



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO

Dipartimento di Ingegneria e Scienza dell'Informazione

Corso di Laurea in
Ingegneria dell'Informazione e delle Comunicazioni

ELABORATO FINALE

MESH NETWORKING E DRONI

*Analisi del comportamento di LibreMesh e discussione della sua possibile
applicazione ad uno scenario con nodi di rete trasportati da droni*

Supervisore
Fabrizio Granelli

Laureando
Nicola Fiorello

Anno accademico 2018/2019

Ringraziamenti

Desidero esprimere la mia gratitudine a quanti hanno contribuito, direttamente ed indirettamente, alla realizzazione di questo lavoro, e a quanti mi hanno supportato nel periodo di studi universitari che questo elaborato conduce a termine.

Ringrazio anzitutto il prof. Fabrizio Granelli, supervisore di questa tesi, per il fondamentale ruolo svolto e per il vivo interesse che i temi da lui proposti hanno in me suscitato.

Ai miei compagni di studi, Alessandro, Andrea C., Andrea M., Daniele, Federico, Fivos, Giacomo, Irene, Luca, Riccardo, Sebastiano, Sergio, un grande "grazie" per aver condiviso molti momenti e per aver reso questo percorso una splendida avventura.

Ringrazio i miei fratelli, Beatrice e Davide, i miei nonni, Antonino e Franca, parenti ed amici per aver sempre creduto nelle mie abilità, e ringrazio Eleonora per avermi incoraggiato e per aver pazientemente revisionato, con me, le bozze di questo lavoro.

All'Università di Trento, ai suoi docenti e a tutto il personale sono riconoscente per il grande lavoro che svolgono, e al servizio Orientamento, in particolare, per la piacevole collaborazione.

Un ringraziamento speciale va infine ai miei genitori, Rocco e Tiziana, per l'essenziale supporto che mi hanno sempre mostrato. A loro dedico questo lavoro e questo traguardo.

Nicola

*La teoria è quando si sa tutto e niente funziona.
La pratica è quando tutto funziona e nessuno sa il perché.
Noi abbiamo messo insieme la teoria e la pratica:
non c'è niente che funzioni... e nessuno sa il perché!*

A. Einstein

Indice

Sommario	3
1 Introduzione	5
1.1 Reti di computer	5
1.1.1 Wireless Local Area Network	5
1.1.2 Topologie di rete	5
1.2 Nodi di rete	6
1.3 OpenWrt e LEDE	7
1.4 Il concetto di Mesh	7
2 Wireless mesh network	8
2.1 Soluzioni commerciali	8
2.2 LibreMesh	8
2.2.1 Il progetto	8
2.2.2 Caratteristiche e funzionamento	8
2.3 Test con GLiNet AR300M e LibreMesh	9
2.3.1 Il setup di rete	9
2.3.2 Test di connessione e organizzazione della rete	10
2.3.3 Prestazioni	10
3 Mesh network e droni	18
3.1 Situazioni di emergenza	18
3.2 Una rete di droni	18
3.2.1 Calcolo del numero di nodi richiesti	19
3.2.2 Vantaggi dell'utilizzo di un algoritmo di mesh	21
3.3 Nodi in movimento	21
4 Conclusioni e Progettazione	24
4.1 Valutazione dei dati raccolti e della fattibilità del progetto	24
4.1.1 LibreMesh	24
4.1.2 GLiNet AR300M	24
4.1.3 Esito complessivo delle prove svolte e compatibilità con l'impiego dei droni	25
4.2 Soluzione proposta	25
4.2.1 Scelta dei droni	26
4.2.2 Coordinazione dei dispositivi e processo di ricarica	27
4.3 Valutazioni finali	28
4.3.1 Prestazioni attese	28
Bibliografia	29

A Schede tecniche	31
A.1 Gl.inet Ar300m	31
A.2 Dispositivi impiegati nei test come host e server	32
A.3 DJI m200	33
B Interfaccia del simulatore	34
B.1 Input dei dati	34
B.2 Dati in output e rappresentazione grafica	35

Sommario

Internet, oggi, è uno strumento sempre più diffuso ed utilizzato da miliardi di utenti. La rapida evoluzione della tecnologia, e il continuo progresso che interessa particolarmente il mondo dell'informatica e delle comunicazioni, hanno fatto - della rete globale - un mezzo necessario per lo svolgersi di molte attività ordinarie: email, messaggistica, telefonate, pagamenti, videosorveglianza sono solo alcune delle operazioni che, quotidianamente, sfruttano l'accesso ad Internet.

La sua distribuzione e la vasta infrastruttura che ne garantisce l'utilizzabilità da parte di utenti dislocati in tutto il mondo è senza dubbio un'opera unica, che non ha precedenti per dimensioni e complessità. Si tratta di un sistema perlopiù efficiente e robusto, ma soggetto alle vulnerabilità di qualsiasi impianto. Garantire un accesso ad Internet in situazioni di emergenza, infatti, potrebbe risultare difficoltoso in seguito all'interruzione di linee di trasmissione dovuta a calamità naturali o incidenti.

Analogamente, vi sono ancora parecchie zone in cui una connessione ad Internet non è presente con copertura sufficiente; anche in questi luoghi, in caso di necessità, garantire una copertura potrebbe non essere agevole. L'idea che si discuterà in questo elaborato consiste nell'utilizzo di algoritmi di mesh-networking al fine di realizzare reti per situazioni come quelle sopra descritte.

Le mesh-network (spesso abbreviate in "mesh-net") sono reti che - tra le varie e numerose topologie realizzabili - si caratterizzano per funzionalità di auto-configurazione e ottimizzazione. Una rete informatica può di fatto essere strutturata in molti modi differenti, con schemi di connessione tra i vari nodi (detti, appunto, "topologie") anche fortemente diversi tra loro. Se, tradizionalmente, il grafo della topologia è una caratteristica di progetto che permane costantemente nell'esercizio della rete, le mesh-network introducono a riguardo un concetto nuovo e di grandi potenzialità. Esse sono in grado di stabilire nuove connessioni tra i nodi che le compongono o di interromperne altre, al fine di mutare continuamente la topologia adattandola ai requisiti dello scenario in cui operano.

Il comportamento dinamico delle mesh-network non si limita ad ottimizzare le prestazioni realizzando sempre topologie prestanti, ma contribuisce fortemente alla facilità di installazione. Una rete di questo genere non richiede grandi operazioni di configurazione iniziale: non è necessario decidere quali router serviranno quali utenti, né come i vari dispositivi dovranno connettersi tra loro. Si può dire, semplificando, che la rete è in grado di avviarsi e svilupparsi autonomamente.

Allo stesso modo, la dinamicità e la predisposizione ai cambiamenti di una mesh-network, la rendono efficiente in caso di guasti o interruzioni di collegamenti: essa - grazie alla sua capacità di riconfigurazione e riorganizzazione della topologia - è in grado di far fronte ad eventi di questo tipo reagendo in tempi utili e ripristinando - limitatamente a quanto reso possibile dalla presenza fisica di dispositivi nelle aree interessate - la corretta copertura di rete.

Tra le tante soluzioni disponibili, si è individuato un software di mesh-networking, chiamato LibreMesh. Si tratta di un progetto open source italiano, il cui scopo è quello di fornire firmware per trasformare dispositivi di rete ordinari in nodi di una mesh-network. Sono state svolte numerose prove su una rete sviluppata con LibreMesh, allo scopo di verificarne il corretto funzionamento, osservarne il comportamento studiando le strategie e le decisioni che la rete prende in autonomia, e valutando quantitativamente le prestazioni che questa riesce a fornire agli utenti.

Per un corretto e veritiero svolgimento delle prove, si è deciso di procedere, anziché tramite simulazioni con macchine virtuali, installando LibreMesh su dei dispositivi fisici. Sono stati scelti per tale scopo i mini-router di GL.iNet Ar300m. Questi dispositivi si distinguono per dimensioni fisiche molto ridotte, peso esiguo e consumi limitati, pur garantendo funzionalità e prestazioni di livello.

I test svolti con la combinazione di LibreMesh e GL.iNet AR300M hanno interessato al massimo 3 router e 3 host, ed hanno permesso di mettere in luce i vantaggi e i punti di forza della rete mesh, ma anche alcune debolezze. Per la valutazione numerica delle prestazioni è stato impiegato il software *iperf3*, che ha permesso di osservare - nei diversi scenari realizzati - il comportamento della rete al trasferimento di pacchetti di dati, e di valutare la Bandwidth media fornita in tali processi di trasferimento.

Complessivamente, si è concluso che l'esito delle prove svolte sulla combinazione di hardware e software individuata è positivo. La rete mesh sviluppata si comporta in maniera intelligente ed efficiente, sviluppando topologie ottimizzate sulla base delle caratteristiche dello scenario. Le prestazioni osservate sono altresì soddisfacenti, e delineano un'efficienza dell'algoritmo di mesh-networking conforme a quanto atteso.

