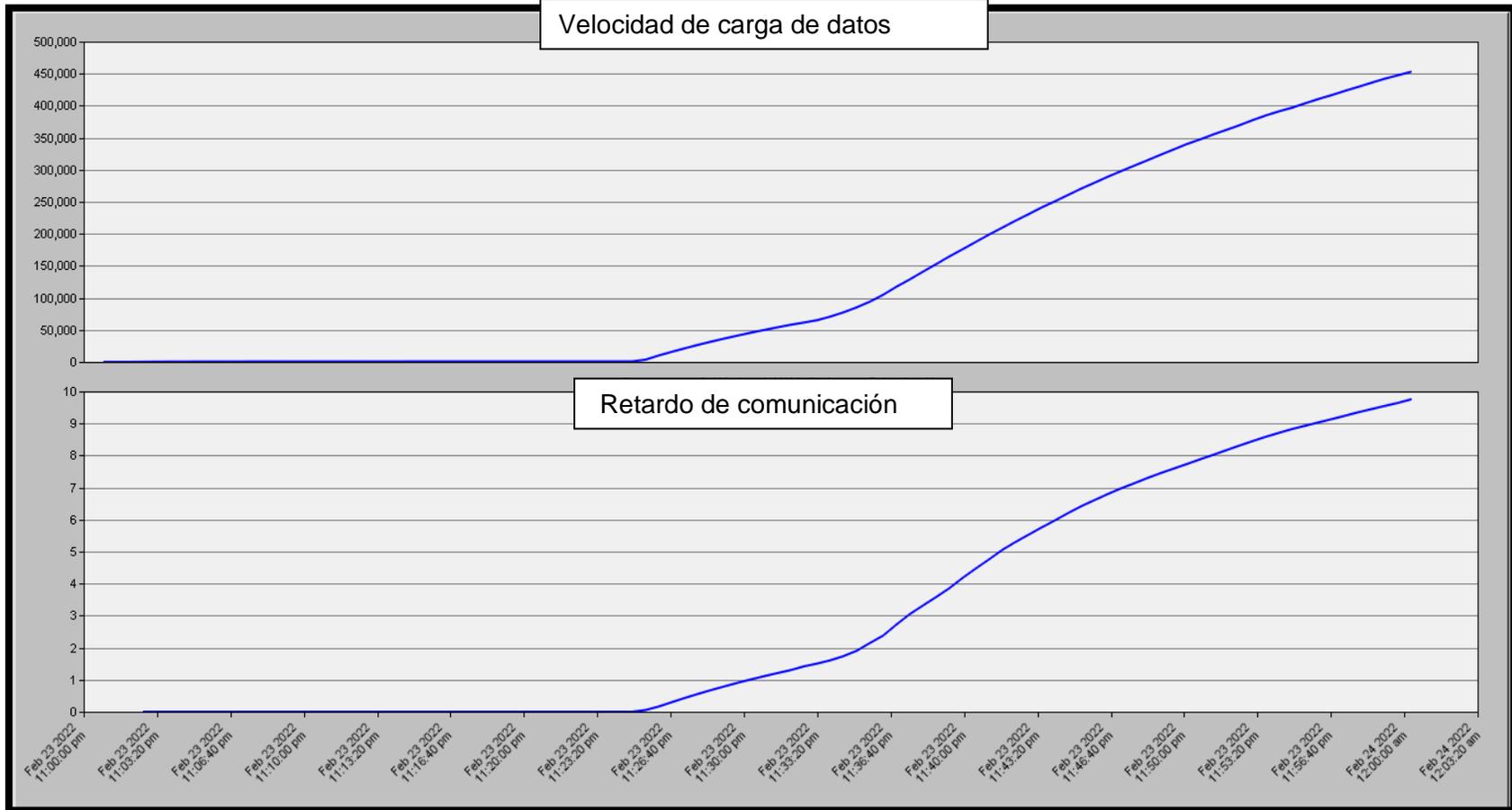
Protocolo DSR con el protocolo físico OFDM (802.11a)



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo DSR y protocolo físico OFDM (802.11a).

Figura 40

Protocolo DSR con el protocolo físico Tarifa extendida PHY (802.11g)



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo DSR y protocolo físico Tarifa extendida PHY (802.11g).

Interpretación:

En la figura 36 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango de funcionamiento de la red pero que presenta inestabilidad lo cual afecta a su normal funcionamiento además que el DELAY (Retraso) se encuentra fuera del rango necesario para que red funcione de manera óptima.

En la figura 37 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango de velocidad calculado pero que el DELAY (Retraso) se encuentra fuera del rango calculado lo que dificulta tener una red con una comunicación óptima.

En la figura 38 se observa que la velocidad de transmisión es inestable en el tiempo lo que dificulta el normal funcionamiento de la red a su vez también que el DELAY (Retraso) se presenta inestable en el tiempo y que se encuentra fuera del rango de normal funcionamiento de la red.

En la figura 39 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango de funcionamiento y es constante salvo que el DELAY (Retraso) es inestable lo cual dificulta que la comunicación de la red permanezca óptima.

En la figura 40 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango calculado para que red funcione de forma normal mientras que el DELAY (Retraso) se encuentra fuera del rango calculado además que va incrementando con el tiempo así dificultad tener una comunicación estable de la red.

Interpretación general para el protocolo DSR y los diferentes protocolos físicos:

Al usar el protocolo DSR se puede apreciar que la velocidad de transmisión de cada uno de los protocolos físicos usados es la adecuada para la comunicación de la red mientras que el DELAY (Retraso) en cualquiera de los protocolos físicos no brinda características para poder

ser usado puesto que presenta inestabilidad y no se encuentra dentro del rango calculado para tener una comunicación óptima de la red, por lo que el protocolo DSR no puede ser usado en el modelamiento de la red.

Protocolo OLSR

OLSR es un protocolo de enrutamiento proactivo, que hereda la estabilidad del algoritmo de estado de enlace. El protocolo reduce el tamaño de los paquetes de control, ya que, en lugar de declarar todos los enlaces de un nodo con sus nodos vecinos, declara solamente un conjunto de estos denominados Multipoint Relay Selectors. También utiliza únicamente nodos seleccionados (Multipoint Relays, MPRs) para difundir los paquetes en la red. Este conjunto de nodos MPR se selecciona de entre los vecinos de un salto con los cuales debe tener un enlace bidireccional, de manera que este cubra (en términos de alcance de radio) a todos los nodos que se encuentren a una distancia de dos saltos, además puede cambiar con el tiempo. Mientras más pequeño sea el conjunto de MPRs, más óptimo será el protocolo de enrutamiento. Solo los MPRs de un nodo retransmiten los mensajes de difusión que este envía, reduciéndose significativamente el número de retransmisiones en un proceso de flooding o broadcast. El protocolo OLSR calcula sus rutas a todos los destinos conocidos a través de estos nodos MPR. Al ser un protocolo proactivo OLSR mantiene las rutas para todos los destinos en la red, lo que constituye una ventaja ya que no existe el retardo asociado con la búsqueda de una nueva ruta, y está diseñado para trabajar de forma completamente distribuida, no requiere de confiabilidad para la transmisión de los mensajes de control, y tampoco requiere una entrega ordenada de sus mensajes. OLSR soporta una movilidad nodal que puede ser seguida a través de sus mensajes de control locales, y que depende de la frecuencia de envío de estos. (Rey et al., 2014)

Otra ventaja de OLSR es que las rutas de red y las rutas por defecto pueden agregarse

al sistema mediante los mensajes HNA (Host and Network Association), lo que posibilita la conexión a Internet o a otras redes. Entre las desventajas pudiera mencionarse que la definición original de OLSR simplemente asume que un enlace está activo si de este se ha recibido recientemente un determinado número de paquetes HELLO. Esto supone que los enlaces son bi-modales (funcionando o fallido), que no es necesariamente el caso en redes inalámbricas, donde los enlaces a menudo exhiben tasas intermedias de pérdida de paquetes. (Rey et al., 2014) Además, al ser un protocolo de estado de enlace, OLSR requiere una cantidad razonablemente grande de ancho de banda y potencia de CPU (Central Processing Unit) para calcular las rutas óptimas en la red, lo que pudiera constituir también una desventaja en redes de gran tamaño.

Figura 41

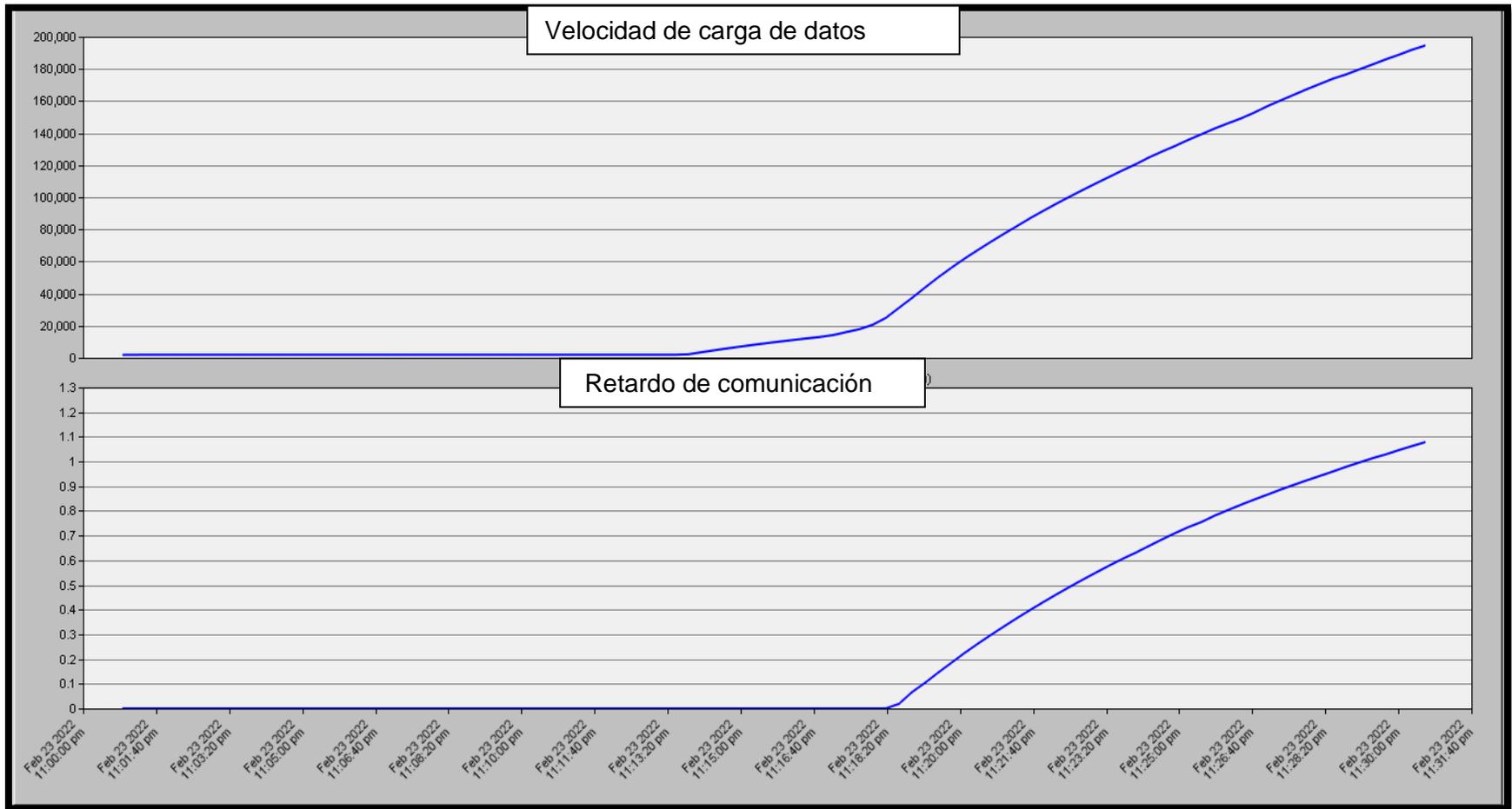
Protocolo OLSR con el protocolo físico Salto de frecuencia



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo OLSR y protocolo físico Salto de frecuencia.

Figura 42

Protocolo OLSR con el protocolo físico Secuencia directa



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo OLSR y protocolo físico Secuencia directa.

Figura 43

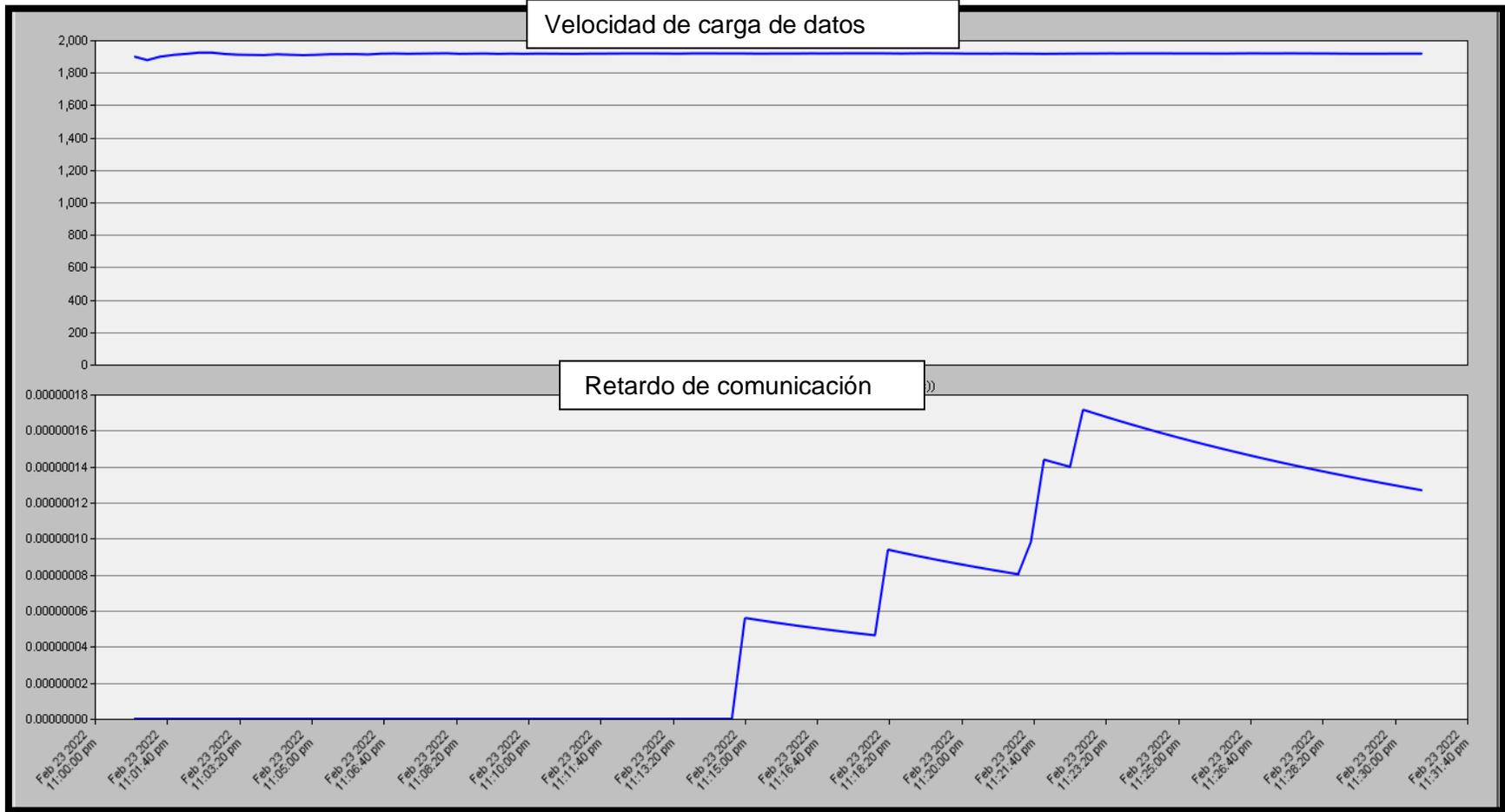
Protocolo OLSR con el protocolo físico Infrared



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo OLSR y protocolo físico Infrared.

Figura 44

Protocolo OLSR con el protocolo físico OFDM (802.11a)



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo OLSR y protocolo físico OFDM (802.11a).

Figura 45

Protocolo OLSR con el protocolo físico Tarifa extendida PHY (802.11g)



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo OLSR y protocolo físico Tarifa extendida PHY (802.11g).

Interpretación:

En la figura 41 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango calculado a su vez que el DELAY (Retraso) también se encuentra dentro del rango y con la característica que permanece constante en el tiempo permitiendo tener una comunicación estable en la red.

En la figura 42 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango calculado con la particularidad que el DELAY (Retraso) se encuentra fuera del rango lo que dificulta la comunicación de la red.

En la figura 43 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango calculado a su vez que el DELAY (Retraso) también se encuentra dentro del rango y con la característica que permanece constante en el tiempo permitiendo tener una comunicación estable en la red.

En la figura 44 se observa que la velocidad de transmisión es constante y permanece dentro del rango calculado además que el DELAY (Retraso) se encuentra dentro del rango calculado salvo que presenta inestabilidad en un rango de tiempo pero que no afectara en gran manera a la comunicación optima de la red.

En la figura 45 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango calculado a su vez que el DELAY (Retraso) también se encuentra dentro del rango y con la característica que permanece constante en el tiempo permitiendo tener una comunicación estable en la red.

Interpretación general del protocolo OLSR y los diferentes protocolos físicos:

Al usar el protocolo OLSR se puede observar que se puede usar cualquier protocolo físico para uso en la implementación de la red salvo que el protocolo físico DS no es indicado ser usado ya que al usarlo el DELAY (Retraso) se sale del rango calculado causando problemas en la comunicación de la red.

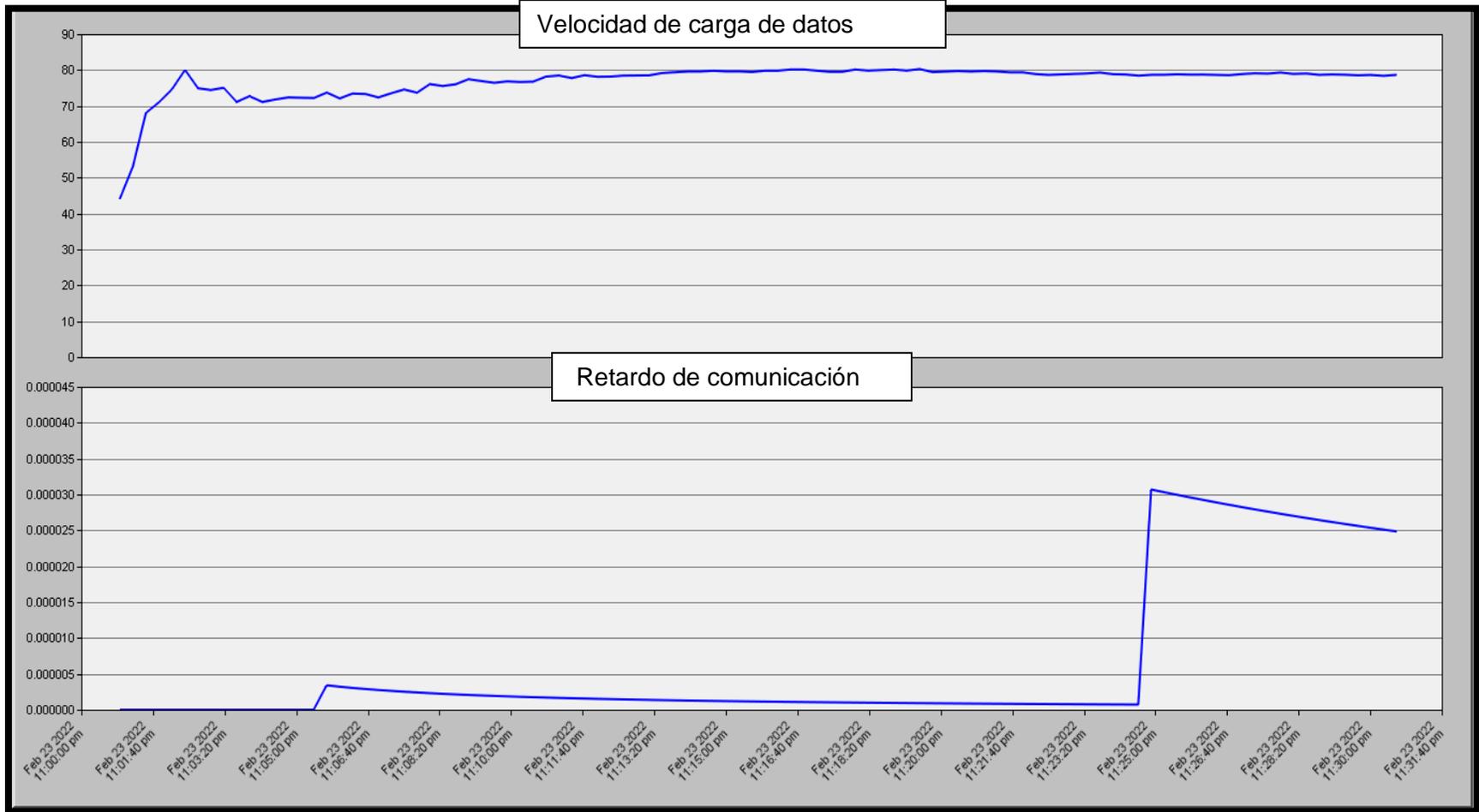
Protocolo TORA

El protocolo de enrutamiento de ordenamiento temporal, es un protocolo altamente adaptable que utiliza un algoritmo distribuido basado en el concepto de inversión de los enlaces para proporcionar rutas libres de bucles, este protocolo puede operar en un entorno inalámbrico de alta movilidad, es iniciado por el origen y brinda múltiples rutas para cualquier destino deseado. La clave del diseño del protocolo TORA está en el mantenimiento de los mensajes de control, en un conjunto muy pequeño de nodos cercanos en donde ocurre un cambio en la topología. Pero para lograr esto, los nodos necesitan mantener la información de enrutamiento acerca de nodos adyacentes.

Temporally Ordered Routing Algorithm es un protocolo de encaminamiento reactivo que se basa en ofrecer al nodo origen múltiples trayectos para alcanzar al destino. Este protocolo fue propuesto para redes muy dinámicas. Cuando se detecta un cambio en la topología se generan mensajes de control en un pequeño conjunto de nodos cercanos al cambio. Para utilizar estas funciones básicas define tres tipos de paquetes de control: QUERY (QRY), UPDATE (UPD), CLEAR (CLR). En las fases de creación y mantenimiento el paquete QRY se utiliza como petición y el paquete UPD se utiliza como respuesta. Cuando un nodo necesita descubrir una ruta hacia un destino se hace un envío broadcast de mensajes QRY. El destino o un nodo que posea una ruta válida hacia el destino le responde con un mensaje UPD. El paquete CLEAR se utiliza como broadcast para eliminar las rutas inválidas cuando un nodo es inaccesible. (Rodríguez et al., 2012)

Figura 46

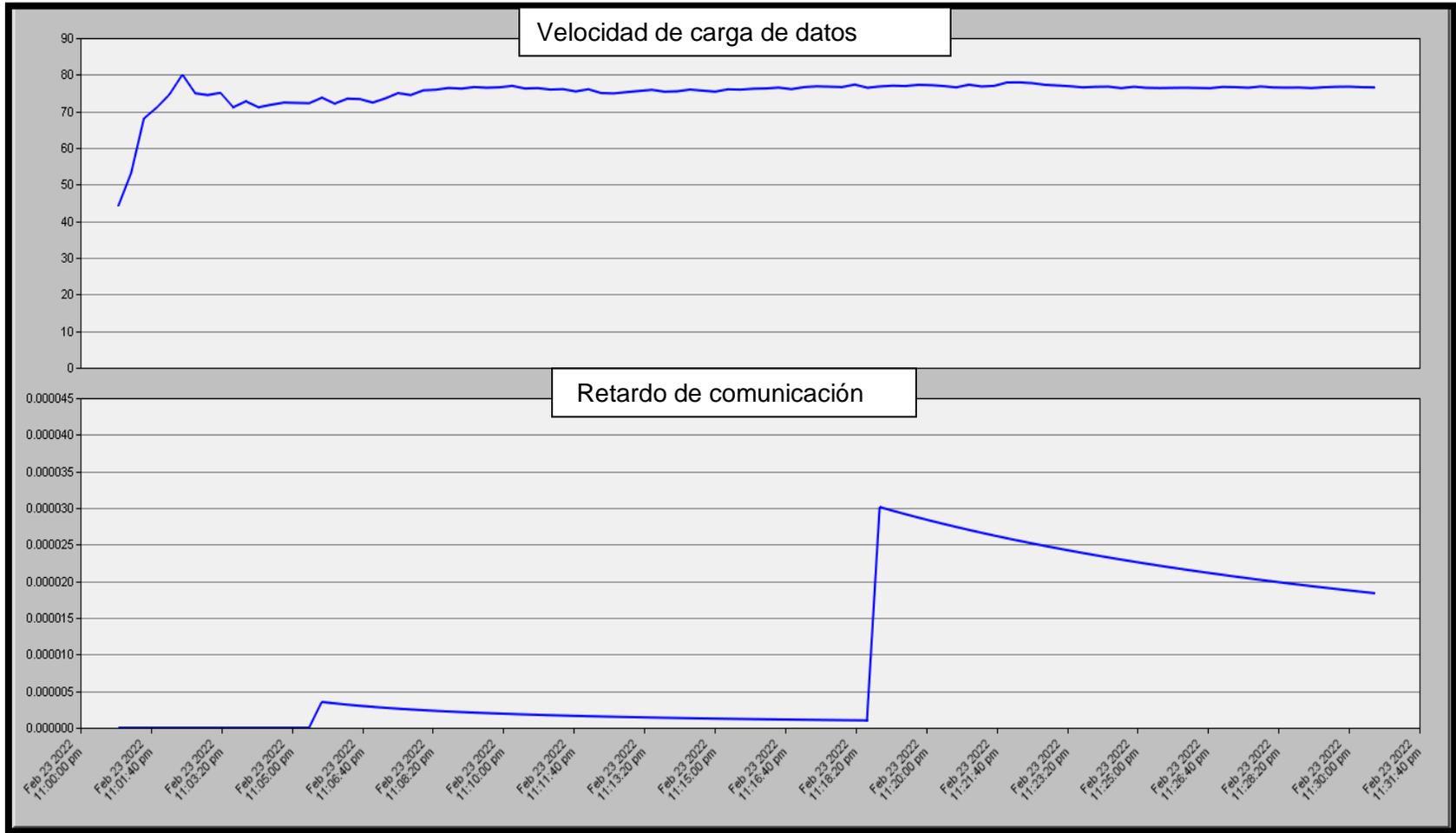
Protocolo TORA con el protocolo físico Salto de frecuencia



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo TORA y protocolo físico Salto de frecuencia.

Figura 47

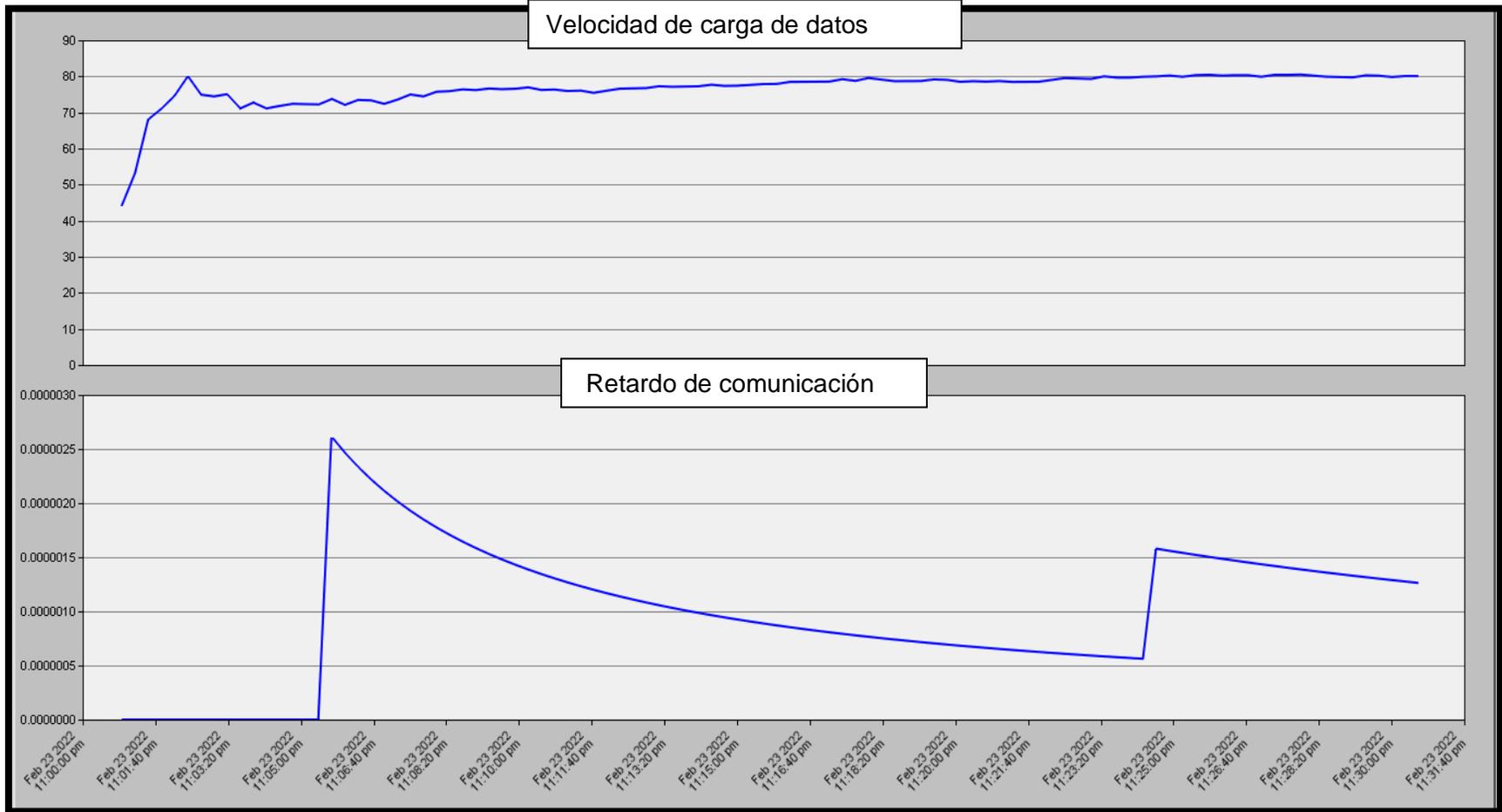
Protocolo TORA con el protocolo físico Secuencia directa



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo TORA y protocolo físico Secuencia directa.

Figura 48

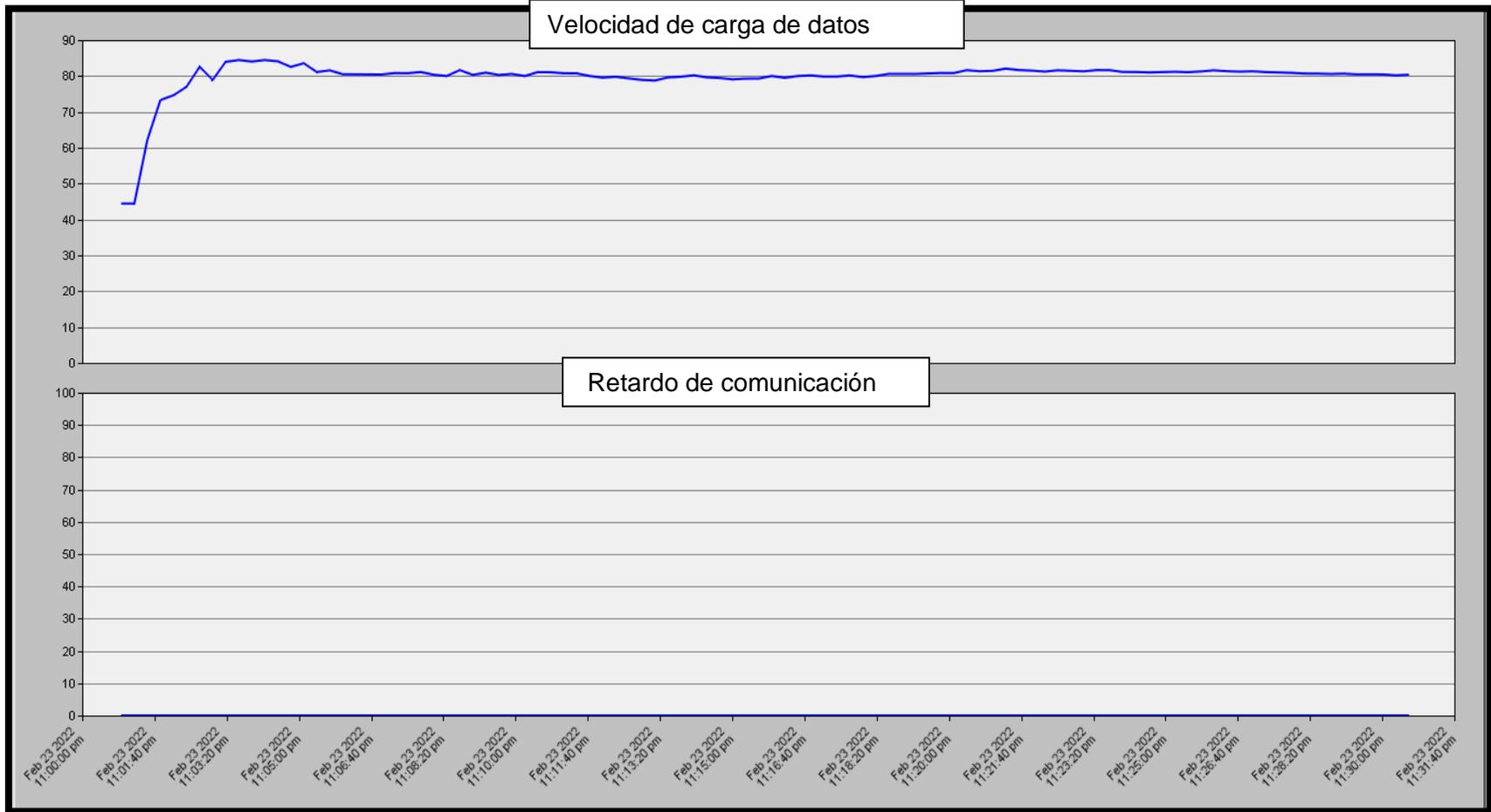
Protocolo TORA con el protocolo físico Infrared



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo TORA y protocolo físico Infrared.

Figura 49

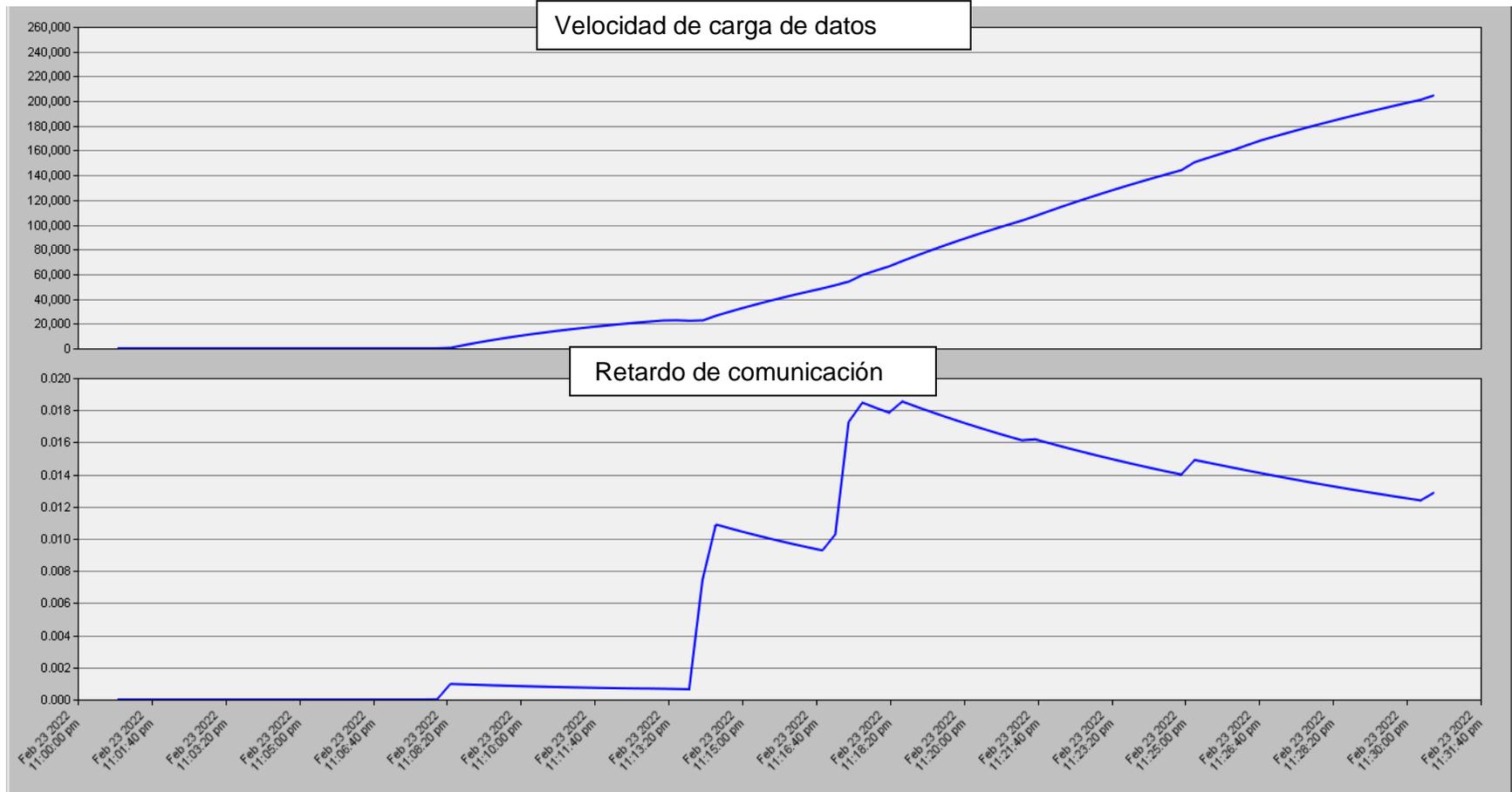
Protocolo TORA con el protocolo físico OFDM (802.11a)



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo TORA y protocolo físico OFDM (802.11a).