Valutati hardware e software, e constatata la loro compatibilità, si è ipotizzato uno scenario che preveda dei droni per il trasporto dei dispositivi di rete, al fine di realizzare una mesh-network adatta a situazioni di emergenza come descritto in apertura. Una rete di questo tipo, infatti, potrebbe - grazie all'utilizzo di velivoli per la realizzazione della copertura di segnale - adattarsi a situazioni di conformazione geografica differente sfruttando la possibilità di movimento dei nodi. Sono state quindi stimate le caratteristiche che una rete di questo genere dovrebbe avere, a partire dalla definizione del numero di droni necessari a coprire una determinata area. Per facilitare ed automatizzare questo calcolo è stato realizzato uno script che permette - inseriti alcuni dati relativi alla situazione che si intende prendere in esame - di simulare la copertura di una zona geografica con dei droni in volo, determinando in primis quanti questi dovrebbero essere. Alcune informazioni aggiuntive relative alle prestazioni - come la posizione ideale del nodo di rete fornito di accesso ad Internet - sono calcolate autonomamente dallo script.

Una comparazione della rete mesh con un'ipotetica rete tradizionale impiegata allo stesso scopo ha confermato che il mesh-networking è la soluzione più indicata per uno scenario simile, e che la sua autonomia nella configurazione è condizione pressoché necessaria per l'applicazione con i droni.

Sono stati successivamente discusse le funzionalità aggiuntive che possono derivare dalla possibilità dei droni di spostarsi liberamente nello spazio, caratteristica insolita per un nodo di rete. Sono state considerate, a riguardo, numerose ipotesi di comportamenti dinamici come scambi di posizioni e sorvolo di aree sovraffollate da parte di droni ausiliari, al fine di determinare un incremento della stabilità della rete e delle sue prestazioni.

Infine, assieme alle conclusioni sul lavoro di ricerca svolto, è stata avanzata una proposta di progetto. Non si tratta di una progettazione dettagliata e completa, ma di un'idea più concreta e pratica di come le tecnologie testate e gli scenari discussi potrebbero essere uniti per la realizzazione di una mesh-network con i droni. Sono state affrontate alcune problematiche che si incontrerebbero indubbiamente nello sviluppo del progetto, come disservizi legati all'autonomia limitata delle batterie o a condizioni atmosferiche sfavorevoli al volo dei droni. L'analisi di queste eventualità e la proposta di soluzioni è stata affiancata, in conclusione, dall'enumerazione dei requisiti che un drone dovrebbe possedere per essere impiegato nel progetto. Il velivolo *DJI m200* è stato scelto come modello per le sue caratteristiche e funzionalità, rendendo possibile un calcolo sommario delle prestazioni attese dalla rete.

1 Introduzione

1.1 Reti di computer

Le reti di computer sono degli insiemi di dispositivi collegati tra loro che, attraverso canali di comunicazione, possono intrattenere uno scambio di dati. Ognuno di questi dispositivi necessita di una parte software che preveda la possibilità di partecipare alla rete e che conosca e segua le regole imposte dai protocolli. Questi ultimi rappresentano un concetto base della teoria delle reti, e possono essere definiti come *“il formato e l’ordine dei messaggi scambiati tra due o più entità in comunicazione, così come le azioni intraprese in fase di trasmissione e/o di ricezione di un messaggio o di un altro evento”*[14].

Oggi, numerose tipologie di reti vengono impiegate per scopi diversi, e spaziano da piccole reti domestiche - comprendenti due o tre dispositivi - fino ad Internet, la rete globale che rappresenta, forse, una delle più grandi opere realizzate dall’umanità.

1.1.1 Wireless Local Area Network

Allo scopo di identificare le reti in base alle loro caratteristiche e, soprattutto, alla loro estensione geografica, alcune classi sono uniformemente riconosciute. Tra queste, si definiscono *LAN* (Local Area Network) le reti la cui estensione si limita ad un edificio o un comprensorio, su distanze massime di qualche centinaio di metri [13].

In una rete, i dispositivi possono essere fisicamente congiunti tra loro in diversi modi, ma due sono fondamentalmente le tipologie di collegamento utilizzate: canali cablati e canali wireless. I primi prevedono l’utilizzo di un cavo di rete che unisca direttamente i due dispositivi che si intende collegare, mentre le connessioni wireless avvengono sfruttando la propagazione di un segnale nello spettro elettromagnetico e, quindi, senza necessità di cavi o guide.

Una *WLAN* (Wireless Local Area Network) è di fatto l’applicazione di quest’ultimo tipo di connessione (tecnologia wireless) ad uno scenario di rete di tipo *LAN*.

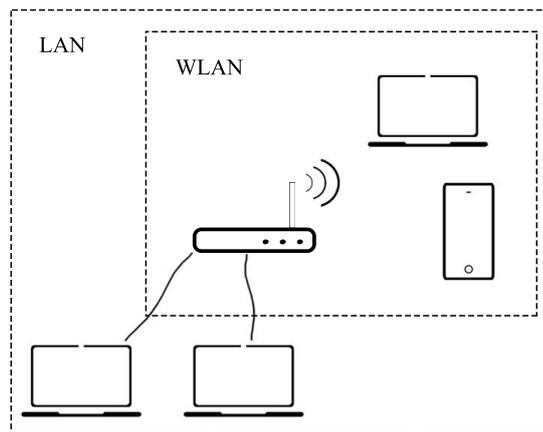


Figura 1.1: Wireless Local Area Network all’interno di una Local Area Network

1.1.2 Topologie di rete

La topologia di una rete [12] è il grafo che rappresenta come i vari nodi che la compongono sono tra di essi collegati. Ci sono molte strategie, che richiedono tecnologie specifiche per essere realizzate, e sono adatte a scenari e requisiti di rete differenti. Per realizzare una certa topologia, ad esempio,

potrebbe essere necessario progettare tutta la rete a priori, mentre una topologia differente potrebbe gestire autonomamente delle variazioni della struttura.

Uno schema riassuntivo delle più diffuse topologie è riportato nella *figura 1.2*, mentre una trattazione più approfondita delle topologie parzialmente magliate (quelle relative alle mesh-network) si trova nel *capitolo 2*.

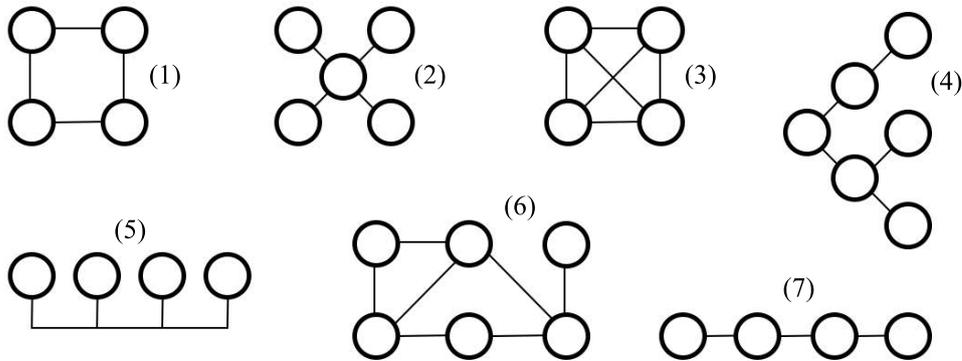


Figura 1.2: Differenti topologie di rete: ad anello (1), a stella (2), completamente connesse (3), ad albero (4), con bus di rete (5), mesh (6), lineari (7)

1.2 Nodi di rete

In una rete, come detto, operano contemporaneamente diversi dispositivi. Questi, definiti “nodi della rete”, possono essere classificati in base al ruolo che esercitano all’interno di questa. La classificazione - come spesso accade - può variare in base al tipo di comunicazioni che avvengono sulla rete; per semplicità, si considera la tradizionale architettura “client-server”.

Host client

Si tratta dei dispositivi che, di fatto, usufruiscono dei servizi messi a disposizione dalla rete. Questi (spesso indicati nella trattazione come “utenti”) si connettono per comunicare tra di loro o con dei server, al fine di inviare o ricevere informazioni utili. In una rete locale casalinga, per esempio, si considererebbero come host gli smartphone, i PC, i tablet e gli altri dispositivi che gli utenti utilizzano per accedere ad Internet.

Server

È definito “server”, invece, un sistema informatico predisposto allo scopo di fornire a degli utenti (client) dei servizi. Può trattarsi di un computer fisico, dell’unione di più computer, o di una macchina virtuale in funzione su un dispositivo più ampio. Nell’odierna navigazione in Internet, ci si connette ripetutamente ai server web che ospitano le pagine che si visitano o a quelli che gestiscono le app che si utilizzano.

Router

Nel caso di reti come quelle prese in esame in questa trattazione, vi è un solo altro tipo di dispositivo che prende parte alla rete: il router. Esso non è di fatto né un server, né un host client, e si occupa di instradare (ossia ricevere e spedire al corretto indirizzo) i cosiddetti “pacchetti”. Ci si riferirà sovente ai router - elemento fondamentale dell’analisi svolta - con il più generico termine “nodo”.