Figura 50

Protocolo TORA con el protocolo físico Tarifa extendida PHY (802.11g)



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo TORA y protocolo físico Tarifa extendida PHY (802.11g).

Interpretación:

En la figura 46 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango calculado además de presentar la característica de estabilidad y el DELAY (Retraso) se encuentra en el rango calculado y solo presentar unos pequeños cambios en el tiempo.

En la figura 47 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango calculado además de presentar la característica de estabilidad y el DELAY (Retraso) se encuentra en el rango calculado y solo presentar unos pequeños cambios en el tiempo.

En la figura 48 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango calculado además de presentar la característica de estabilidad y el DELAY (Retraso) se encuentra en el rango calculado y solo presentar unos pequeños cambios en el tiempo.

En la figura 49 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango de velocidad calculado a su vez que permanece constante en el tiempo y el DELAY (Retraso) es nulo así teniendo una comunicación óptima sin interrupciones que pongan en peligro la pérdida de datos en la red.

En la figura 50 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango calculado a su vez que el DELAY (Retraso) se encuentra dentro del rango calculado salvo que presenta fluctuaciones en el tiempo.

Interpretación general del protocolo TORA y los diferentes protocolos físicos:

Al usar el protocolo TORA tanto las respuestas de velocidad de transmisión como la de DELAY (Retraso) se encuentran dentro del rango calculado lo que permite que la comunicación de la red funcione de una manera óptima por lo que el protocolo físico a ser usado sería el

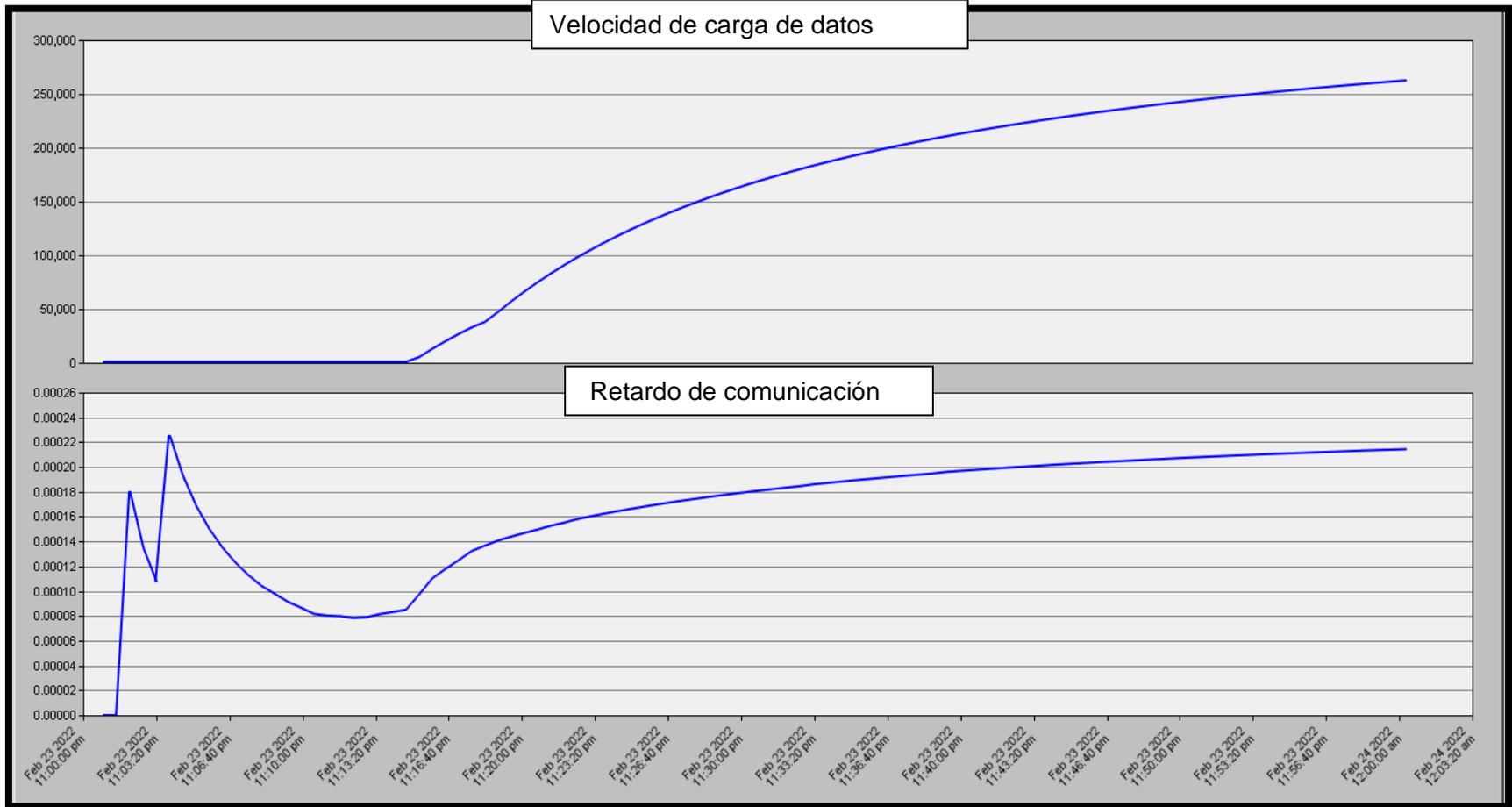
OFDM (802.11a) el cual nos brinda las mejores características de comunicación para el normal funcionamiento de la red.

Protocolo GRP

El objetivo que tiene es describir las principales funcionalidades de gestión de grupos en Internet, así como el formato de sus mensajes. Es usado principalmente para optimizar el rendimiento de la red y en los que sea necesaria las transmisiones de multidifusión en redes IPv4.

Figura 51

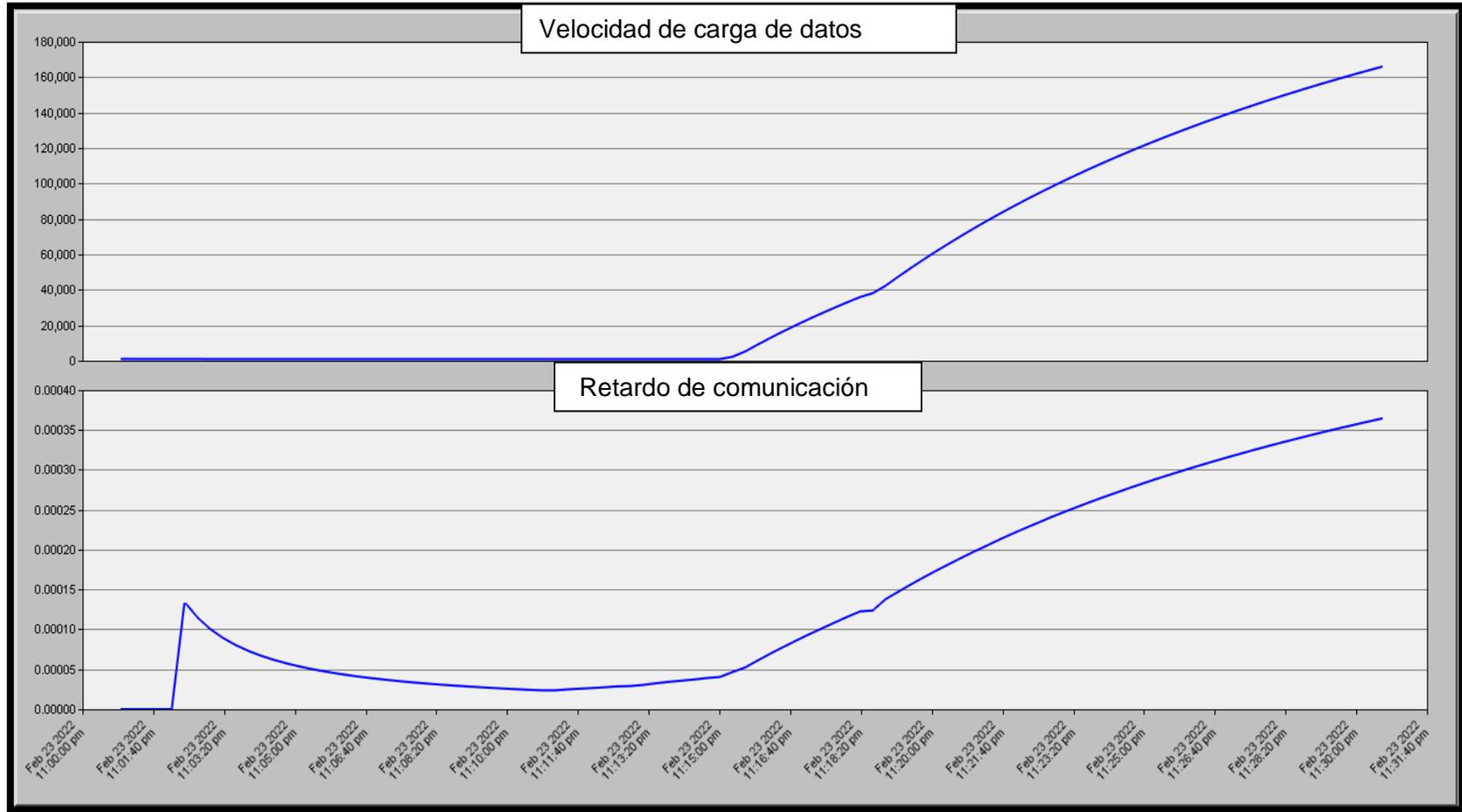
Protocolo GRP con el protocolo físico Salto de frecuencia



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo GRP y protocolo físico Salto de frecuencia.

Figura 52

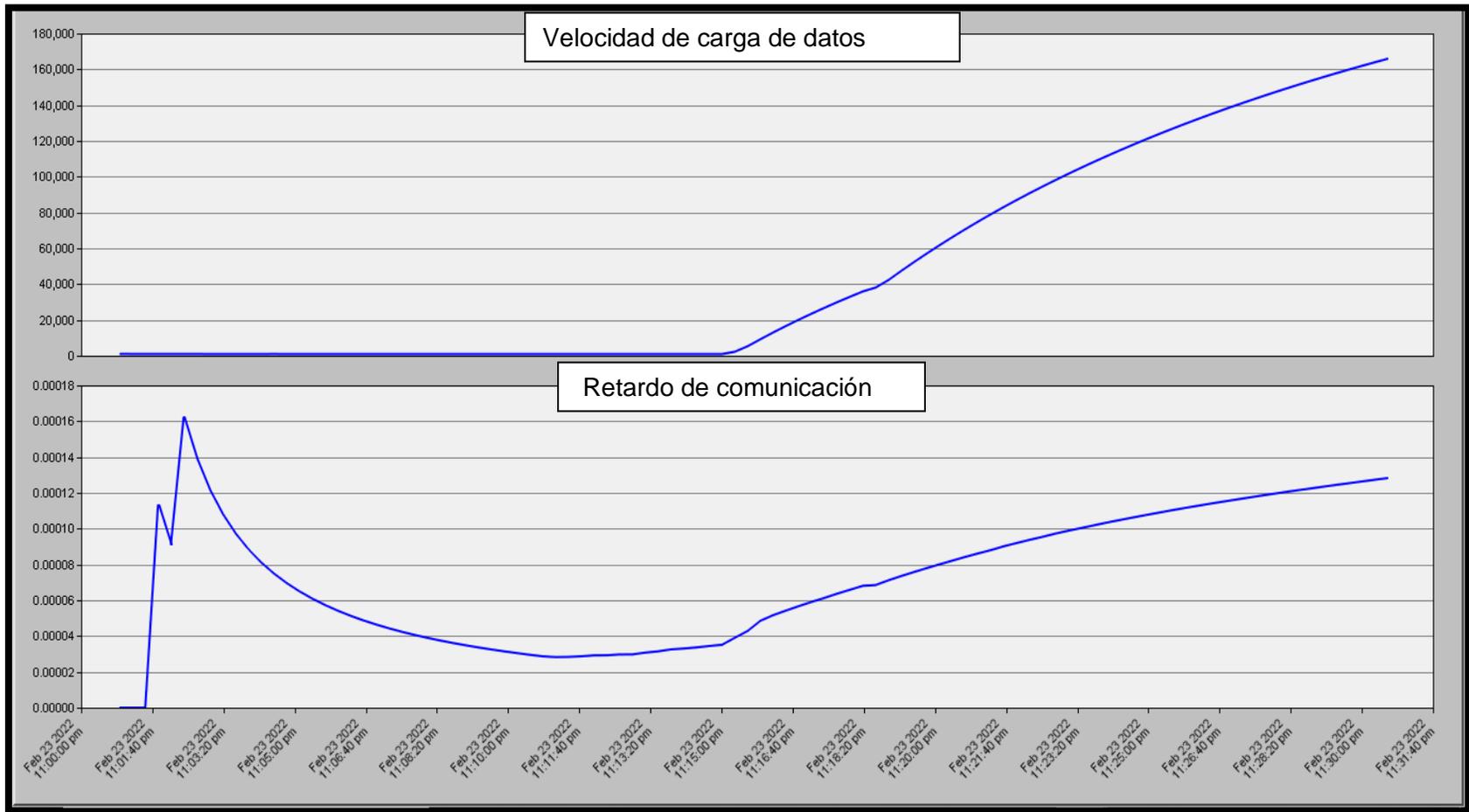
Protocolo GRP con el protocolo físico Secuencia directa



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo GRP y protocolo físico Secuencia directa.

Figura 53

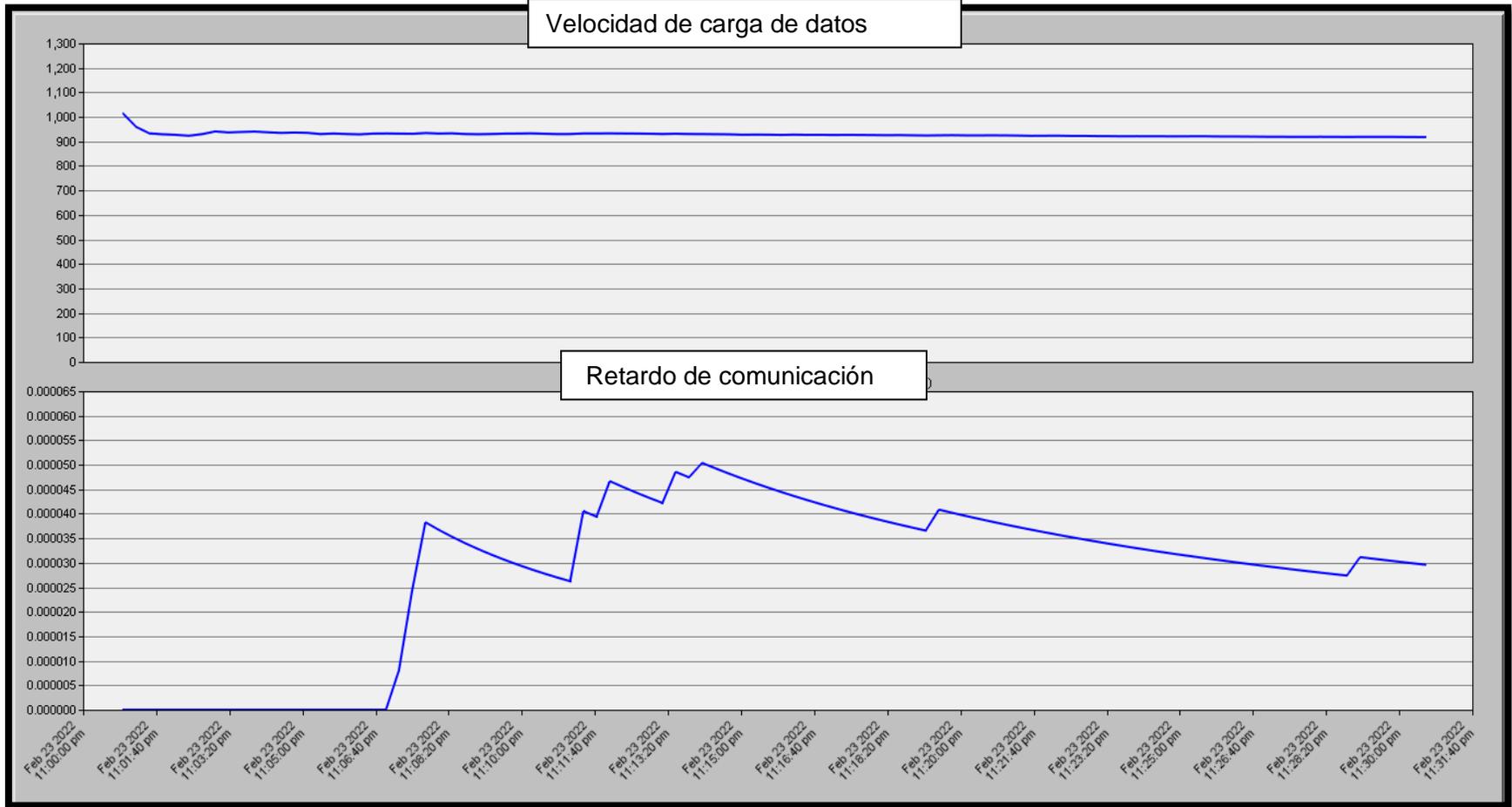
Protocolo GRP con el protocolo físico Infrared



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo GRP y protocolo físico Infrared.