1.3 OpenWrt e LEDE

OpenWrt [11][4] è una versione del sistema operativo Linux destinata principalmente all'utilizzo su dispositivi embedded, ma anche su smartphone o microcontrollori. Non si tratta di un firmware vero e proprio, ma di un filesystem di gestione dei pacchetti, configurabile e compilabile per essere utilizzato con applicazioni di diverso tipo.

Il software, di natura open-source, è sviluppato da una community che ne mantiene l'aggiornamento. Utenti di tutto il mondo utilizzano OpenWrt per creare applicazioni specifiche senza dover costruire, per esse, un firmware completo.

Nel 2016, un fork del progetto chiamato *LEDE* (Linux Embedded Development Environment) - caratterizzato da obiettivi e specifiche simili a OpenWrt - ha preso vastamente piede divenendo una soluzione alternativa scelta da migliaia di utenti. Nonostante il 2018 abbia segnato l'anno della fusione dei due software allo scopo di tornare ad un'unica versione, alcuni progetti nati nel periodo di vita di LEDE come sistema indipendente portano ancora il suo nome. LibreMesh - il software di mesh-networking analizzato - è uno di questi.

La configurazione di OpenWrt (e, chiaramente, anche di LEDE), può avvenire sostanzialmente in due modi; i dispositivi su cui il sistema operativo funziona, infatti, non sempre sono dotati di schermo o interfacce per l'utente, il quale può quindi esercitarne il controllo tramite accesso con una command-line-interface o attraverso l'interfaccia grafica web chiamata LuCI. Quest'ultima - realizzata sulla base del framework grafico Bootstrap - è alla base dell'interfaccia grafica di LibreMesh.

1.4 Il concetto di Mesh

Prima di presentare i risultati ottenuti e di discutere gli scenari di rete presi in considerazione, si ritiene opportuno chiarire un concetto chiave: che cos'è una Mesh-Network [9].

Questa topologia di rete - che si distingue per la sua intelligenza e modernità - prevede che i nodi dell'infrastruttura stabiliscano, fra di essi, connessioni dirette in maniera dinamica e, soprattutto, non gerarchica. La mesh-network, quindi, sarà caratterizzata da molte connessioni tra i nodi e da definizioni di percorsi ottimali attraverso il calcolo della lunghezza di ogni via. A causa dell'indipendenza dei vari nodi nel connettersi tra loro e con gli host della rete, è possibile un processo di auto-configurazione, che facilita la fase di installazione della rete. Per lo stesso motivo, la mesh-network è in grado di mutare la sua struttura e il suo comportamento allo scopo di seguire le esigenze di scenari variabili e di ottimizzare le prestazioni.

Una topologia di questo tipo, inoltre, fa fronte autonomamente agli eventi di guasto e perdita dei pacchetti, rendendo le comunicazioni non solo efficienti, ma anche sicure.

Le caratteristiche dettagliate della rete mesh utilizzata e la descrizione del suo comportamento sono riportate nel prossimo capitolo, al *punto 2.2*.

2 Wireless mesh network

2.1 Soluzioni commerciali

L'utilizzo di Internet è sempre più indispensabile per miliardi di utenti in tutto il mondo, e le connessioni wireless rappresentano ormai la quasi totalità degli accessi ad Internet da parte di PC e smartphone. C'è necessità, quindi, di avere reti WiFi prestanti e ottimizzate per gli spazi in cui vengono installate.

Da qualche anno si trovano, sul mercato, alcune proposte di kit di dispositivi che - funzionando con algoritmi di mesh - permettono l'installazione di una rete wireless in grado di configurarsi in autonomia e coprire con l'accesso ad Internet aree anche molto vaste, con prestazioni decisamente superiori a quanto storicamente ottenuto con la tipica configurazione *Modem-Router-Extenders*.

Si tratta di tecnologie collaudate e ben funzionanti, che secondo l'opinione di molti utenti rappresentano un'interessante alternativa alle topologie tradizionali, vantando inoltre un prezzo accessibile [2].

In parallelo a queste tecnologie - come spesso accade nel mondo del software - alcune distribuzioni open-source create da community di tecnici e programmatori permettono di trasformare (quasi) qualunque router in un dispositivo "intelligente" - in grado di partecipare ad una mesh-network - dando la possibilità di creare kit di rete mesh a prezzi limitatissimi.

2.2 LibreMesh

Una di queste soluzioni è LibreMesh, ed è il software che verrà analizzato ed utilizzato in questo elaborato; esistono tante altre valide alternative che si basano sui medesimi framework e protocolli.

2.2.1 Il progetto

LibreMesh [5] è un progetto italiano realizzato ed aggiornato da una community, con lo scopo di fornire a utenti di tutto il mondo un framework modulare per creare firmware per nodi di reti mesh. Numerose versioni del firmware già compilate si trovano in rete, sul sito ufficiale, e rendono LibreMesh un software direttamente utilizzabile su un grande numero di dispositivi, permettendo una semplice implementazione di reti mesh auto-configuranti e molto versatili.

2.2.2 Caratteristiche e funzionamento

[6] Il framework, una volta installato sui dispositivi che diverranno i nodi della mesh-network, genera 3 reti WiFi per ogni router: la prima - con SSID differente per ognuno - permette l'accesso diretto al router per scopi di configurazione, mentre la seconda e la terza rete - con SSID comune - rappresentano rispettivamente il punto d'accesso alla rete da parte degli utenti finali e il canale di meshing attraverso il quale avverrà l'effettivo instradamento dei pacchetti.

Una dashboard navigabile tramite browser permette di supervisionare la situazione della rete, sia da un punto di vista più globale, sia specifico del router a cui si è connessi; un'area riservata - protetta da password - permette inoltre di configurare numerosi parametri al fine di adattare il comportamento della mesh-network alle esigenze dettate dalla situazione.

Dal punto di vista tecnico, LibreMesh è costruito su LEDE, e basa il suo funzionamento su due protocolli: B.A.T.M.A.N. Adv e BMX6, rispettivamente collocati al livello 2 e 3 della pila dei livelli di rete.

B.A.T.M.A.N. - Adv

Better approach to mobile ad-hoc networking [1] [10] [6] è un protocollo di routing per reti a maglia, che introduce il concetto di decentralizzazione applicato all'instradamento. Se tradizionalmente tutti

i nodi conoscono tutti i dati relativi alla situazione della rete al fine di definire la miglior rotta di instradamento, con B.A.T.M.A.N nessun nodo possiede la totalità dell'informazione: ognuno limita la sua conoscenza alle informazioni concernenti le direzioni da cui provengono i dati e alle direzioni verso le quali essi vanno inviati. Questo approccio non rivoluziona solo il processo di routing, rendendolo più efficiente, ma introduce una vera e propria "intelligenza collettiva" nella rete.

Gli *originator-messages* - messaggi inviati in broadcast da ogni nodo ad intervalli regolari - segnalano ai dispositivi vicini la presenza del nodo che li genera, e causano l'inoltro dell'informazione verso tutti i nodi vicini al ricevente, dando vita ad una sorta di propagazione esponenziale, che raggiunge infine la copertura di tutta la rete. B.A.T.M.A.N conta - al fine di determinare la rotta migliore verso un nodo specifico - gli originator-messages ricevuti, e memorizza da quale vicino essi sono stati inoltrati; utilizza quindi quest'informazione per determinare solamente il prossimo nodo (come tipico dei protocolli *distance-vector*), senza definire l'intera rotta (come farebbe, invece, un protocollo *link-state*).

Per l'utilizzo con Internet, l'inserimento nella rete globale avviene tramite un processo molto semplice: ogni nodo in grado di fornirvi un accesso ne notifica la rete, e gli altri dispositivi utilizzano l'informazione per determinare se - fra i propri vicini - vi sia qualcuno in grado di fornire connessione Internet, e con quale banda.

BMX

BMX [6] 6 e le sue versioni successive sono protocolli di routing dinamici basati su IPv6. Offrono molte funzionalità avanzate - come un overhead di rete - e funzionano con la strategia del *distance-vector*. Nell'ultima versione sono state introdotte delle misure atte a garantire la sicurezza di rete.

Mixing layers

Nel funzionamento di LibreMesh [6], entrambi i protocolli (BMX e B.A.T.M.A.N.) sono in esecuzione, contemporaneamente. Essi, tuttavia, operano su due diverse VLAN, permettendo l'isolamento del livello MAC dal routing. Una differenza importante che caratterizza i comportamenti dei due protocolli è che - mentre BMX si basa su un'unica rete per tutta la mesh-net - B.A.T.M.A.N. potrebbe suddividere il suo funzionamento in più sotto-reti. L'eventuale suddivisione in diversi cloud permetterebbe di isolare le diverse reti che - restando collegate tra loro da BMX sul livello 3 - diverrebbero di fatto delle LAN distinte.