Figura 54

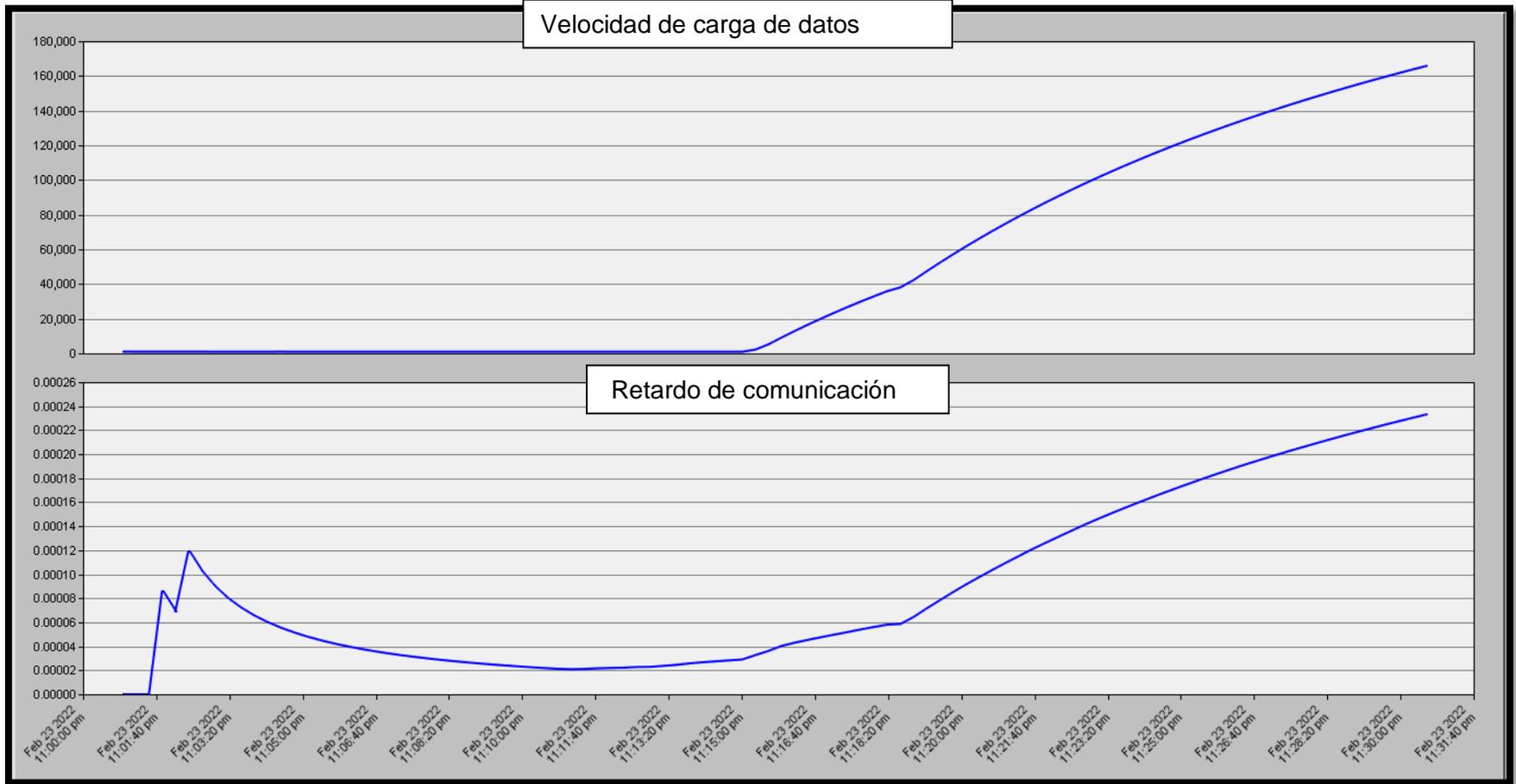
Protocolo GRP con el protocolo físico OFDM (802.11a)



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo GRP y protocolo físico OFDM (802.11a).

Figura 55

Protocolo GRP con el protocolo físico Tarifa extendida PHY (802.11g)



Nota. Velocidad de carga de datos y retardo de comunicación con el protocolo GRP y protocolo físico Tarifa extendida PHY (802.11g).

Interpretación:

En la figura 51 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango calculado además que el DELAY (Retraso) también se encuentra dentro del rango calculado salvo con unas pequeñas perturbaciones, lo que permite que la comunicación de la red sea optima.

En la figura 52 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango calculado además que el DELAY (Retraso) también se encuentra dentro del rango calculado salvo con unas pequeñas perturbaciones, lo que permite que la comunicación de la red sea optima.

En la figura 53 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango calculado además que el DELAY (Retraso) también se encuentra dentro del rango calculado salvo con unas pequeñas perturbaciones, lo que permite que la comunicación de la red sea optima.

En la figura 54 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango calculado además que el DELAY (Retraso) también se encuentra dentro del rango calculado salvo con unas pequeñas perturbaciones, lo que permite que la comunicación de la red sea optima.

En la figura 55 se observa que la velocidad de transmisión se encuentra dentro del rango calculado además que el DELAY (Retraso) también se encuentra dentro del rango calculado salvo con unas pequeñas perturbaciones, lo que permite que la comunicación de la red sea optima.

Interpretación general del protocolo GRP y los diferentes protocolos físicos:

Al usar el protocolo GRP tanto la velocidad de transmisión como el DELAY (Retraso) se encuentran dentro del rango calculado lo que permite que cualquiera de los protocolos físicos puede ser usado para tener una comunicación optima.

4.6. Selección del protocolo de comunicación

Para analizar los protocolos de redes aéreas Ad Hoc, las pruebas se realizaron en diferentes escenarios en relación con el número de nodos y el tamaño del área de simulación. En el interior cada uno de los escenarios se evalúa las medidas descritas a continuación, estos son de gran importancia para determinar que una red tiene un rendimiento efectivo y confiable. En las redes móviles ad hoc, debe establecer un modelo de movilidad para nosotros, en el trabajo realizado se ofrece diferentes modelos de movilidad que se analizaron previamente para desarrollarse este trabajo; en el siguiente tópico se explicara, la descripción de modelo de movilidad utilizado para la evaluación de la red ADHOC a ser establecida.

En la tabla 10 se puede observar las diferentes características de los distintos tipos de estándar 802.11 y el seleccionado para uso en esta red el 802.11p que nos brinda todas las características necesarias para tener una red con comunicación optima.

Tabla 10*Características de los distintos tipos de estándar 802.11*

ESTÁNDAR	DESCRIPCIÓN	BANDA DE OPERACIÓN	VMÁX	APLICADO A	RESTRICCIONES
802.11a	Utiliza el mismo juego de protocolos de base que el estándar	5 Ghz	54 Mbps	Redes inalámbricas con velocidades de 20 Mbit/s. teléfonos	No puede interoperar con equipos del estándar 802.11b,
802.11b	Utiliza el mismo método de acceso definido	2,4 MHz	11 Mbps	Protocolo de Control de	No puede interoperar con equipos del estándar 802.11a
802.11g	Es la evolución del estándar 802.11b. Es compatible con el estándar b y utiliza las mismas frecuencias	2,4 Ghz	54 Mbps	Operar con las Tecnologías RF DSSS y OFDM	En redes bajo el estándar g la presencia de nodos bajo el estándar b reduce significativamente la velocidad de transmisión
802.11d	Es un complemento del estándar	2,4 MHz	1 Mbps	Tecnología	Dificultades de interoperabilidad entre equipos de
802.11f	Es un protocolo de punto de	2,4 MHz	2 Mbps 54	CSMA/CA Punto de acceso interno (IAPP)	---
802.11h	Es una modificación sobre el estándar 802.11 para WLAN	5 GHz	54 Mbps	Utilizada generalmente por sistemas militares.	Todavía intenta resolver problemas derivados de la coexistencia de las redes satelitales y de radar

ESTÁNDAR	DESCRIPCIÓN	BANDA DE OPERACIÓN	VMAX	APLICADO A	RESTRICCIONES
802.11i	Está dirigido a batir la vulnerabilidad actual en la seguridad para protocolos de autenticación y de codificación	---	---	Se implementa	Posible vulnerabilidad de la seguridad
802.11j	Es equivalente al 802.11h, en la regulación			Utilizada generalmente por sistemas militares,	Intenta resolver problemas derivados de la coexistencia de
802.11e	Japonesa Primeros estándares inalámbricos que permite trabajar en entornos domésticos y empresariales	5 GHz	54 MBPS		Para aplicaciones en tiempo real
802.11k	Permite a los conmutadores y puntos de acceso inalámbricos calcular y valorar los recursos de radiofrecuencia de los clientes de una red WLAN	---	---	Conmutadores y puntos de acceso inalámbricos	
802.11r	Permitir a la red que establezca los protocolos de seguridad que identifican a un dispositivo en el nuevo punto de acceso antes de que abandone el actual y se pase a él	---	---	En un sistema de datos inalámbricos	

ESTÁNDAR	DESCRIPCIÓN	BANDA DE OPERACIÓN	VMÁX	APLICADO A	RESTRICCIÓNES
802.11m	Es una iniciativa para realizar el mantenimiento de redacción, correcciones, mejoras, aclaraciones e interpretaciones correspondientes a la documentación de la familia 802.11		---	Para redes inalámbricas de área local inalámbricas	
802.11n	A diferencia de las otras versiones de Wi-Fi, 802.11n puede trabajar en dos bandas de frecuencias	2,4 GHz 5 GHz		Con dispositivos basados en todas las ediciones anteriores de Wi-Fi	
802.11s	Se le llama la red WiFi definitiva		---	Redes inalámbricas de malladas	Hardware de alto costo y no es de software
802.11t	Estandarización de rendimiento (niveles de rendimiento)		---	Para proveedores de servicio WIFI	
802.11p	Será la base de las comunicaciones dedicadas de corto alcance	5,9 GHz 6,2 GHz	---	Automóviles	---
802.11u	Interoperabilidad con redes externas		---	Redes externas	---

ESTÁNDAR	DESCRIPCIÓN	BANDA DE OPERACIÓN	VIMAA	APLICADO A	RESTRICIONES
802.11v	Servirá para permitir la configuración remota de los dispositivos cliente	---	---	Dispositivos cliente	
802.11w	Para aumentar la seguridad de los protocolos de autenticación y codificación	---	---	Protocolos de codificación	
802.11y	Aplicación del estándar 802.11	3650 MHz 3700 MHz	---	---	---
802.11z	Permite el intercambio de tramas entre estaciones en una BSS	---	---	Extensiones a Direct Link Setup	
802.11aa	Transporte robusto de flujos de vídeo y voz	---	---	Video y voz (multimedia)	---

Nota. Descripción de los diferentes tipos de protocolo wifi. (s, 20189)

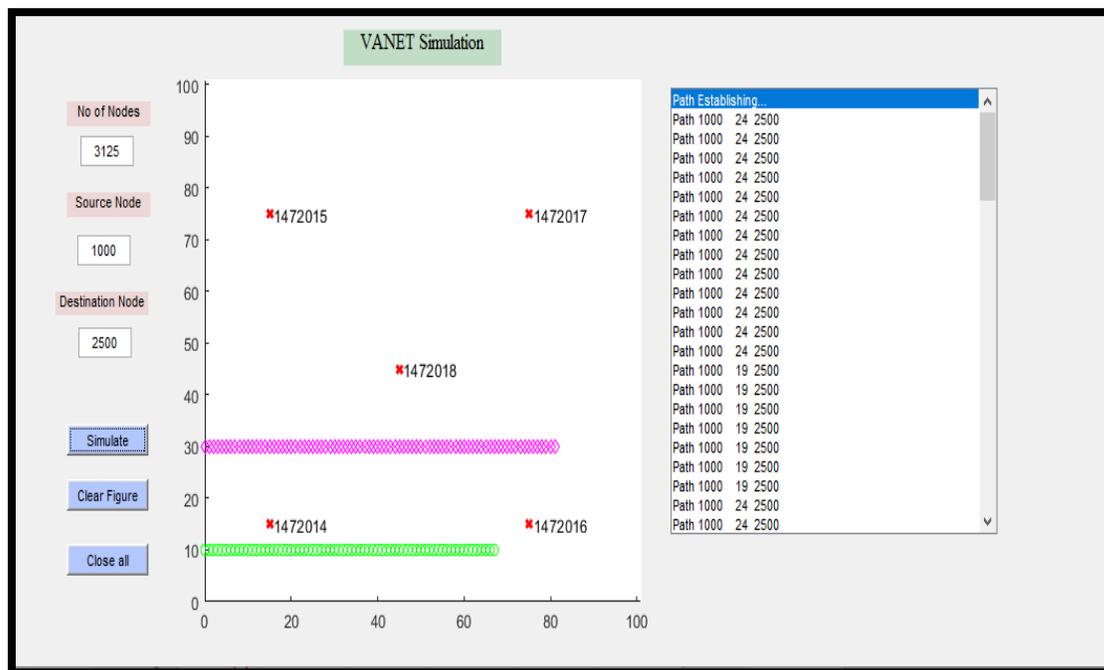
Modelo de Movilidad:

El modelo de movilidad seleccionado es el de Modelo de movilidad de Gauss-Markov porque tiene características realistas UAV, facilitando el desarrollo de este trabajo. Entre las principales características que encuentran la movilidad de tres dimensiones que es posible parecerse al movimiento de un UAV, otra característica importante que necesitamos enfatizar que es el cambio de movimiento que hace esto a través de la dirección y velocidad anteriores, moviendo los nodos en diferentes trayectorias. Al ser un modelo de tres dimensiones, es importante establecer la altura de la operación del UAV, que se determinó según la Regulación

de la Dirección General y Aviación Civil Real, que indica que la altura de funcionamiento máxima está a 122 metros sobre el suelo.

Figura 56

Implementación de la red AD HOC en el software matlab



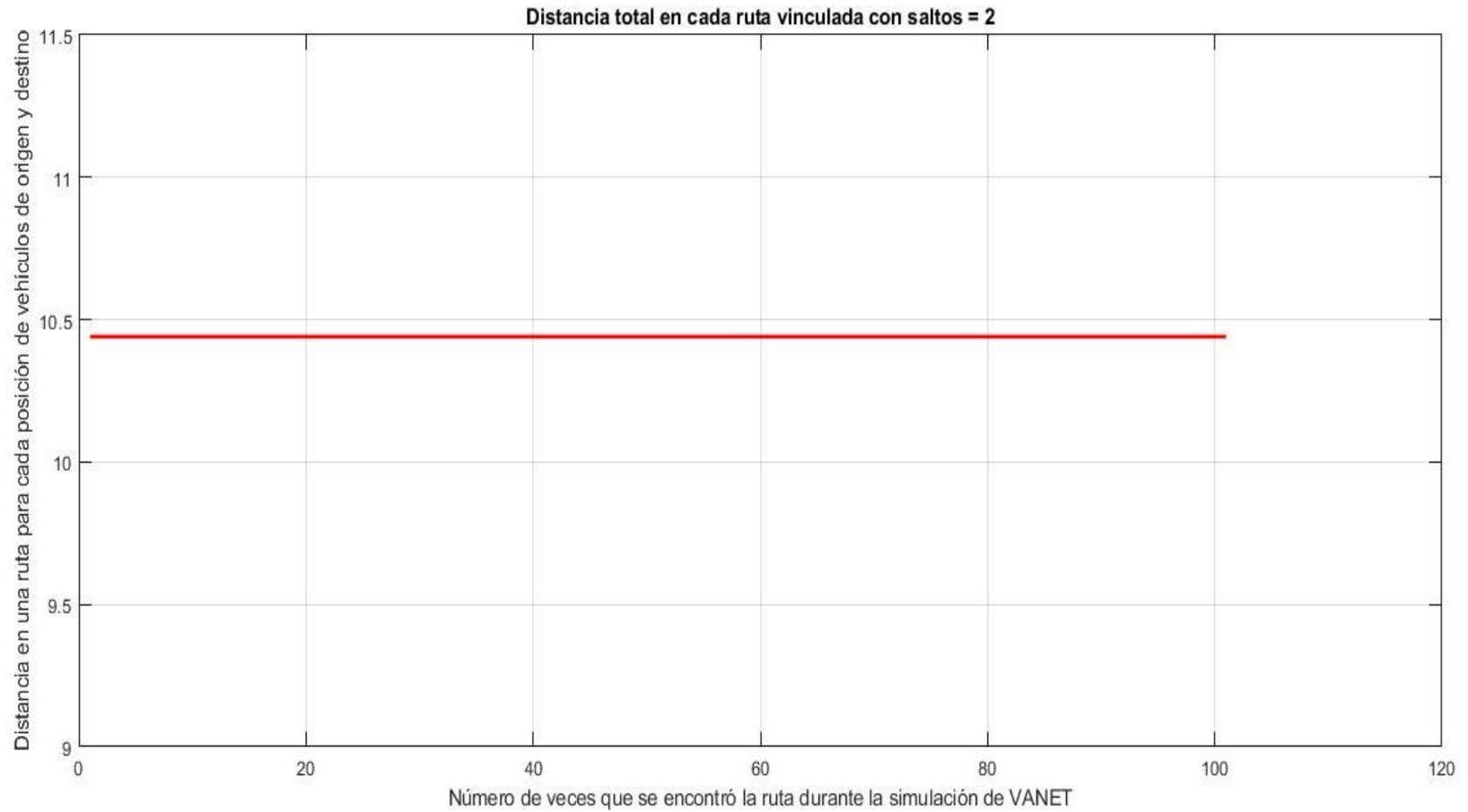
Nota. Vista de los parámetros de evaluación en software Matlab.

Interpretación:

En la gráfica 56 se observa una interfaz diseñada en el software Matlab el cual nos permite realizar la simulación de la red a ser estudiada pudiendo tomar datos los cuales nos brindaran una perspectiva más amplia del funcionamiento de la red y sus bondades que brindaran si esta red es implementada en un futuro.