2.3 Test con GL.iNet AR300M e LibreMesh

Al fine di testare le funzionalità di LibreMesh, osservarne il comportamento e valutarne le prestazioni, è stato installato il firmware su 3 dispositivi *GL.iNet AR300M*, le cui caratteristiche tecniche fornite dal costruttore sono riportate nell'*allegato A, punto 1*.

Per studiare la topologia di rete sono stati osservati i dati forniti dai router nelle dashboard di LibreMesh, che comprendono un log di tutte le connessioni e forniscono schemi specifici per entrambi i livelli di rete. Al fine invece di valutare le prestazioni della rete nell'attuazione di diversi scenari, è stato avviato un server *iperf3* in locale, che si è proceduto poi a contattare da diversi host connessi alla mesh-network; l'indipendenza di tale configurazione dalla rete globale ha permesso di effettuare valutazioni quantitative le più fedeli possibili, non influenzabili dalla variabile qualità della connessione ad Internet.

2.3.1 Il setup di rete

I dispositivi sono stati omogeneamente configurati, assegnando loro le tre SSID come soprascritto. La potenza di trasmissione delle antenne WiFi è stata impostata in relazione alla scala delle prove svolte: si è valutato che condurre i test su spazi ristretti forzando i dispositivi a mantenere potenze ridotte porti a risultati analoghi a quelli che si otterrebbero su una scala più vasta sfruttando l'intera capacità di trasmissione.

A rivestire di volta in volta i ruoli di server e host sono stati impiegati un laptop e degli smartphone, le cui caratteristiche tecniche di hardware e software sono indicate nell'*allegato A* al *punto 2*. Un test preliminare ha permesso di constatare che - sulla rete mesh generata da LibreMesh con i dispositivi GL.iNet - le prestazioni non risentono della tipologia o delle caratteristiche dei dispositivi che operano sulla rete: scambiare i ruoli di server/host tra PC e smartphone non causa alcuna variazione nei risultati delle prove.

2.3.2 Test di connessione e organizzazione della rete

In una rete di tipo mesh, ogni dispositivo è in grado di raggiungere tutti gli altri, in maniera diretta o indiretta. Con “indiretta” si intende che, per raggiungere un determinato nodo, è necessario passare tramite altri dispositivi, sottostando al principio che ogni router può inoltrare l’informazione solo ed esclusivamente ad uno dei suoi “vicini” (quelli con cui può sostenere una comunicazione “diretta”).

Rappresentando su una mappa i diversi nodi e collegando tra loro solo quelli che dispongono di una connessione diretta è possibile ricostruire un modello della topologia di rete. Nelle prove effettuate con i tre dispositivi si è notato un risultato - prevedibile - che classifica le disposizioni in due tipologie: nodi a triangolo e nodi in serie.



Figura 2.1: Topologie di rete

Il primo caso, in cui i nodi sono tutti direttamente connessi tra loro, si verifica qualora la copertura del segnale WiFi permetta a tutti i nodi di raggiungere tutti gli altri: è senza dubbio la situazione più interessante ed anche quella che si è realizzata con frequenza maggiore. Molti dei test successivamente esposti sono stati condotti in una configurazione di questo tipo. La seconda configurazione, invece, delinea una situazione in cui non tutti i nodi riescono a contattare direttamente gli altri due partecipanti alle rete. Questo caso si verifica più raramente e non permette di osservare il funzionamento tipico della mesh-net, in quanto i percorsi di routing sono pressoché sempre prevedibili.

Si noti che il numero limitato di nodi disponibili non dà modo alla rete di disporsi in configurazioni più articolate: se vi fossero 5 o 6 dispositivi potremmo già osservare “scelte” di connessione orientate alla massimizzazione delle prestazioni, e decisamente meno scontate di quanto non si verifichi con 3 router.

In relazione alla disposizione dei nodi e alla topologia di rete, un ultimo aspetto merita d’essere menzionato: l’accesso alla rete da parte degli utenti. Si è notato infatti che l’utente che si connette alla rete viene “assegnato” al nodo che garantisce, nei suoi confronti, la miglior qualità di connessione. Nei test in spazio aperto si è visto che - ragionevolmente - gli host vengono associati sempre al router più vicino.

A tal proposito, è interessante notare che - riducendo la potenza di trasmissione dei dispositivi per operare su una scala dimensionalmente ridotta - la misurazione del rapporto segnale/rumore dei canali di trasmissione tra i vari nodi (e tra i nodi e gli host) risente anche di spostamenti minimi, dell’ordine di grandezza dei centimetri.

Disponendo 3 nodi in serie, spazialmente collocati a coprire circa un metro di distanza tra il nodo 1 e il 3, ed osservando l’andamento dei rapporti Segnale/rumore tra 1 e 2 e tra 2 e 3, si possono osservare le variazioni dovute allo spostamento del nodo centrale, che è stato in questo caso traslato di 50 cm circa.

2.3.3 Prestazioni

L’osservazione delle prestazioni è la tipologia di test che ha permesso una valutazione più specifica e soprattutto quantitativa del comportamento della rete. Si è misurato l’andamento della Bandwidth nel tempo in prove della durata di circa un minuto, variando di test in test la configurazione o le

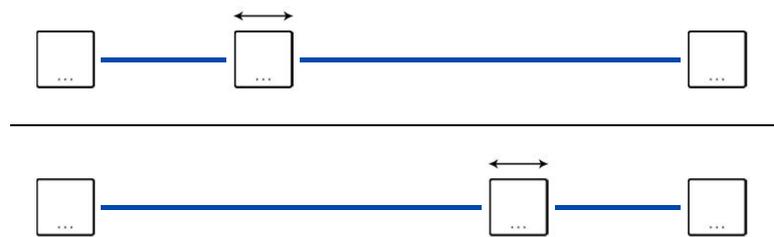


Figura 2.2: Spostamento del nodo 2 per l'osservazione del rapporto Segnale/Rumore

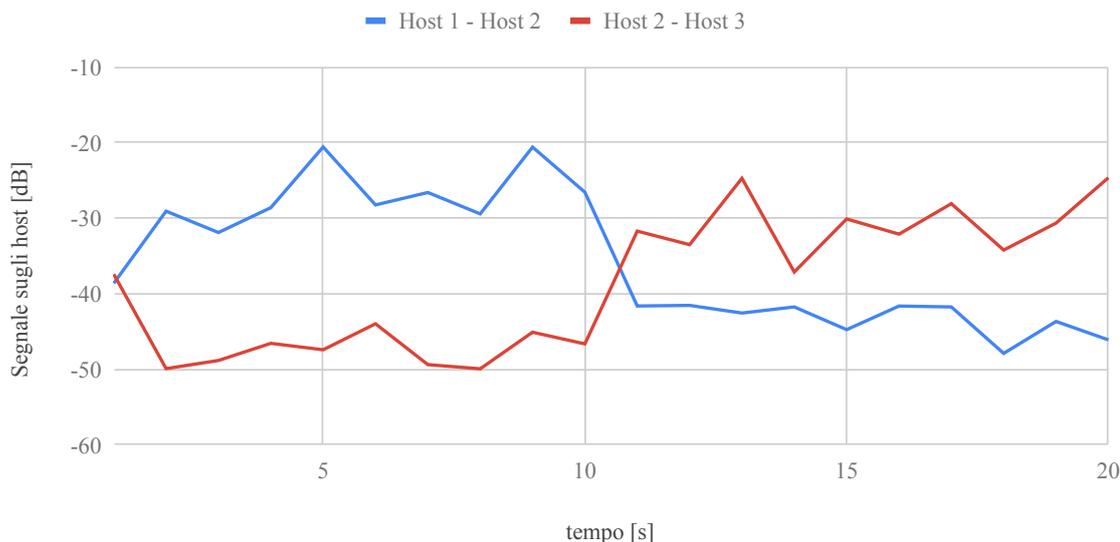


Figura 2.3: Andamento del rapporto Segnale/Rumore allo spostamento del nodo centrale

condizioni di esercizio della mesh-net. Si riportano i risultati dei 5 esperimenti svolti, che hanno permesso non solo di valutare la qualità del firmware, ma anche di delinearne alcune caratteristiche e comprenderne le strategie.

Test 1: Andamento delle prestazioni all'aumentare degli hop

Con “hop” si intende la porzione del percorso dell'informazione che interessa il passaggio da un nodo della rete. Nel caso della mesh-net in questione, si considera un hop il passaggio da uno dei router che partecipano alla rete. Lo scopo di questo test è osservare come l'aumentare degli hop determini un decremento della bandwidth e, quindi, delle prestazioni della rete.