Figura 57

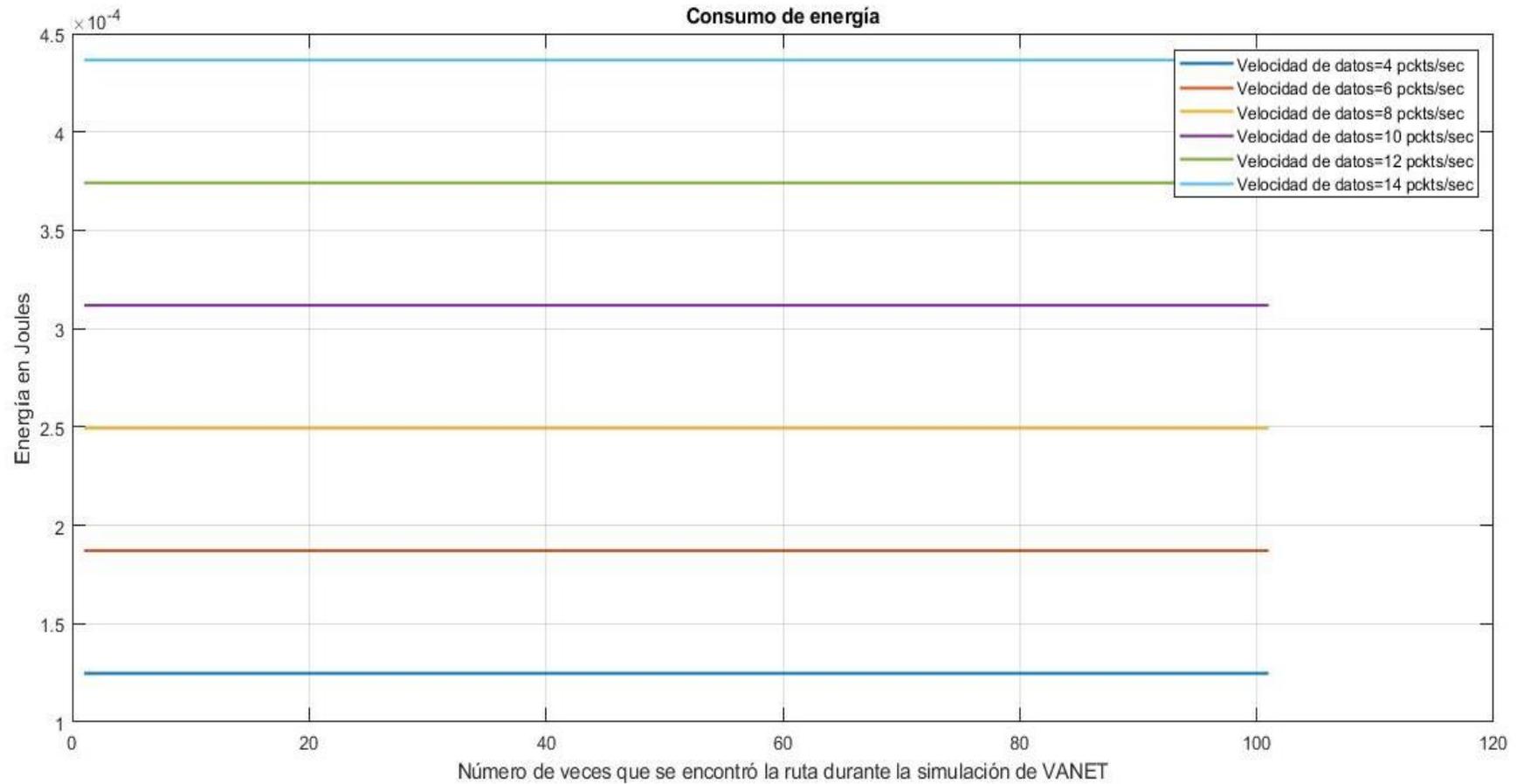
Distancia total en cada ruta vinculada con saltos = 2



Nota. Vista de la respuesta a la simulación con dos saltos

Figura 58

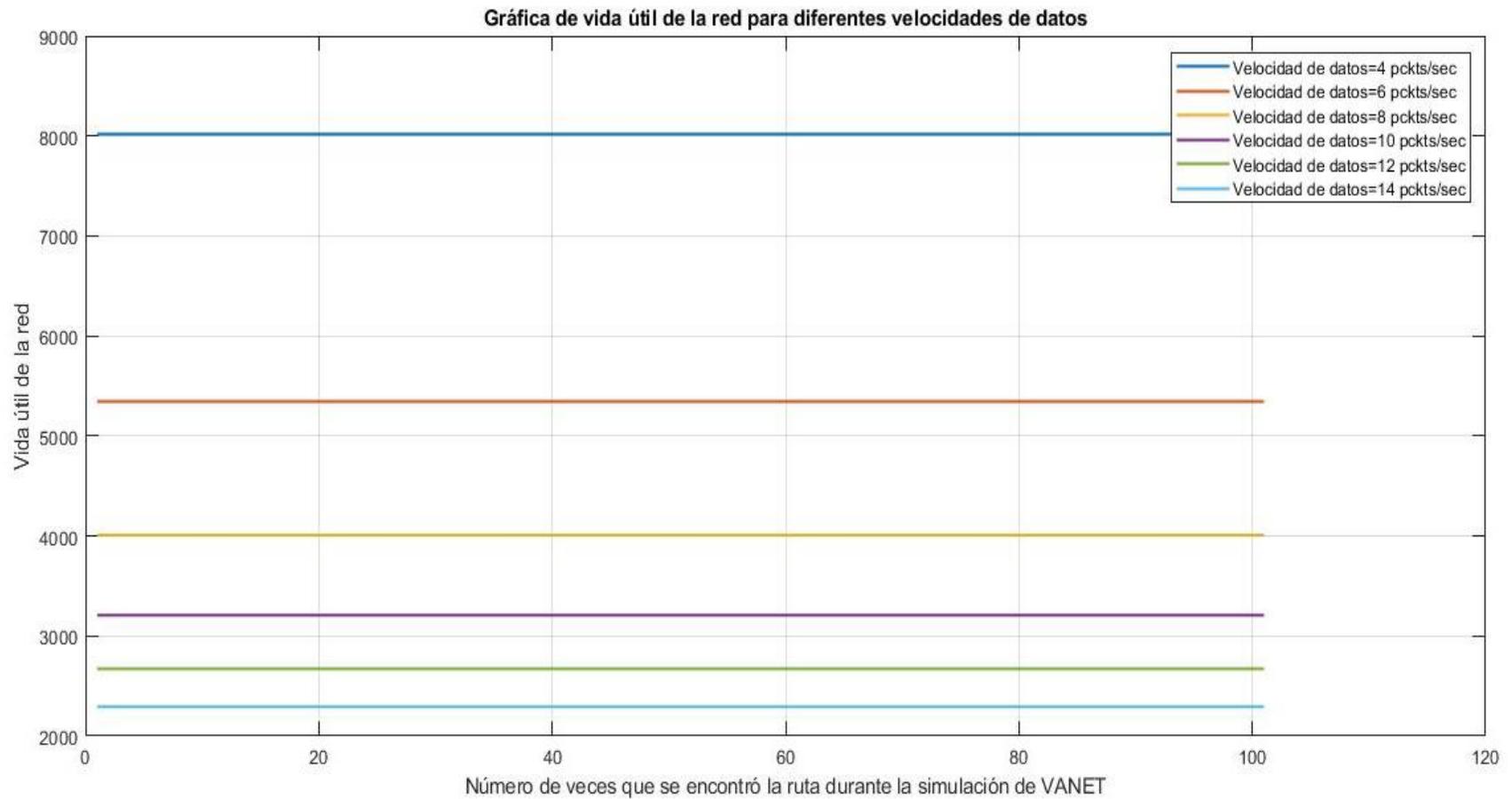
Consumo de energía para diferentes tasas de transferencia de datos



Nota. Vista de la respuesta del consumo de energía de la red.

Figura 59

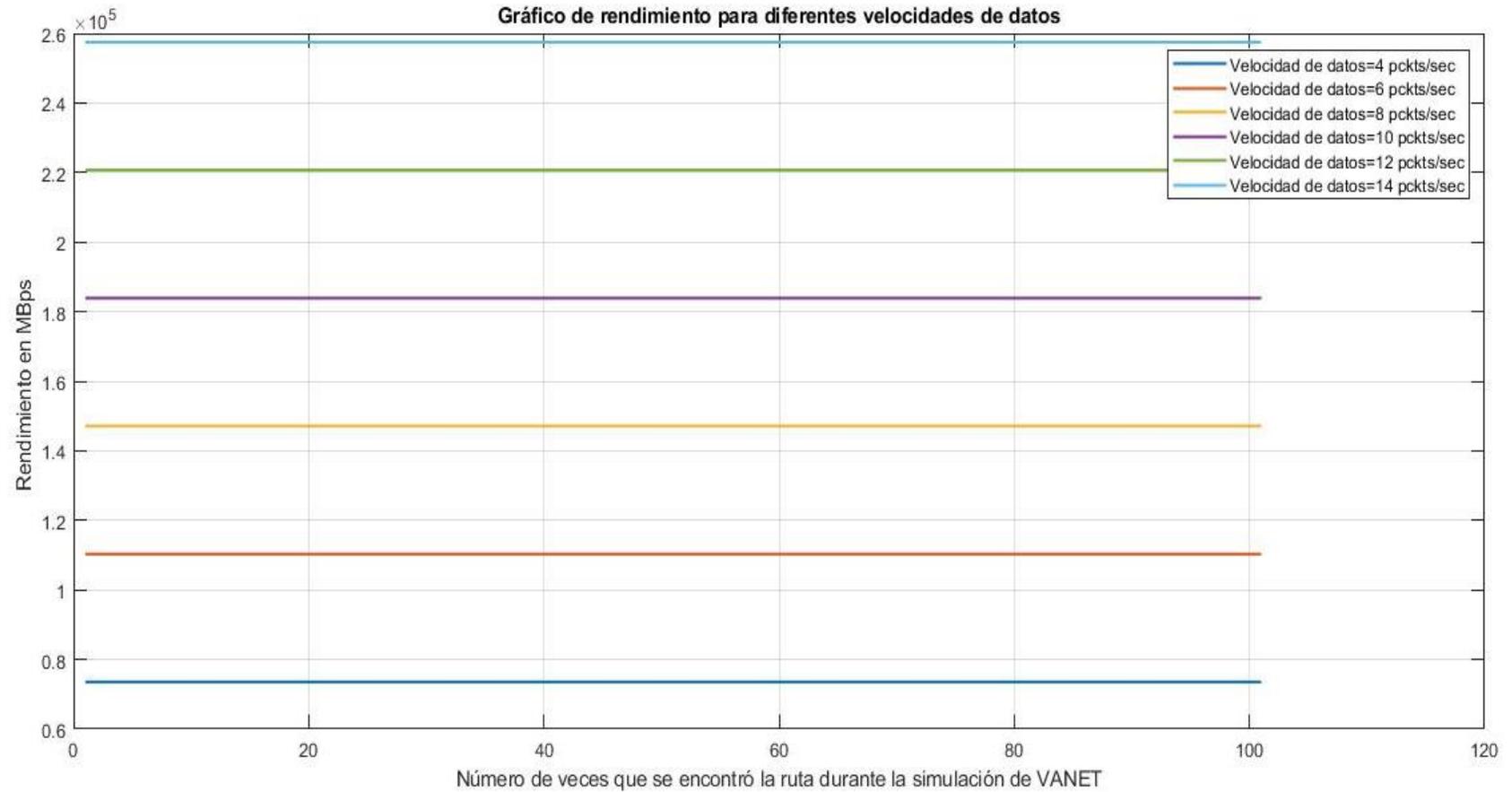
Gráfico de vida útil de la red para diferentes tasas de transferencia de datos



Nota. Vista de la respuesta de la vida útil de la red

Figura 60

Gráfico de rendimiento de la red para diferentes tasas de transferencia de datos



Nota. Vista de la respuesta del rendimiento de la red.

Interpretación:

En la figura 57 se puede observar como en la red establecida la distancia de comunicación es constante en los diferentes números de veces que se encuentren los vehículos de origen y destino de la comunicación así dando una idea más clara de que la red es de gran fiabilidad sin importar que los vehículos sean cambiados de origen de la señal o de destino, por lo que la comunicación es confiable durante la ejecución de las tareas previstas a ser ejecutadas.

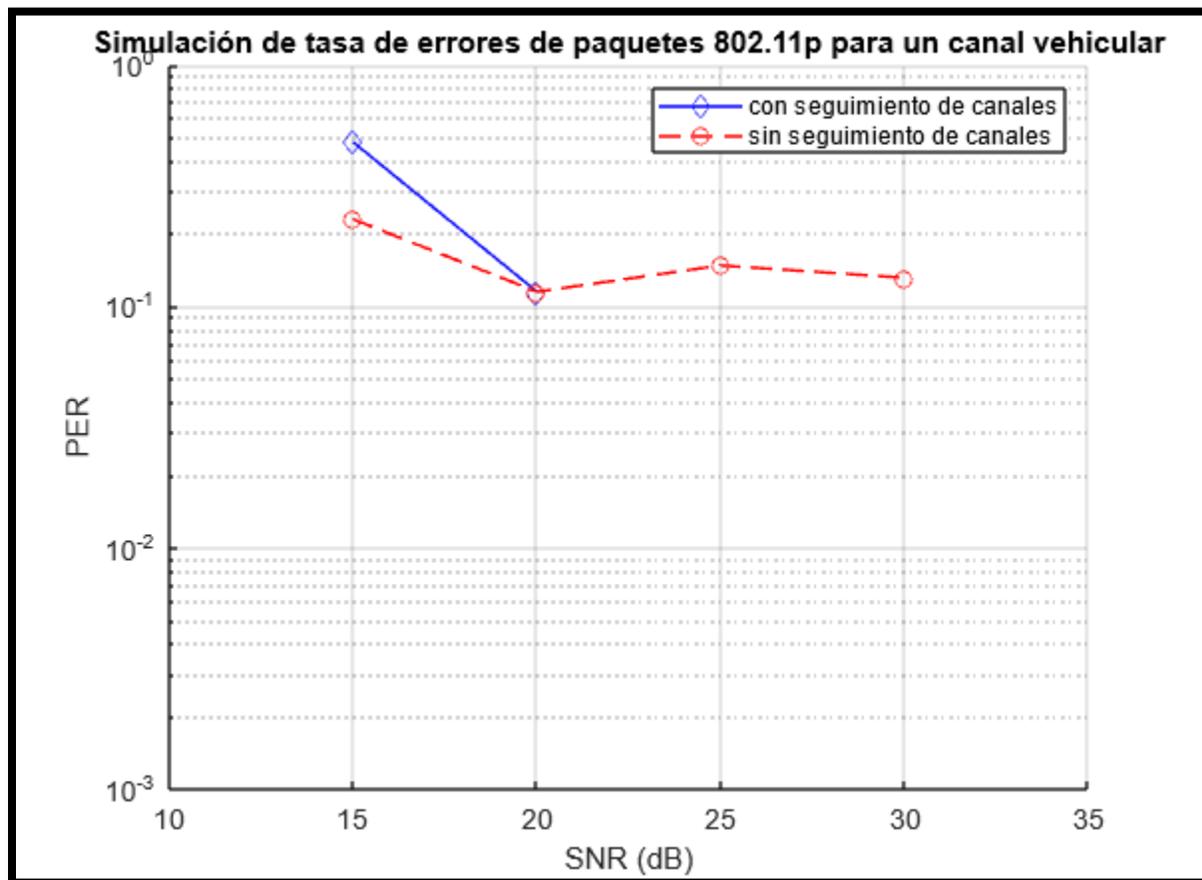
En la figura 58 se puede observar que durante la ejecución de las tareas inmersas en la red establecida los consumos de energía son mínimos lo cual nos ayuda que tengamos una autonomía de funcionamiento del enjambre en vuelo que esta entre el rango de 30 minutos establecido para realizar las tareas de vigilancia y reconocimiento de las áreas estratégicas del perímetro del aeropuerto del CIDFAE.

En la figura 59 podemos ver el tiempo de vida de la red a ser simulada de acuerdo con el número de paquetes de datos que se envíen en cada intervalo de tiempo por lo que se puede observar que el tiempo de vida que nos brinda es el adecuado ya que nos permite un envío de 14 paquetes/segundo que es suficiente para el cumplimiento de las tareas a ser encomendadas en la ejecución de la red.

En la figura 60 se puede observar el análisis de rendimiento de la red en Mbps lo cual nos indica que mientras enviemos una mayor cantidad de paquetes de datos en la red a ser comunicados con los diferentes dispositivos en la red el rendimiento aumenta esto a su vez ayudara que se agiliten la ejecución de cada una de las tareas encomendadas de una manera ágil y sin que la red puede ser afectada por el colapso de excesiva información en los diferentes canales de comunicación.