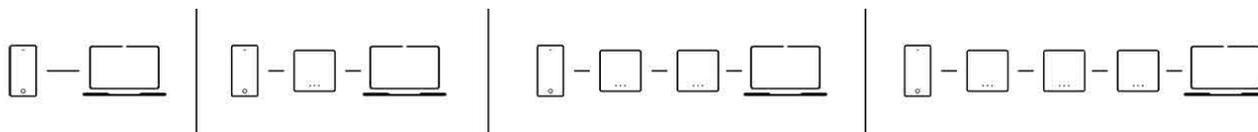


Figura 2.4: Variazione degli hop del percorso di rete

Per l'esecuzione della prova sono stati collegati due dispositivi (uno smartphone con ruolo di host, ed un PC con ruolo di server) prima in connessione wireless diretta tra loro, e successivamente attraverso uno, due e poi tre dispositivi GL.iNet-AR300M.

Si nota anzitutto che le prestazioni sono significativamente condizionate dal numero di hop; l'inserimento dei tre passaggi nella rete, infatti, penalizza la bandwidth limitandola a quasi un settimo

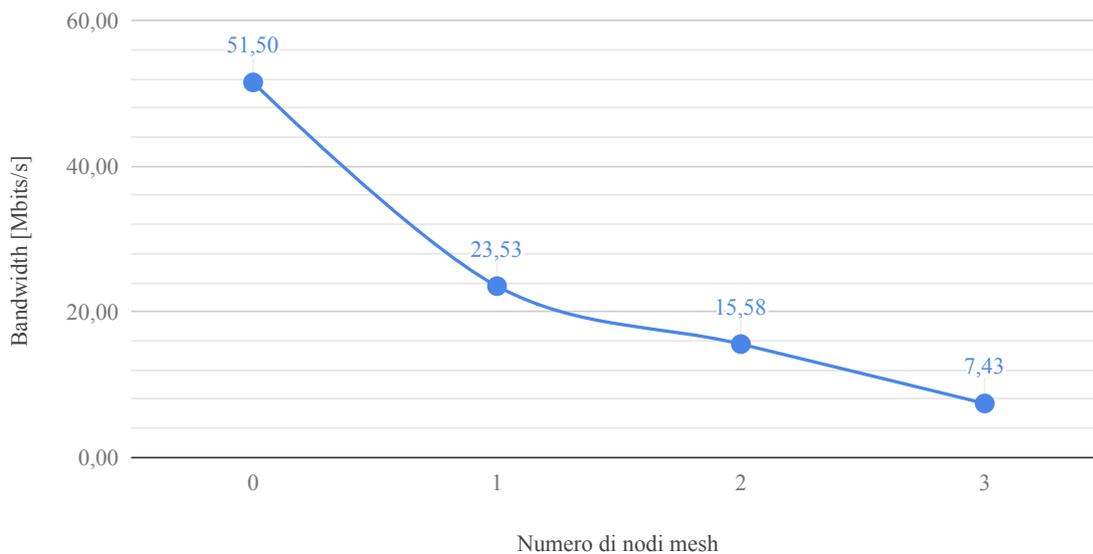


Figura 2.5: Andamento delle prestazioni all'aumentare degli hop

del suo valore nella situazione di WiFi-direct. Più specificatamente, denominando B il valore della bandwidth e n il numero di nodi (e quindi di hop) attraverso i quali l'informazione è costretta a passare, si può individuare un andamento assimilabile a quello della funzione

$$B(n) = \frac{K}{n+1}$$

dove K rappresenta una costante misurabile, all'incirca, osservando la bandwidth nel caso di zero hop.

La significativa diminuzione delle prestazioni all'aumentare degli hop osservata in questa prima prova attesta quanto congetturato circa il comportamento della mesh-net: optare per il percorso più breve (con meno hop) si tradurrà, nel maggiore dei casi, nella scelta del percorso più prestante.

Test 2: Confronto delle prestazioni relative ai diversi protocolli

Come è noto, due sono i protocolli di livello di trasporto che sono stati storicamente impiegati nella rete globale: si tratta di UDP (User Datagram Protocol) e TCP (Transmission Control Protocol). La differenza sostanziale che intercorre tra i due è da ricondursi all'ottica con cui sono stati concepiti: se TCP sacrifica velocità nella trasmissione a vantaggio della sicurezza e dell'integrità dei dati attraverso un processo di hand-shaking, UDP è connection-less, e spedisce l'informazione senza richiesta di conferma, garantendo una trasmissione più rapida, ma meno controllata.

Nelle prove eseguite è stato pressoché sempre impiegato TCP, ma si è ritenuto opportuno sostenere un test che permettesse di confrontarne l'efficacia con quella di UDP. Sono stati quindi forzati server ed host (rispettivamente PC e smartphone) ad utilizzare l'uno o l'altro protocollo, e si è registrato l'andamento della Bandwidth nel minuto di test di trasmissione.

Si nota un importante vantaggio di TCP, che malgrado il suo mutevole andamento, vanta una bandwidth media superiore di circa 12 volte a quella di UDP, il quale mantiene invece un andamento visibilmente più stabile. Le continue variazioni di TCP sono da attribuirsi all'assiduo intervento dell'algoritmo di Congestion Avoidance, che crea tipicamente situazioni di continua oscillazione analoghe a quella osservata. Il carente risultato di UDP, invece, non ha una giustificazione così indubbia: si ipotizza si tratti di una predilezione da parte del software per TCP (al quale verrebbe quindi riservata una priorità maggiore), oppure di un'auto-interferenza di UDP che, a causa del suo caratteristico comportamento persistente, finirebbe per attenuare le sue stesse prestazioni nei vari hop.

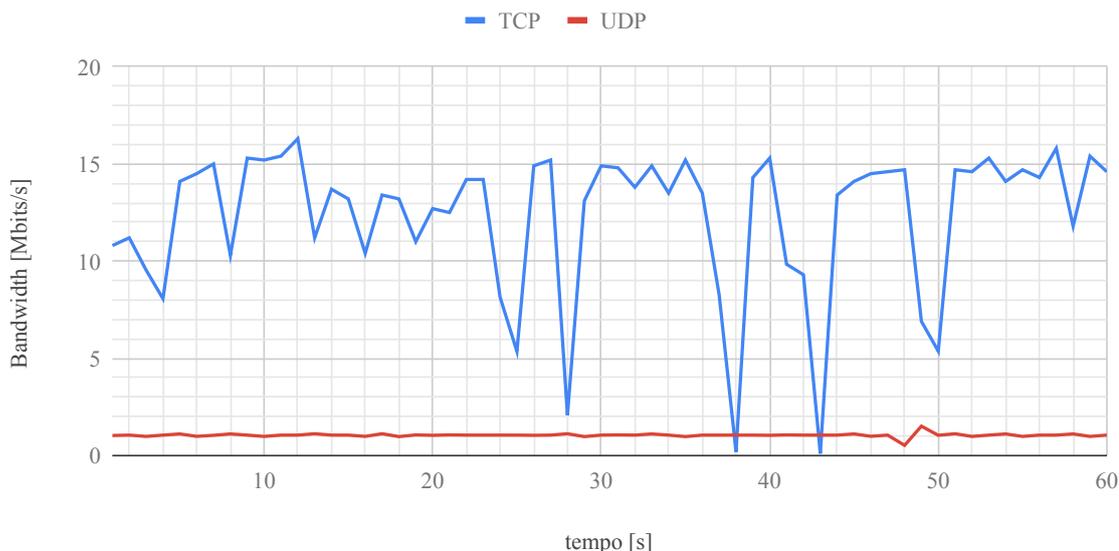


Figura 2.6: Confronto delle prestazioni relative all'utilizzo di TCP e UDP

Test 3: Node collapse e ripristino della rete

Durante il normale funzionamento della rete - soprattutto in situazioni caratterizzate da instabilità, come quelle descritte nel seguente capitolo - è possibile che uno dei dispositivi che al momento della trasmissione viene utilizzato per completare il percorso host-server smetta di funzionare. L'evento di *Node collapse* può essere causato da diversi fattori, che spaziano da problematiche legate alla fonte di alimentazione del dispositivo (banalmente, la carica delle batterie), fino a crash originati da errori software.

Lo scopo di questo test è valutare l'immediatezza con cui la rete sostituisce il nodo collassato; è chiaramente un requisito indispensabile che vi sia un dispositivo in grado di svolgere le stesse operazioni svolte da quello che arresta il suo funzionamento: il sostituto dovrà quindi trovarsi, in caso di reti wireless, in una posizione che gli permetta di contattare direttamente tutti i nodi necessari.

Client e server (nuovamente PC e smartphone) sono stati quindi connessi tra loro attraverso un percorso di rete che passasse per un nodo specifico, che è stato disabilitato in un dato istante (al secondo ventiduesimo circa); un nodo di backup, già registrato sulla rete e già in funzione, è stato quindi assegnato dalla rete al percorso host-server in sostituzione di quello disattivato. Va specificato, a riguardo, che il nodo che subentra si trova, al momento del collasso, connesso agli altri due nodi tramite il mesh-point (rete wireless riservata), ma semplicemente non costituisce un passaggio del percorso host-server: al momento del guasto non vi sono di fatto cambi di connessione, ma solo una variazione automatica del percorso.

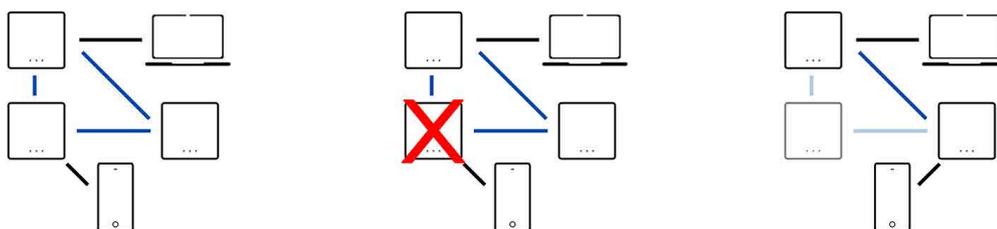


Figura 2.7: Node collapse e riconfigurazione del percorso

Il primo risultato osservato è la corretta riconfigurazione della rete: il nodo di backup viene coin-

volto non appena il ripetuto smarrimento dei pacchetti rivela l'anomalia del dispositivo disattivato, e dopo una breve fase di network recovery la comunicazione client-server è ripristinata.

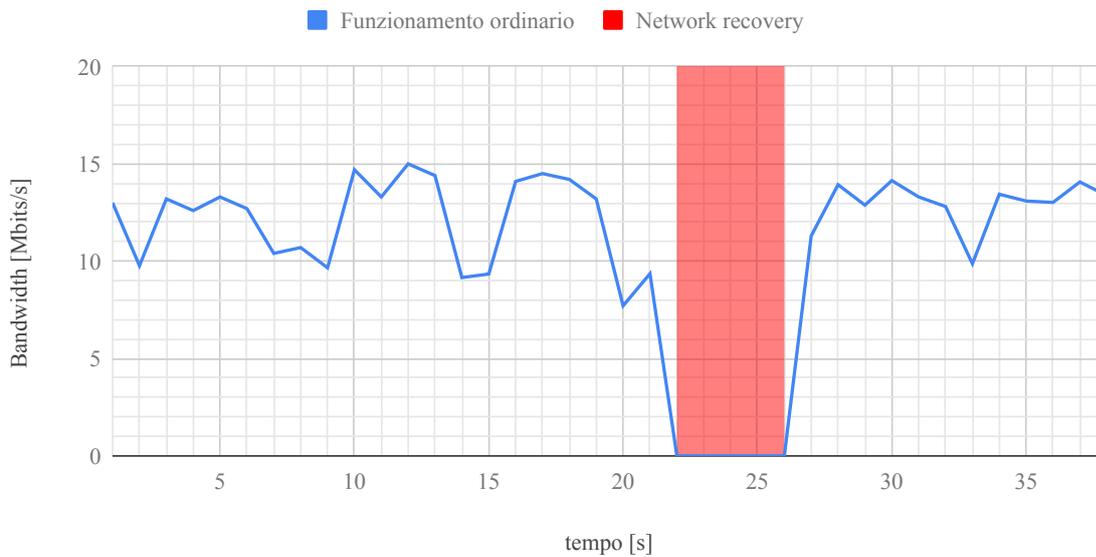


Figura 2.8: Node collapse e riconfigurazione della rete

Quantitativamente, si può osservare che il tempo necessario per il recupero della rete è di circa 5 secondi: al secondo ventisettesimo si nota infatti una misurazione di bandwidth che segnala un corretto ripristino dell'ordinario funzionamento della mesh-net.

Da un punto di vista pratico, considerata innanzi tutto l'infrequenza di eventi di questo tipo, si può concludere che il collasso non causa disservizi eccessivamente problematici: non vi sarebbero infatti ripercussioni sugli utenti in caso di ordinaria attività di navigazione in Internet, riproduzione di contenuti in streaming o qualsiasi altra trasmissione che non sia caratterizzata dall'intolleranza ai ritardi tipica di comunicazioni di tipo VoIP o simili.

Il risultato, inoltre, è tanto più soddisfacente se confrontato con le conseguenze di un'analogica interruzione del funzionamento di un nodo in una rete ordinaria.

Test 4: Confronto delle prestazioni di topologie equivalenti

Malgrado il numero limitato di nodi impiegati nei test, si è notato che si verificano, talvolta, configurazioni diverse in prove analoghe, con risultati apparentemente uguali. Con "topologie equivalenti" si intendono, infatti, disposizioni che permettono il definirsi di percorsi con gli stessi estremi, ma le cui prestazioni possono essere di fatto differenti. È chiaro che, se si vuole condurre un confronto tra le prestazioni di due topologie equivalenti, queste dovranno essere quanto meno caratterizzate dallo stesso numero di hop.

Lo scopo della prova è misurare quanto due disposizioni equivalenti possano garantire - in termini di Bandwidth - prestazioni differenti.

Per eseguire le misurazioni sono stati impiegati due smartphone (ad operare come client) ed un PC (a fungere da server), e sono state costruite due topologie differenti, che permettessero entrambe agli smartphone di contattare il PC (contemporaneamente) con lo stesso numero di hop. Nel dettaglio, la prima topologia (denominata *A*) ha visto gli smartphone connettersi entrambi ad uno nodo, il quale è stato connesso ad un secondo nodo, a sua volta connesso al PC. Il secondo setup (*B*), invece, prevedeva un dispositivo per ogni client, quindi due nodi, collegati entrambi al router connesso al PC.

Sono state svolte tre prove della durata di un minuto per ognuna delle configurazioni, ed è stato misurato il valore medio della Bandwidth durante la trasmissione. La media aritmetica della Band-

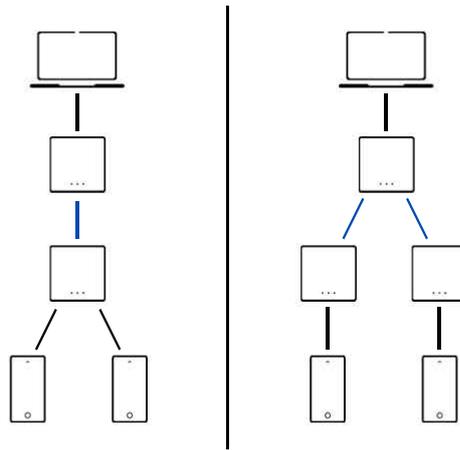


Figura 2.9: Topologie equivalenti; *A* a sinistra, *B* a destra

	<i>Topologia A</i>			<i>Topologia B</i>		
	Host1	Host2	Media	Host1	Host2	Media
Test 1	4,01	7,86	5,94	6,30	6,85	6,58
Test 2	3,01	7,86	5,44	5,50	6,70	6,10
Test 3	2,76	8,33	5,55	6,38	6,77	6,58
Media	5,64			6,42		

Tabella 2.1: Larghezza di banda media delle due topologie

width dei due dispositivi - mediata a sua volta sulle tre prove per un risultato più attendibile - ha permesso infine di confrontare numericamente la performance delle due topologie.

Dall’osservazione dei risultati si nota principalmente il vantaggio della topologia *B* sull’equivalente; questa, infatti, risulta caratterizzata da una Bandwidth mediamente superiore (del 14% circa).

Il vantaggio della seconda topologia si può probabilmente spiegare osservando il punto di congiunzione dei due distinti percorsi client-server. Se nella topologia *A* è compito del primo router “unire” i percorsi dei due host verso il server, nella topologia *B* questo avviene interamente tra nodi della mesh-net: ogni host ha quindi il suo router dedicato ed è sul meshing-point (SSID di mesh) che viene gestita la molteplicità dei percorsi.

Un confronto tra la differenza che intercorre tra queste due prove e la differenza che divide invece le prove svolte al variare degli hop permette, infine, di determinare che la scelta tra topologie equivalenti gioca un ruolo marginale nella definizione del percorso migliore: la minimizzazione del numero di hop resta il criterio precipuo di decisione.

Test 5: Connessione al limite della copertura di rete

Lo scopo di quest’ultima prova per la valutazione delle prestazioni è di osservare il comportamento della mesh-network nel caso in cui una delle connessioni wireless tra i nodi venga spinta al limite della copertura delle loro antenne. Si è chiaramente deciso - al fine di produrre uno scenario interessante da osservare - di portare al limite della copertura WiFi due nodi la cui connessione costituisse un passaggio del percorso client-server al momento della prova. A tal proposito, client e server (ancora smartphone e PC) sono stati connessi tra loro attraverso due nodi che - gradualmente schermati ed allontanati l’uno dall’altro - sono rimasti reciprocamente connessi da un canale poco prestante ed affidabile.