Figura 61

Gráfica de Tasa de Error de Paquetes para un canal vehicular con estándar 802.11p

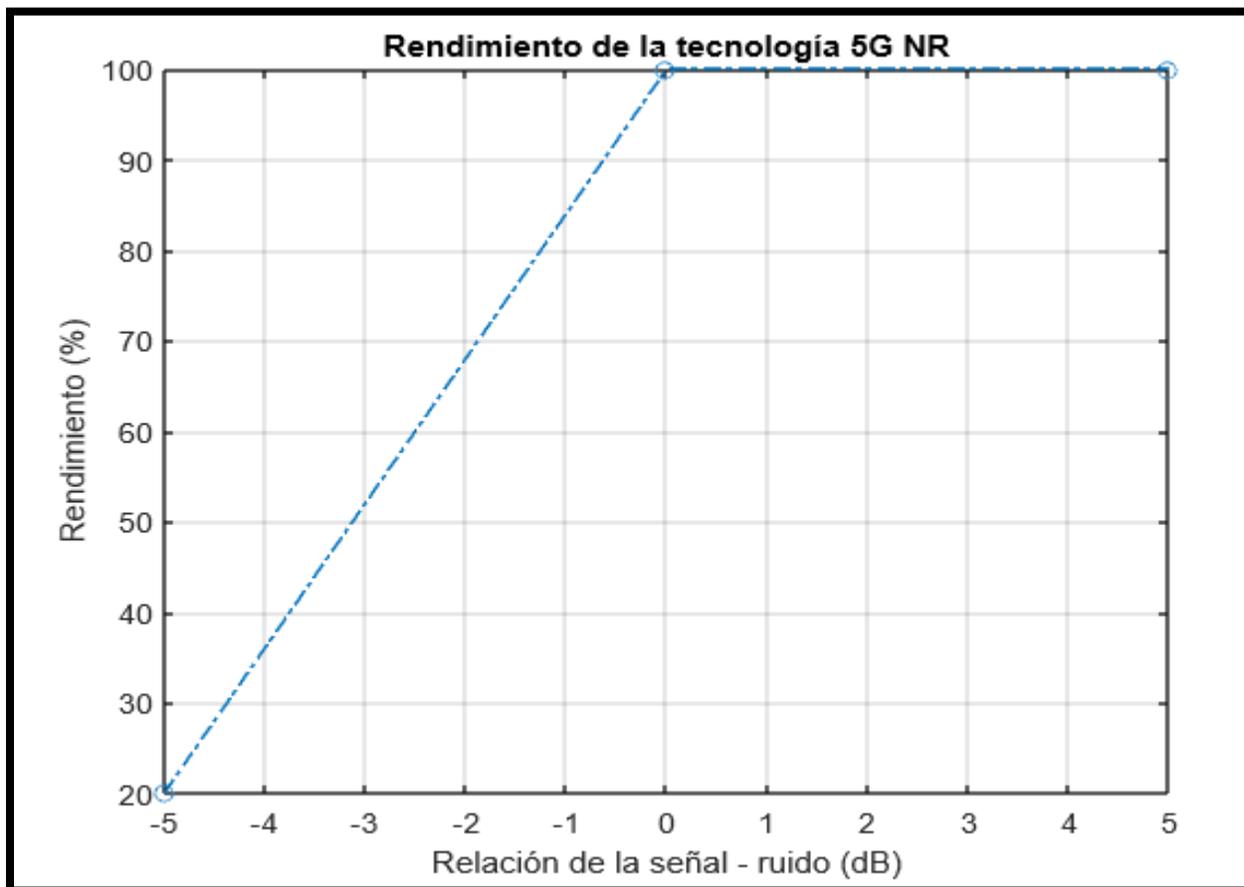


Nota. Vista de respuesta de la tasa de error de paquetes de datos de la red.

En la figura 61 se puede observar la repuesta de salida en un análisis de PER (Potencia equivalente radiada) y SNR (Relación de la señal – ruido) en donde se puede observar que la mejor repuesta se tiene cuando se realiza un seguimiento del canal de comunicación, que es una repuesta casi estable cuando se utiliza el estándar de comunicación 802.11p.

Figura 62

Gráfica de la relación rendimiento - SNR

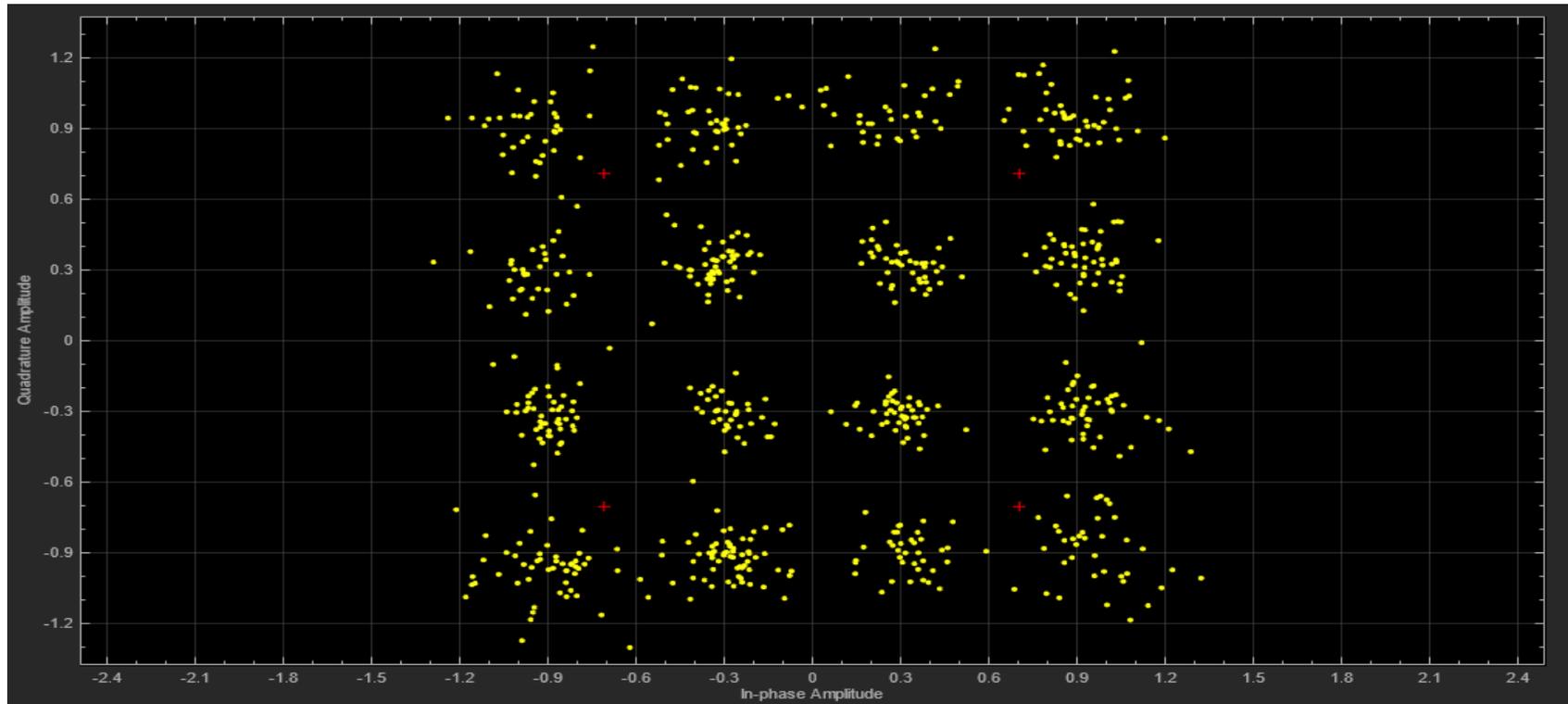


Nota. Vista de la respuesta de gráfica de la relación rendimiento - SNR

En la gráfica 62 se puede observar en la relación de rendimiento – SNR que cuando en la red no existe ruido es decir $SNR = 0$ tenemos un rendimiento de la red del 100 por ciento lo que sería ideal, además que la red podría no alterar su rendimiento hasta un nivel de ruido de 5 dB.

Figura 63

Diagrama de constelación

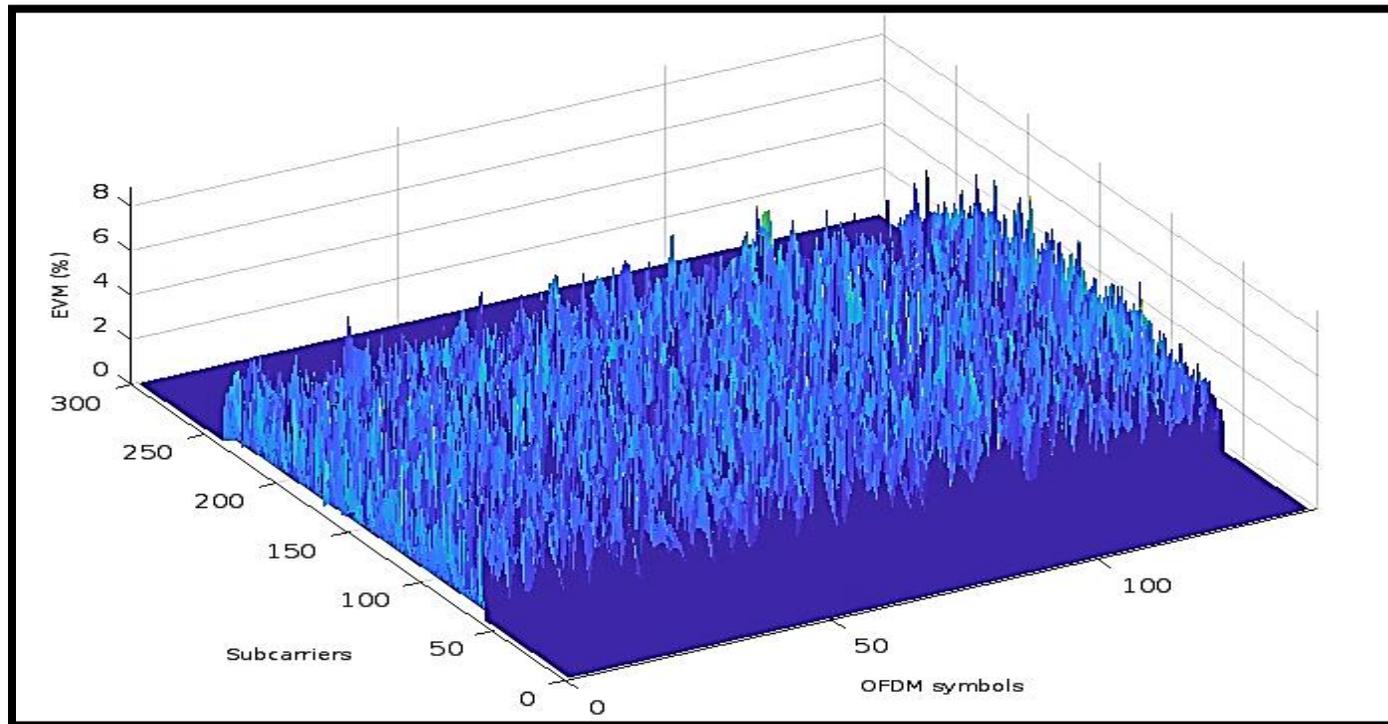


Nota. Constelación del comportamiento de la red en un periodo de tiempo determinado.

En la figura 63 se puede apreciar una constelación del comportamiento de la red un periodo de tiempo determinado en donde se puede observar que existe una comunicación estable en donde existen muchos puntos de comunicación para evitar que esta caiga en errores de comunicación o en pérdida de la red por completo.

Figura 64

Cuadro de recursos PUSCH EVM

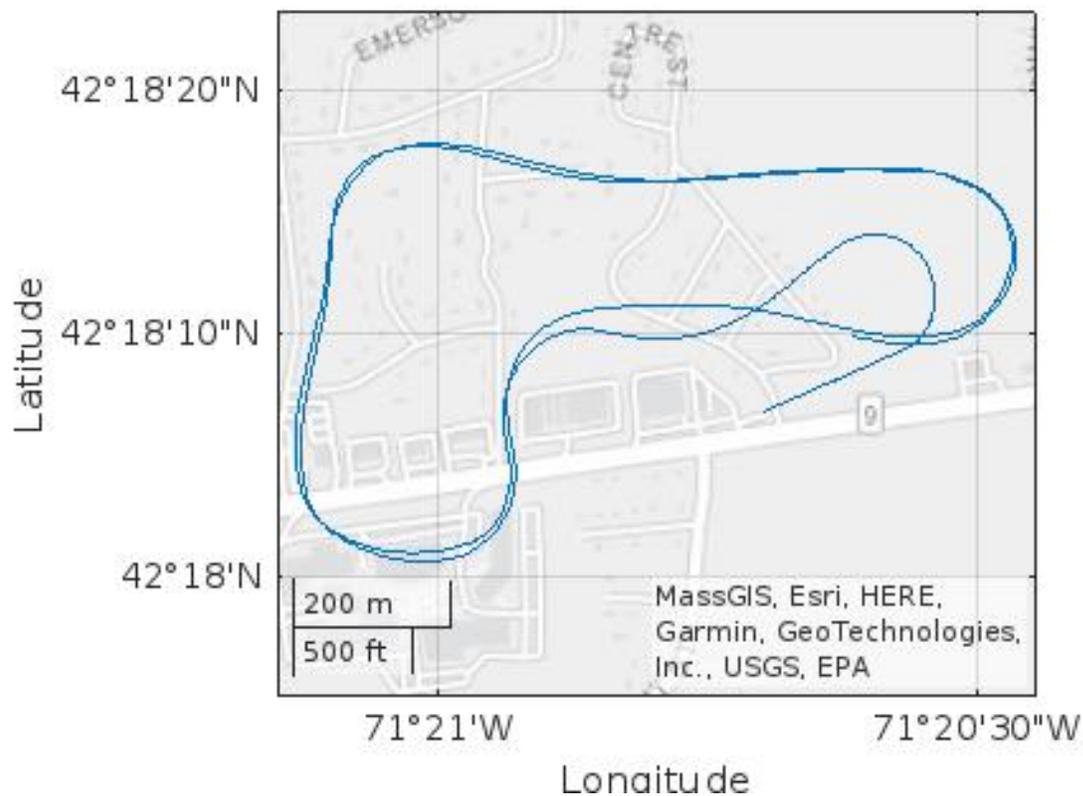


Nota. Vista de la potencia media de la red

En la figura 64 se puede observar una vista en tres dimensiones de la potencia media de la red lo que nos indica que está funcionando de optima manera al usar el estándar 802.11p que no existe en la gráfica espacios en blanco lo que nos indique que en esos puntos se pierde la comunicación, sino que en cambio la comunicación permanece constante y estable.

Figura 65

Gráfico de seguimiento de vuelo del enjambre de UAVs



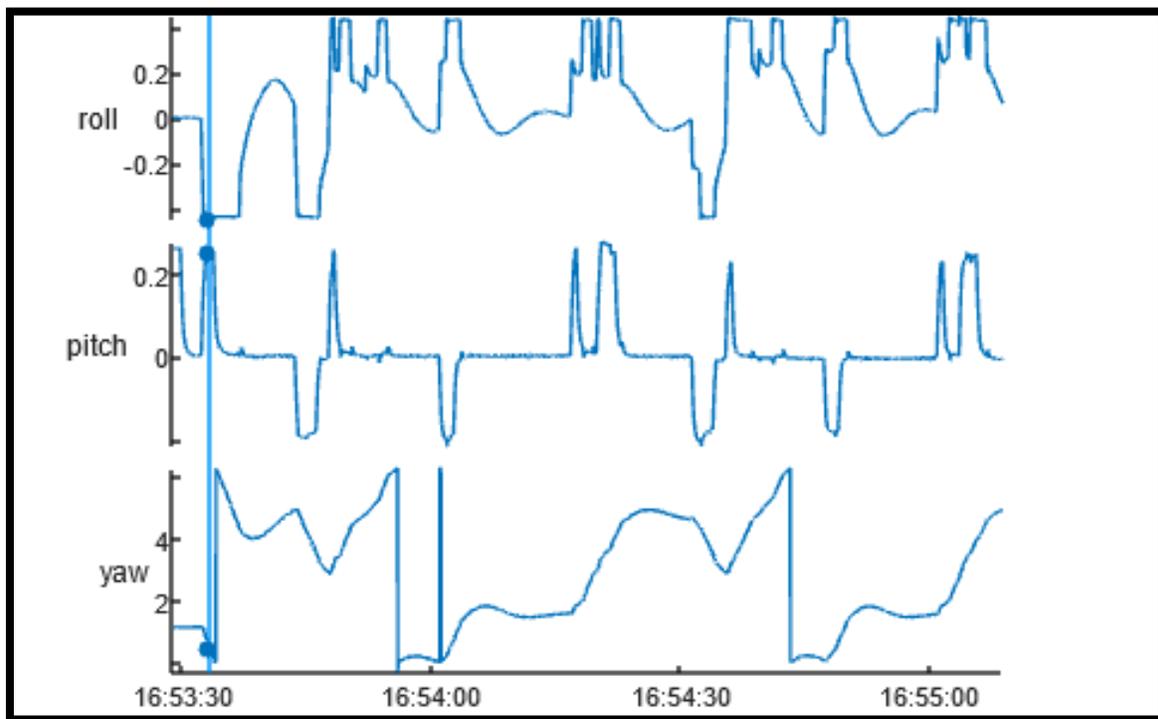
Nota. Vista del seguimiento de la ruta del enjambre de UAVs en un determinado tiempo.

Interpretación:

En la figura 65 se puede observar la trayectoria de cómo se comportan los UAVs cuando empiezan los ciclos de comunicación para de esta forma seguir trayectorias determinadas en la ejecución de las tareas en el área destinada.

Figura 66

Gráfico de datos de posicionamiento del enjambre de UAVs



Nota. Vista de los diferentes puntos en el plano 3D del posicionamiento del enjambre de UAVs.

En la figura 66 se observa el comportamiento del enjambre de UAVs con respecto al tiempo en lo concerniente a la rotación en un eje determinado, las vibraciones producidas en la ejecución del vuelo y el giro sobre el eje vertical para la determinación de comportamientos a ser usados en la red.

Capítulo V

Análisis y Resultados

Resultados

El desarrollo del análisis de los resultados de cada uno de los protocolos de enrutamiento para las redes de ADHOC dichas pruebas se basaron en diferentes escenarios en comparación con el número de nodos y el área de simulación. En cada escenario, se evalúan 3 parámetros: tasa de entrega paquetes, retraso y rendimiento, los mismos que fueron seleccionados basados en estudios previos de cada uno de los protocolos de enrutamiento, de gran importancia, para que se determine que una red es efectiva y confiable.

La configuración del parámetro de cada uno de los estudios realizados, puede ver en la Tabla 11, donde podemos ver que el análisis se realizó en relación con el número de nodos y el área de simulación.

Tabla 11

Parámetros de configuración para las simulaciones realizadas.

<i>Parámetros de Simulación</i>	<i>Escenario 1</i>	<i>Escenario 2</i>	<i>Escenario 3</i>	<i>Escenario 4</i>
Área de Simulación	100m x 100m Altura= 120m	250m x 250m Altura= 120m	300m x 300m Altura= 120m	400m x 400m Altura= 120m
Simulador	Ns-3	Ns-3	Ns-3	Ns-3
Tipo de Canal	<i>Inalámbrico</i>	<i>Inalámbrico</i>	<i>Inalámbrico</i>	<i>Inalámbrico</i>
Protocolo	AODV, DSDV, OLSR	AODV, DSDV, OLSR	AODV, DSDV, OLSR	AODV, DSDV, OLSR
Protocolo de capa MAC	802.11p	802.11p	802.11p	802.11p
Número de nodos	10, 20, 30, 40	10, 20, 30, 40	10, 20, 30, 40	10, 20, 30, 40
Velocidad de los nodos	10 m/sec	10 m/sec	10 m/sec	10 m/sec
Modelo de movilidad	<i>Gauss-Markov</i>	<i>Gauss-Markov</i>	<i>Gauss-Markov</i>	<i>Gauss-Markov</i>

Nota. Delimitación de los parámetros de simulación a ser usados en el modelo óptimo de la red.

Análisis de los resultados de simulación.

En esta sección, se encuentran los estudios hechos de protocolos de enrutamiento establecidos anteriormente para diferentes cantidades de puntos de conexión (nodos). En

conjunto en todos los escenarios, se analizaron cuatro escenarios que estarán compuestos por diferentes áreas de simulación.

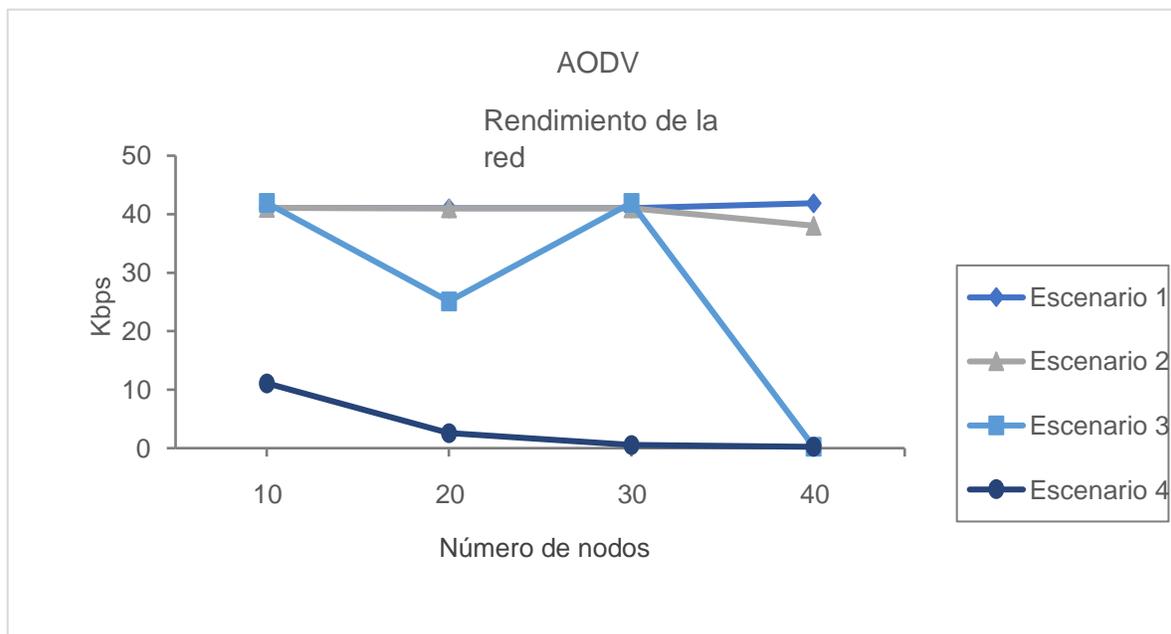
La idea por la cual estas simulaciones se hacen es que se trata de evaluar la eficiencia presentada por los protocolos de enrutamiento seleccionados en una red aérea AD HOC. Esto nos ayuda a desarrollar la comparación de eficacia presentada por los protocolos analizados, las referencias que se obtienen nos dan el resultado de cada una de las simulaciones realizadas con la variación de parámetros mencionados anteriormente.

5.3. Análisis de rendimiento de la red

La Figura 67 correspondiente al protocolo AODV, se observa que, en áreas de menos de 300 metros cuadrados, el rendimiento de la red presenta los resultados más altos y similares también son apreciados por cada uno de las cantidades de nodos; esto se demuestra aumentando el área de simulación donde puede ver una caída en el rendimiento de la red. Incluso si el rendimiento de la red es bajo al aumentar la cantidad de los nodos y el área simulación, en un área pequeña se mantiene un mayor valor de rendimiento en comparación con el obtenido al aumentar la cantidad de los nodos en un área que tenga dimensiones mayores a la que se está simulando.

Figura 67

Evaluación del Rendimiento de la red con el Protocolo de enrutamiento AODV

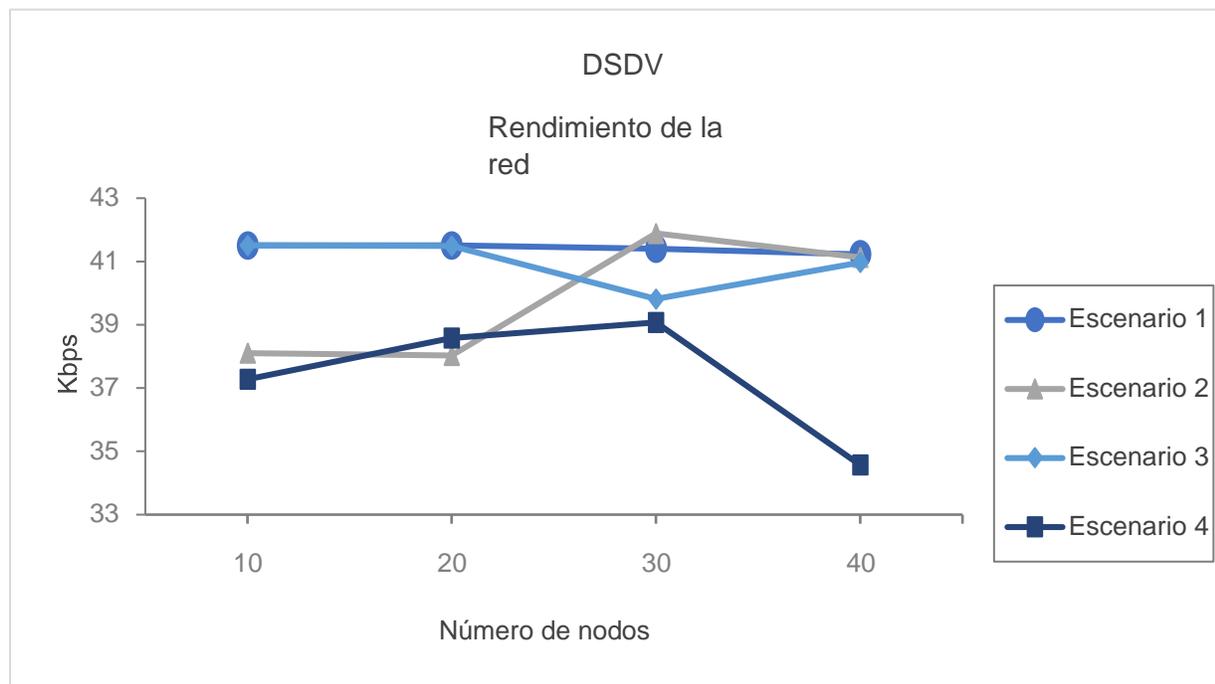


Nota. Vista de la respuesta del rendimiento de la red del protocolo de enrutamiento AODV.

Al gráfico de los resultados obtenidos para el Protocolo de enrutamiento DSDV ilustrado en la Figura 68 se puede determinar algunas similitudes con el protocolo analizado previamente. El rendimiento se mantiene a un alto valor en una superficie de 100 metros cuadrados. Sin embargo, en el caso de las áreas de mayor tamaño, la variación del rendimiento se observa una disminución en su valor lo que muestra un resultado que en comparación al protocolo AODV tiene características similares.

Figura 68

Evaluación del Rendimiento de la red con el Protocolo de enrutamiento DSDV

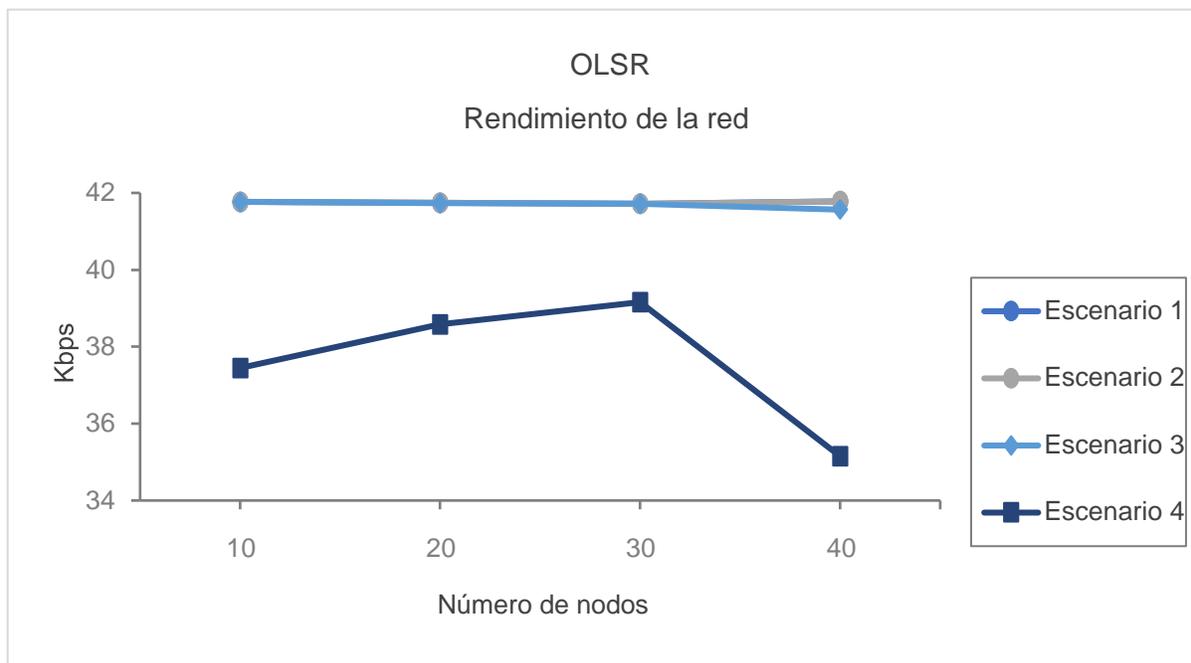


Nota. Vista de la respuesta del rendimiento de la red del protocolo de enrutamiento DSDV.

En el caso de la Figura 69 se puede ver mejores resultados en los mismos escenarios de evaluación. En el interior de este caso se puede demostrar que el protocolo de enrutamiento OLSR mantiene el valor de rendimiento, siendo poco afectado por las diferentes cantidades de nodos y el tamaño del área de prueba. Generalmente el protocolo de enrutamiento OLSR tiene un mejor comportamiento frente a aumentar número de nodos y la zona de simulación, es decir, facilita la evolución de la red.

Figura 69

Evaluación del Rendimiento de la red con el Protocolo de enrutamiento OLSR



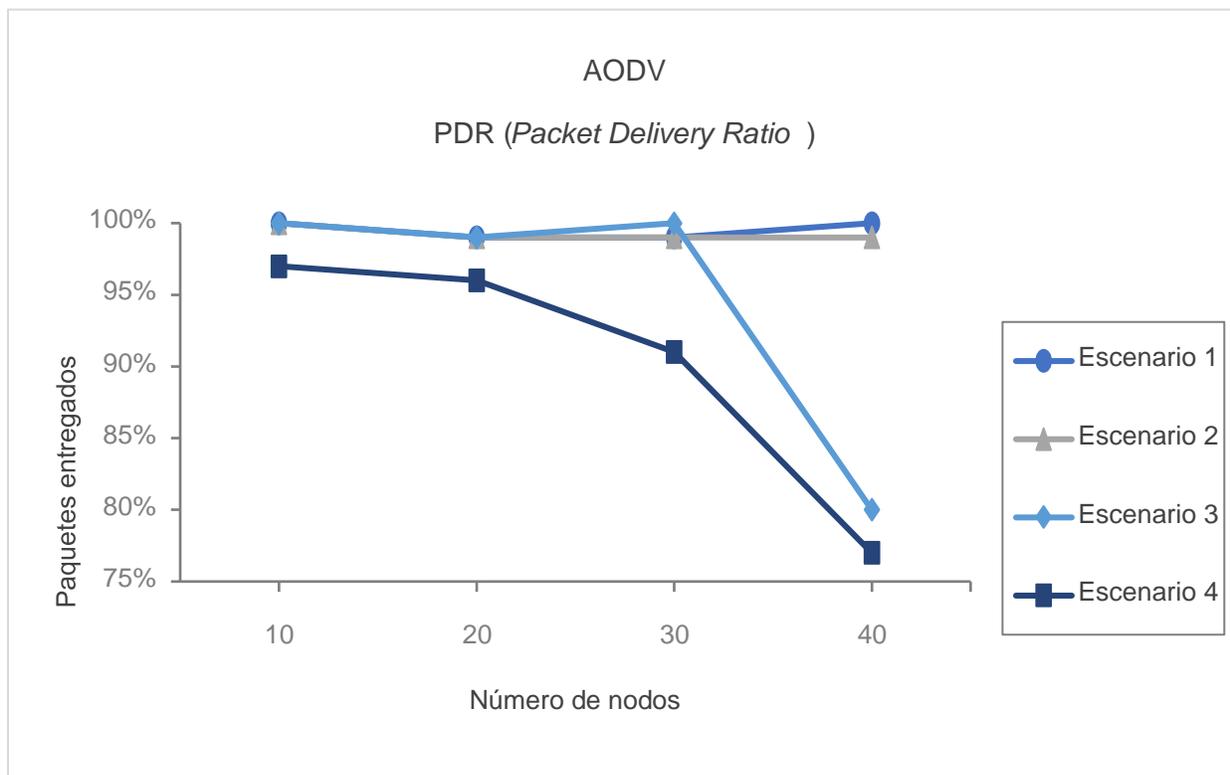
Nota. Vista de la respuesta del rendimiento de la red del protocolo de enrutamiento OLSR.

Análisis de la tasa de entrega de paquetes (packet delivery ratio, PDR).

De la misma manera que se analizó el anterior parámetro se puede observar que si se analizan en la figura 70 y 71 que son las gráficas pertenecientes a los protocolos de enrutamiento AODV y DSDV en los que la tasa de entrega del paquete en las áreas de menos de 300 metros cuadrados es más grande en comparación con lo que se obtiene en el escenario 4.

Figura 70

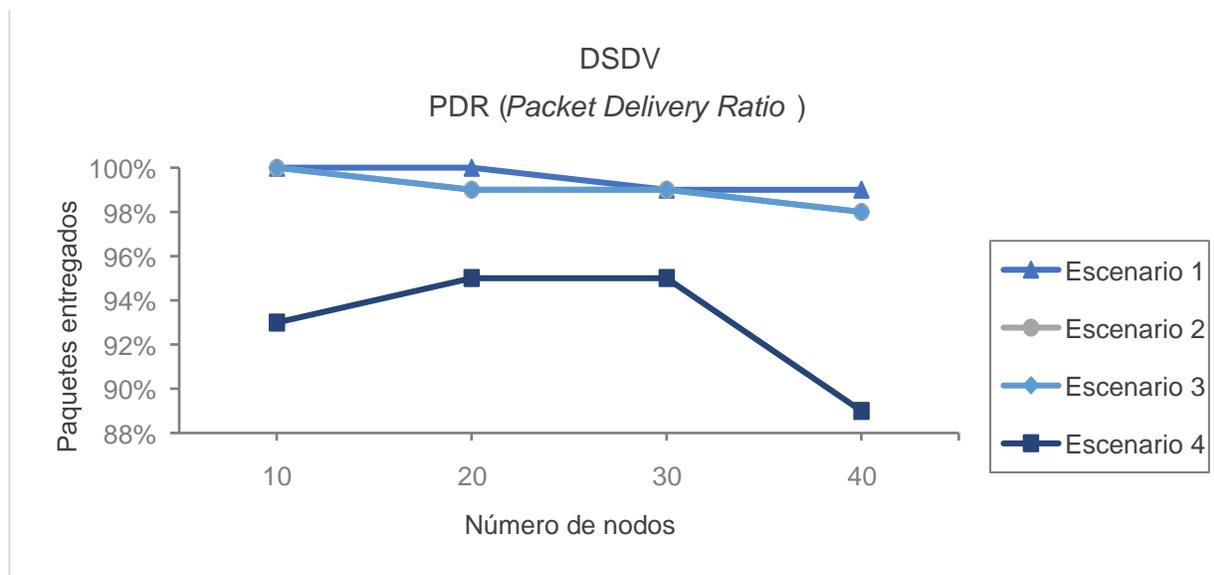
Porcentaje de entrega de paquetes con el Protocolo de enrutamiento AODV



Nota. Vista de la respuesta del porcentaje de entrega de paquetes de datos de la red del protocolo de enrutamiento AODV.

Figura 71

Porcentaje de entrega de paquetes con el Protocolo de enrutamiento DSDV

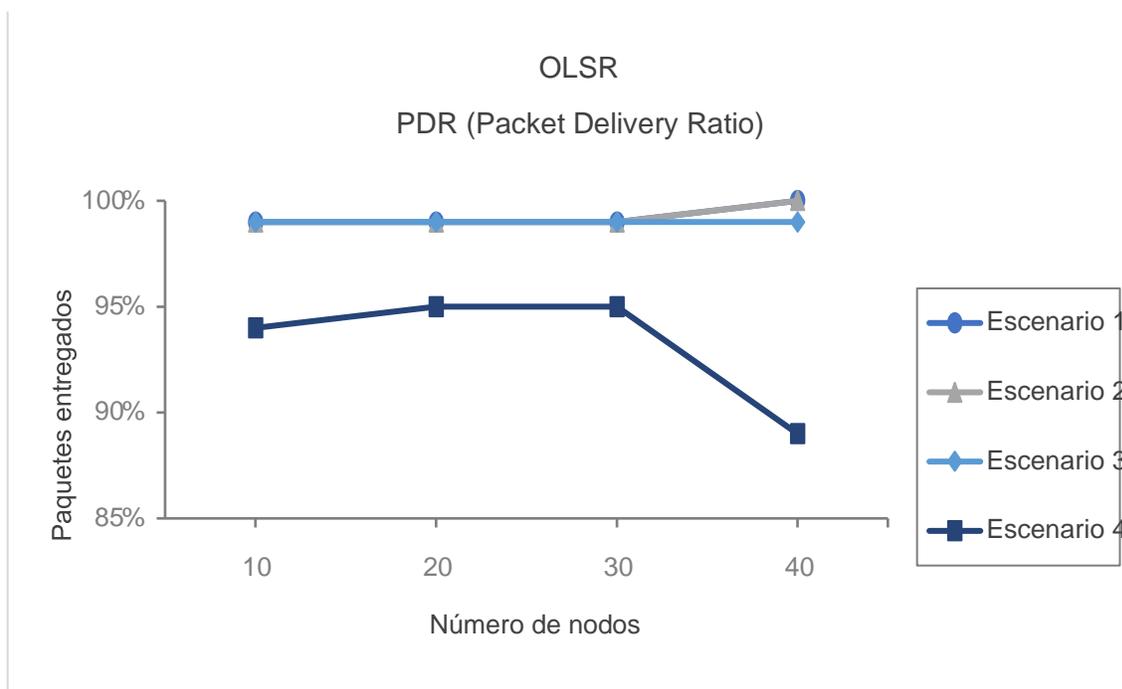


Nota. Vista de la respuesta del porcentaje de entrega de paquetes de datos de la red del protocolo de enrutamiento DSDV.