La prima fase dell’esperimento ha permesso di osservare la Bandwidth in questo setup precario, e di valutare quindi quanto la situazione fosse problematica per il corretto funzionamento della mesh-network. Al secondo trentesimo circa, un nodo ausiliario è stato inserito nella rete: questo - trovandosi

spazialmente disposto a metà tra i due dispositivi di cui sopra - rappresenta un'interessante opportunità per sostituire il percorso attualmente in esecuzione con uno più robusto.

Il primo risultato notato, infatti, è che la rete decide immediatamente di affidarsi al nuovo device rilevato al fine di instaurare una connessione migliore tra client e server: i due nodi inizialmente coinvolti restano di fatto connessi tra loro (perché continuano a rientrare - seppur in maniera precaria - l'uno nell'area di copertura dell'altro), ma il percorso viene aggiornato e fatto passare per il nuovo nodo, evitando così la tratta problematica.

Una successiva disattivazione del nodo appena introdotto (al secondo settantesimo circa) ha permesso inoltre di osservare come la rete - perso il dispositivo divenuto hop della connessione client-server - si presti a recuperare il setup iniziale; si nota nuovamente il breve periodo di recupero discusso nel *test 3* che serve alla rete per far fronte all'imprevisto.

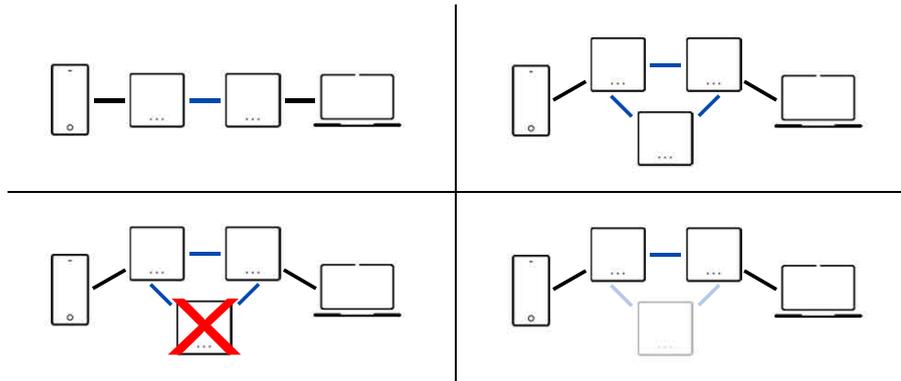


Figura 2.10: Subentro del nodo ausiliario, rimozione e recupero della rete

Da punto di vista delle prestazioni è interessante il miglioramento introdotto dal nodo ausiliario al momento del suo inserimento nella rete: la Bandwidth cresce fino a quadruplicare circa il suo valore medio, e non si verificano - nel periodo di funzionamento del terzo nodo - ritorni a zero che caratterizzano invece l'andamento della banda negli istanti che lo precedono e succedono.

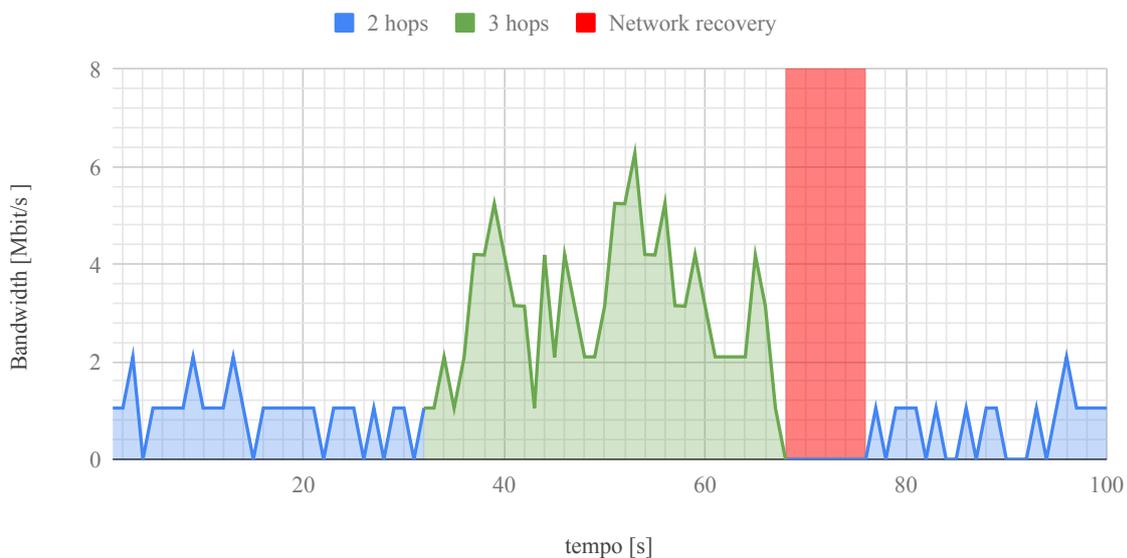


Figura 2.11: Prestazioni all'inserimento del nodo ausiliario

Questo test ha permesso inoltre di apprezzare un comportamento - da parte di Libremesh - molto interessante e per niente banale. Si è notato infatti che la scelta della rete di sfruttare il nuovo nodo

reso disponibile - inserendolo nel percorso client-server - è stata compiuta a fronte di un aumento degli hop, che secondo quanto osservato finora (e quanto accade solitamente nei protocolli di rete) andrebbe contro la logica di minimizzazione del percorso e massimizzazione delle prestazioni. Non si tratta tuttavia di un errore: Libremesh ha correttamente previsto che - data la carente performance del percorso iniziale - passare ad una via più lunga dal punto di vista degli hop, ma costruita su una rete di connessioni più forti ed affidabili, fosse la scelta migliore. Le prestazioni, infatti, sono migliorate notevolmente, e i dati raccolti confermano la correttezza di tale decisione.

Si può quindi concludere che il firmware non si limita al calcolo del percorso più breve, ma valuta i rapporti segnale/rumore dei vari canali di connessione per scartare quelli peggiori e prediligere i più prestanti.

Un'ultima considerazione riguardo ai risultati ottenuti da questa prova riguarda il tempo di network-recovery che serve alla rete per sostituire un percorso con uno nuovo. Si osserva dal grafico 1.11 che questo fenomeno si verifica al cambio del secondo 70, ma non al cambio del secondo 30. La spiegazione risiede senza dubbio nella natura delle due variazioni di percorso: se la seconda è - come nel *test 3* - dovuta ad una brusca eliminazione di un nodo in uso, la prima è invece frutto una decisione di Libremesh basata sui dati in suo possesso. Un cambio di percorso, quindi, non causa di per sé alcun disservizio se non è frutto di un guasto (o comunque di un evento imprevedibile e non ordinario).

Questa informazione permette di prevedere che - in una mesh-network più vasta con svariati nodi ed utenti - una continua riorganizzazione della rete sarebbe possibile senza incorrere in penalizzazioni.

3 Mesh network e droni

L'idea che si propone è quella di applicare la tecnologia di mesh-networking - e nel dettaglio LibreMesh nelle configurazioni studiate al *capitolo 2* - ad uno scenario in cui i nodi siano agganciati a dei droni in volo. Questa soluzione permetterebbe un'installazione rapidissima di una rete in luoghi anche poco favorevoli.

3.1 Situazioni di emergenza

Vi sono numerose situazioni in cui una zona necessita di essere coperta da un segnale wireless al fine di garantire - nel caso più semplice - una connessione Internet ai dispositivi che vi si trovano. Può trattarsi, ad esempio, di calamità naturali e situazioni di emergenza, o anche solamente di eventi o manifestazioni in cui la connessione è indispensabile e l'infrastruttura "tradizionale" non è realizzabile o compatibile con l'area interessata.

A tal proposito, va considerato che una connessione ad Internet, oggi, non rappresenta solo la possibilità di navigare il web o spedire email, ma costituisce un mezzo sempre più impiegato per la messaggistica istantanea e le comunicazioni vocali. Anche nel caso di situazioni di pericolo, infatti, una connessione alla rete globale consente di svolgere tutte le ordinarie operazioni permesse da una rete telefonica - compresa la richiesta di intervento al numero unico di emergenza - e molto altro, come la comunicazione della propria posizione esatta tramite localizzazione GPS.

Infine, si considera lo standard WiFi ampiamente diffuso e sufficientemente versatile per costituire il punto di connessione di utenti in difficoltà con il mondo delle telecomunicazioni.

3.2 Una rete di droni

La scelta di impiegare per il progetto dei droni è motivata sostanzialmente dalla versatilità che questi mezzi possono vantare. Un drone, infatti, può sorvolare qualsiasi tipo di area geografica indipendentemente dalla conformazione del suolo, e può muoversi molto rapidamente, riuscendo a coprire distanze anche importanti in tempi inferiori ad altri veicoli. La sua posizione sopraelevata, poi, ottimizza la propagazione del segnale permettendo di raggiungere anche zone coperte da ostacoli in maniera più efficiente di quanto non sarebbe possibile con un access point al livello del suolo.