Como en las gráficas anteriores, aunque la tasa de entrega de los paquetes disminuye a medida que el área y la cantidad de nodos, en el caso del protocolo OLSR, ilustrado en la Figura 72 se puede demostrar que el PDR es mayor en todos los escenarios en relación con Protocolos de DSDV y AODV, que garantizan la confiabilidad de la comunicación que debe existir entre los nodos que conforman la red.

Figura 72

Porcentaje de entrega de paquetes con el Protocolo de enrutamiento OLSR.



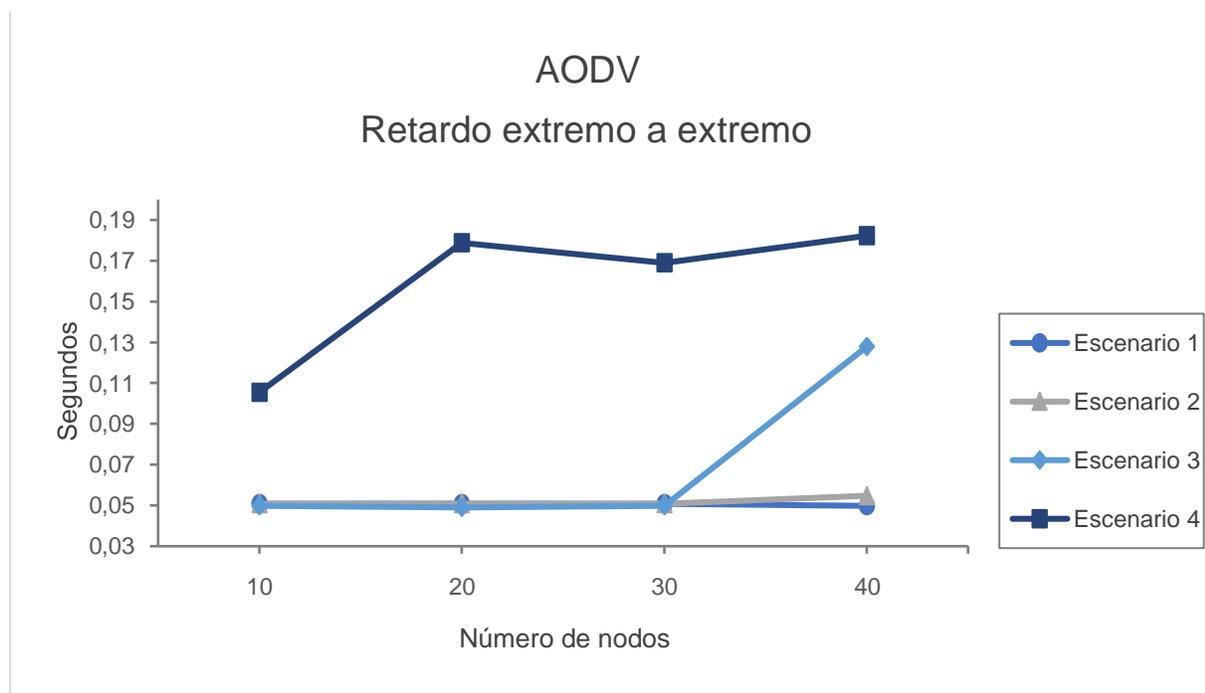
Nota. Vista de la respuesta del porcentaje de entrega de paquetes de datos de la red del protocolo de enrutamiento OLSR.

Análisis del retardo extremo a extremo

En primer lugar, será analizado el protocolo de enrutamiento DSDV, debido a la variación de los resultados en cada uno de los escenarios. Como podemos ver en la 74 el protocolo DSDV para el área más pequeña mantiene los resultados extremos para finalizar el retraso forma lineal incluso con variación en el número de la cantidad de nodos, a diferencia de que ocurre con los otros escenarios.

Figura 73

Retardo extremo a extremo con el Protocolo de enrutamiento AODV



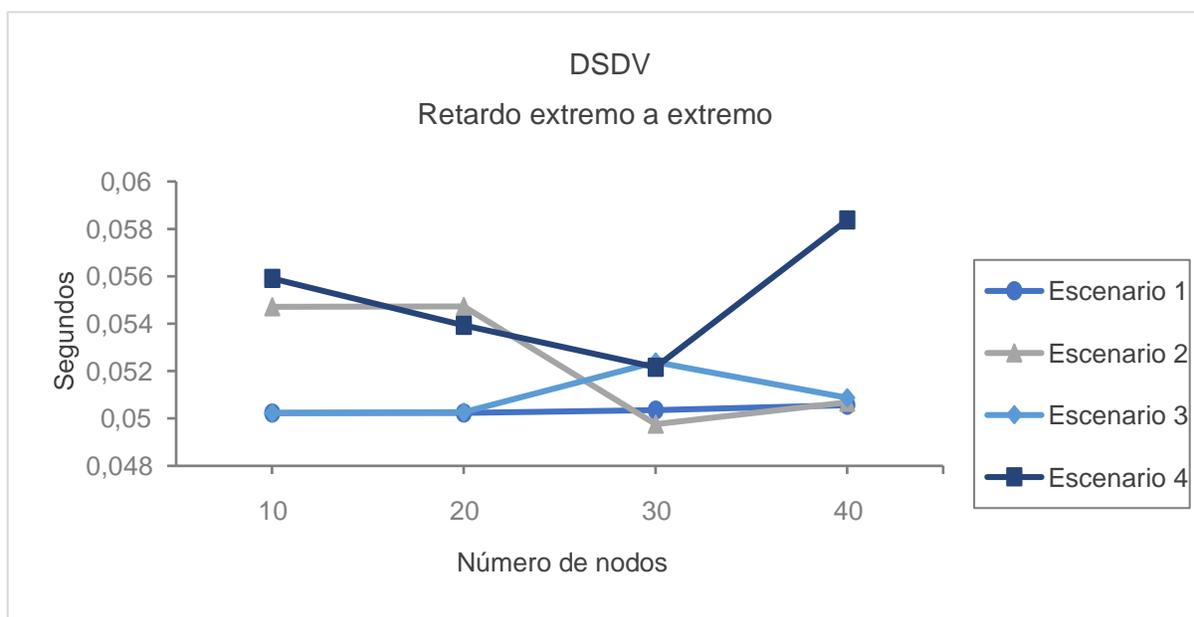
Nota. Vista de la respuesta del retardo de extremo a extremo de la red del protocolo de enrutamiento AODV.

Tanto en la figura 73 y como en la figura 75 se puede observar una respuesta parecida en los protocolos de enrutamiento AODV y OLSR. En ambos casos, un aumento en el valor de este resultado aumenta la cantidad de nodos, es lógico porque los paquetes deben pasar por la mayor cantidad de nodos para llegar al destino. Sin embargo, en la Figura 75, es obvio que el retraso existente es similar en los tres primeros escenarios, esto indica que el protocolo de enrutamiento OLSR tiene un mayor rendimiento debido al aumento de los nodos de red con áreas de hasta 300 metros. La curva correspondiente al escenario 4 indica la reducción del retraso de la red mientras que los nodos aumentan, ya tiene sentido que, en un medio

inalámbrico, se pueden tomar conexiones con fallas de la red con distancias más largas entre nodos, el aumento en la cantidad de los nodos reduciría estas distancias.

Figura 74

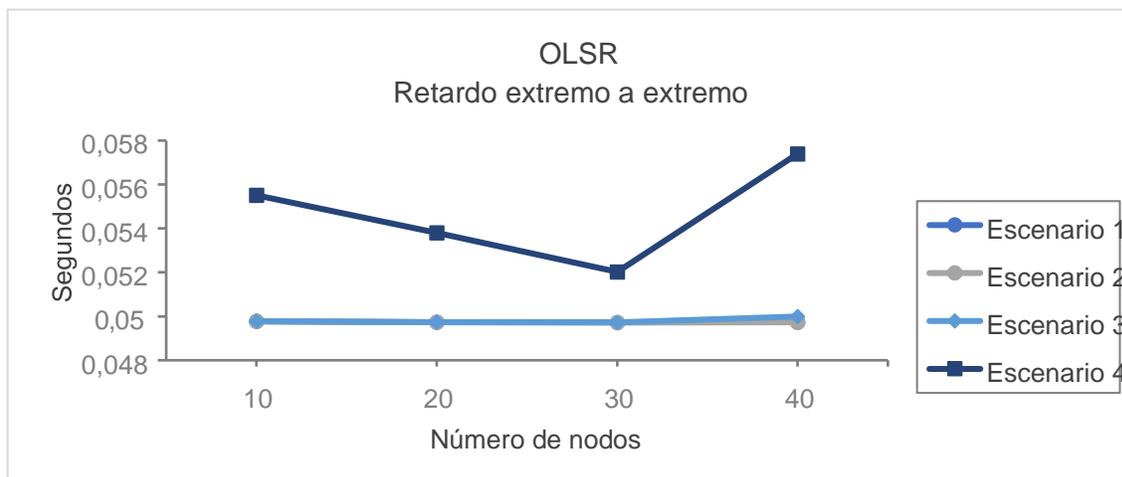
Retardo extremo a extremo con el Protocolo de enrutamiento DSDV



Nota. Vista de la respuesta del retardo de extremo a extremo de la red del protocolo de enrutamiento DSDV.

Figura 75

Retardo extremo a extremo con el Protocolo de enrutamiento OLSR



Nota. Vista de la respuesta del retardo de extremo a extremo de la red del protocolo de enrutamiento OLSR.

Una vez terminados cada una de las pruebas para identificar los protocolos de enrutamiento para obtener una red confiable, se determinó que el estándar 802.11p es el indicado para redes aéreas, además que el protocolo de enrutamiento que cumple las necesidades de vuelo es el OLSR ya que en los cuatros escenarios probados nos brindó características de seguridad, estabilidad y confiabilidad.

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

En la presente investigación, se realizó el análisis comparativo de los protocolos de enrutamiento para una red AD HOC para un enjambre de RPAs para la gestión de las tareas a ejecutar, donde solo se demostró que la implementación de una red aérea AD HOC se tiene que delimitar cuál de los protocolos de enrutamiento serán usados al igual que los estándares de comunicación y con qué tipo de parámetros para tener una red eficiente. Durante el modelado de la red ADHOC se usó tres tipos de software los cuales ayudaron a delimitar cual tipo de protocolo de enrutamiento y comunicación serán usados para los cual se llegó a la conclusión que serán usados los protocolos de enrutamiento OLSR y el estándar de comunicación 802.11p los cuales nos brindan cualidades esenciales para el óptimo funcionamiento de la red.

En este trabajo de investigación se ha hecho un esfuerzo por concentrarse en el estudio comparativo y el rendimiento con el análisis de varios protocolos de enrutamiento bajo demanda/reactivos (DSR, AODV, GPR y TORA) sobre la base de los mencionados anteriormente y sus métricas de rendimiento. Se ha observado que el rendimiento de todos protocolos estudiados era casi estable en medio disperso con poco tráfico y numero de nodos. OLSR funciona mucho mejor en la entrega de paquetes debido a la selección de mejores rutas utilizando un gráfico de respuesta aceptable para el buen funcionamiento de la red.

AODV sigue siendo mejor en actualización y mantenimiento de rutas proceso. Se ha concluido además que debido a la dinámica cambiar la topología y la infraestructura menos, descentralizado características, seguridad y conciencia de poder es difícil de conseguir en

redes móviles ad hoc. Por lo tanto, la seguridad y los mecanismos de conciencia de poder deben ser características integradas para todo tipo de aplicaciones basadas en red ad hoc.

En las simulaciones, se evaluaron cuatro escenarios, una vez que ya se delimito los protocolos de enrutamiento y comunicación que tenían que ser estudios de forma general para llegar al modelo óptimo. En el que se concluye que el protocolo de enrutamiento más apropiado es Optimized Link State Routing (OLSR), aunque en algunos casos nos entregaba porcentajes de entrega de paquetes mucho más bajo que otros, según resultados obtenidos por otras medidas de evaluación, el protocolo del encabezado OLSR es más adecuado para usar la red móvil aérea AD HOC con características similares a los empleados.

Los resultados obtenidos al realizar las diferentes Topología de red lineal y malla, ayudaron a verificar la operación de la red ad hoc aérea en el envío de paquetes de datos desde el terminal hasta los diferentes UAVs, mientras la red está en funcionamiento. Dicho esto, se concluye que, para la topología lineal, el protocolo OLSR en una red Fanet que es como se conoce a la red aérea que es parte de las redes ADHOC, garantiza la escalabilidad de la red mediante la introducción de nuevos nodos de red, finalmente, en la topología de malla, se mostró una mejor efectividad del protocolo durante el establecimiento de nuevas rutas, y al mantener las rutas para el transporte de datos.

Recomendaciones

Para el desarrollo y simulación de los diferentes protocolos de enrutamiento en los diferentes tipos de software como en este caso de estudio fueron usados tres como son OPNET, MATLAB y NS3 los cuales son software que necesitan de un alto rendimiento con respecto a los equipos de computación por los largos tiempos que necesitan para realizar las

diferentes simulaciones al cambiar los parámetros, por esto es la necesidad de dispositivos de computo con altas características de procesamiento de datos.

Se aconseja que en un futuro cuando esta red se implementada físicamente sea lo más parecida a la simulada esto de acuerdo a las características de los protocolos de enrutamiento y comunicación para poder tener una comparativa de que tanto son similares las respuestas obtenidas en la red física como en la red simulada.

Bibliografía:

- Aguilera Ruiz, M. C. M. (2021). *Reglas de comportamiento para enjambres de robots aéreos con percepción local*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Baquero Montoya, P., & Vásquez Briones, R. (2019). *Empleo De Los Uav , En Operaciones De Seguridad Y Vigilancia En Las Áreas Estratégicas En El Ecuador*. IV(4), 86-100.
- Beningo, J. (2020). *Los módulos inalámbricos ESP32 simplifican el diseño IoT*. Digi-Key America del Norte. <https://www.digikey.com/es/articles/how-to-select-and-use-the-right-esp32-wi-fi-bluetooth-module>
- Bustamante, W. O., & Jiménez, S. I. (2019). *Información De Drones Y Su Análisis En La Agricultura De Precisión*.
- Carrillo Peña, G. A. (2018). Sobrevolando la seguridad ciudadana con la nueva tecnología dron en Bogotá. En *Journal of Chemical Information and Modeling*. Universidad Militar de Nueva Granada.
- CESDEN. (2012). Tecnologías Asociadas a Sistemas De Enjambresde Muav. En *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis* (Vol. 53, Número 9).
- García-Aunon, P., Roldán, J. J., De León, J., Del Cerro, J., & Barrientos, A. (2020). Aplicaciones prácticas de los sistemas multi-UAV y enjambres aéreos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 00, 1-12.
<https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/13560/13250%0Awww.revista-riai.org>
- González, J. (2017). Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua. *FINGUACH*, 53(9), 1689-1699.

- Hernández, L. del V. (2016). ESP8266 todo lo que necesitas saber del módulo WiFi para Arduino. *Programar fácil con Arduino*. <https://programarfacil.com/podcast/esp8266-wifi-coste-arduino/>
- HispaDrones. (2019). •▷ **【 Tipos de drones 】** » HispaDrones.
<https://www.hispadrones.com/principiantes/aprendizaje-consejos/tipos-de-drones/>
- Jiménez, A. (2019). *Desarrollo de un sistema de comunicación para flota de drones* ".
Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
- Lima-Morales, J., Rojas, L. A., & Carreazo-Pérez, M. (2018). Virtualización en procesos de control de pedidos de tuberías con Vmware. *Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 9(2), 45-53. <https://doi.org/10.25213/2216-1872.46>
- Márquez Díaz, J. E. (2018). Seguridad metropolitana mediante el uso coordinado de Drones. *Ingenierías USBMed*, 9(1), 39-48. <https://doi.org/10.21500/20275846.3299>
- MathWorks. (2018). MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico - MATLAB & Simulink. En *Natick, Massachusetts* (p. 2). <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- Montoya Osete, A. M. (2019). *Estudio practico del uso de drones en el campo de las telecomunicaciones*. Universidad politécnica de Cartagena.
- Ramirez Marocho, F. W. (2017). *Diseño de un sistema de telecomunicaciones con redes Ad Hoc de drones como alternativa de medio de comunicación para hacer frente a desastres naturales*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.
- Rey, L. C., Ledesma Quiñones, T. O., & García, W. B. (2014). Protocolos de enrutamiento aplicables a redes MANET. *Revista Telem@tica*, 13(3), 59-74.
<http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele>

- Rodriguez, A. (2020). *Tipos de drones y sus características | Iberfdrone Formación de pilotos*.
<https://iberfdrone.es/tipos-drones-y-caracteristicas/>
- Rodríguez, E. J., Deco, C., Petinari, M., & Burzacca, L. (2012). Protocolos de encaminamiento para Redes Malladas Inalámbricas: un estudio comparativo. *XVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 1-10. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/23759>
- Santana Cruz, E. E. (2017). *Propuesta de sistema multi-UAV para aplicaciones de cobertura de área* [Universidad Autónoma de Barcelona].
<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/456309/eesc1de1.pdf?sequence=1>
- Silva Bohórquez, A. F., Mendoza, L. E., & Peña Cortés, C. A. (2014). Sistema de inspección y vigilancia utilizando un robot aéreo guiado mediante visión artificial. *Iteckne*, 10(2), 190-198. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v10i2.421>
- Suqui congacha, n. S., & paredes carrillo, I. J. (2019). “*diseño y construcción de un prototipo de sistema de vuelo cooperativo de vehículos aéreos no tripulados para tareas de microfumigación*”. Escuela superior politécnica de chimborazo.
- ანაკლიის პორტი არის. (20189). No Title ანაკლიის პორტი არის ამ ქვეყნის მომავალი უსაფრთხოების და ეკონომიკის კონტექსტში, არავის გამოუვა ვალდებულებებს თავი აარიდოს. *News.Ge*, <https://news.ge/anakliis-porti-aris-qveynis-momava>.