Un drone di ultima generazione, inoltre, è in grado di mantenersi stabile in una posizione (sfruttando la geolocalizzazione) anche in condizioni di vento sostenuto; alcuni degli ultimi modelli riescono persino a svolgere le loro funzioni in condizioni atmosferiche avverse, come in caso di pioggia o addirittura neve. [7]

Un'altra funzionalità fondamentale che molte aziende del settore stanno sviluppando e commercializzando sui loro dispositivi (si veda, tra i più evoluti, DJI AirSense [3]) è legata alla localizzazione reciproca dei droni in volo. Si tratta di un aspetto che non migliora solo le prestazioni dei dispositivi rendendo più facile coordinare il volo di più droni in flotta, ma rende gli scenari che comprendono molti dispositivi in volo simultaneo più affidabili e, soprattutto, sicuri. Si tratta, in sostanza, di uno scambio continuo di informazioni tra i droni che si trovano a volare gli uni vicini agli altri, allo scopo di mantenerli aggiornati sulle reciproche posizioni ed ottimizzare il volo coordinato. Il primo obiettivo di un sistema del genere è, ovviamente, quello di evitare collisioni tra i velivoli.

L'idea di base, quindi, è quella di attrezzare un dato numero di droni con dei dispositivi di rete, e programmarli per sorvolare all'occorrenza l'area interessata al fine di garantire copertura di segnale al suo interno.

3.2.1 Calcolo del numero di nodi richiesti

Semplificando il problema della propagazione del segnale ad una visione bidimensionale, si può osservare che la copertura di rete si espande dall'antenna del router in maniera omnidirezionale. È quindi possibile delineare un'area circolare entro la quale - i dispositivi che tentano di connettersi alla rete - riescono a contattare direttamente l'host. Il raggio di tale area dipende da diversi fattori, tra cui i più significativi sono le caratteristiche dell'antenna, la potenza di trasmissione impostata e la quota a cui si trova il drone con l'access point, dati da incrociare con la potenza minima che si vuole garantire agli utenti. Altri elementi come le caratteristiche del mezzo di propagazione e la presenza di ostacoli influenzano di fatto il risultato, ma saranno trascurati per semplicità nella trattazione.

Un'importante considerazione - riguardo all'affiancamento di diversi dispositivi al fine di coprire una superficie complessivamente più vasta - riguarda l'area efficace del singolo router nella rete complessiva: i metri quadri totalmente coperti dalla rete di droni saranno inferiori alla somma delle aree dei loro cerchi, a causa delle sovrapposizioni che si rendono indispensabili al fine di non lasciare aree scoperte.

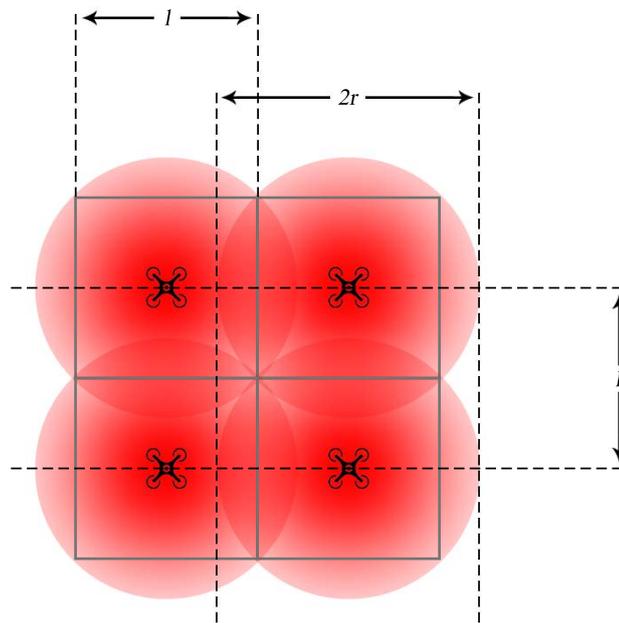


Figura 3.1: Dimensioni dell'area di copertura dei droni e distanza minima

Nel dettaglio, i droni non potranno distare l'uno dall'altro più di una data misura l , rappresentata dal lato del quadrato inscritto nel cerchio sopraccitato. Quantitativamente, la distanza massima tra essi d dovrà sottostare alla disequazione

$$d \leq r \cdot \sqrt{2} = l$$

dove r è il raggio dell'area di copertura di un singolo dispositivo.

Simulatore della disposizione dei droni

Al fine di ottimizzare questa operazione e di automatizzare i calcoli necessari per la definizione del numero di droni necessari è stato sviluppato uno script, disponibile all'indirizzo

<https://works.nicolafiorello.it/starmesh>

per l'esecuzione online.

Il software, il cui algoritmo è scritto in PHP ed eseguito da un server web, permette di simulare la disposizione dei droni con i relativi nodi allo scopo di realizzare la corretta copertura di un'area (per semplicità sempre rettangolare).

Per avviare la simulazione, è necessario fornire 4 dati di input al sistema, che li utilizzerà al fine di calcolare una corretta disposizione. Nel dettaglio, si richiede all'utente di inserire:

- Raggio dell'area sferica di copertura di un singolo drone (in metri)
- Altezza di volo dei droni
- Altezza dell'area geografica (in metri)
- Larghezza dell'area geografica (in metri).

Lo script - oltre ad una rappresentazione grafica della disposizione dei droni realizzata con javascript e CSS3 - fornisce una serie di informazioni utili circa il risultato calcolato; nel dettaglio, si tratta dei seguenti dati:

- Numero di droni necessari per la copertura
- Dimensione dell'area geografica (in metri quadri)
- Raggio dell'area sferica coperta dal singolo drone (in metri)
- Altezza di volo dei droni (in metri)
- Raggio dell'area circolare coperta al suolo (in metri)
- Dimensione dell'area al suolo coperta dal singolo drone (in metri quadri)
- Dimensione dell'area totale coperta dai droni (in metri quadri)
- Copertura ridondante realizzata dai droni (in metri quadri)
- Percentuale di area geografica correttamente coperta
- Percentuale di area geografica risultante scoperta
- Esito della simulazione (avvenuta copertura dell'intera area)
- Nome dei singoli droni (al fine di identificarli univocamente)

Considerando le aree di sovrapposizione della zona di lavoro di più droni, e tenendo conto della copertura generata dai droni posti vicini al limite che finisce per interessare zone esterne, si è calcolato che, mediamente, l'area totale sviluppata dai droni per coprire una zona geografica definita è più grande di quest'ultima di circa 2,5 volte.

Una schermata dell'interfaccia si può trovare nell'*allegato B*.

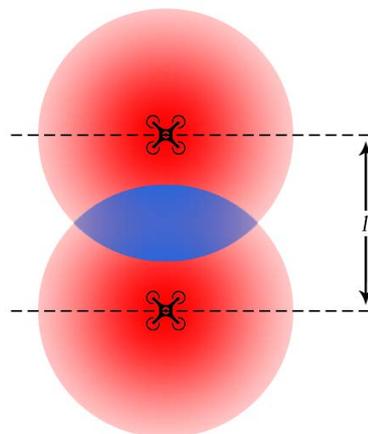


Figura 3.2: Esempio di area sovrapposta (in blu)

3.2.2 Vantaggi dell'utilizzo di un algoritmo di mesh

La strategia di trasportare i dispositivi di rete con dei droni potrebbe, in teoria, realizzarsi con qualsiasi tipo di topologia di rete, anche le più tradizionali. Bisogna però tenere conto del gran numero di problematiche che sorgono dall'operare con velivoli anziché con dispositivi di rete ordinari.

Il vantaggio più grande che deriva dalla scelta di una rete mesh piuttosto che un altro tipo di topologia è sicuramente l'auto-configurazione. LibreMesh, infatti, è in grado - come tutti i software di questo tipo - di funzionare senza necessità di configurazione o setup da parte di un operatore; i dispositivi, una volta avviati, si interconnettono tra loro creando la rete mesh, e generano i punti di accesso per gli utenti, tutto senza bisogno di istruzioni particolari.

Si tratta chiaramente di una condizione quasi necessaria al fine di operare con i droni in scenari sempre differenti: sarebbe alquanto scomodo dover configurare di volta in volta i dispositivi al fine di creare in ogni situazione una topologia efficace.

Un altro aspetto chiave è la scalabilità della rete mesh. Essa permette di essere espansa o ristretta tramite l'introduzione di nuovi nodi o la loro rimozione in maniera molto dinamica. I nuovi "partecipanti" alla rete non necessitano di nessuna configurazione, e in pochi secondi dall'avvio divengono parte integrante della mesh-net, svolgendone tutte le funzioni. Analogo è il discorso per l'eventuale rimozione dei nodi della rete: i router restanti, in tal caso, si riorganizzano autonomamente.

Sempre in relazione alla riorganizzazione della rete in caso di collasso o disattivazione di un nodo, è interessante osservare come una mesh-network si presti particolarmente all'utilizzo in uno scenario come questo anche per la precarietà dei droni come dispositivi di rete. Essi - per quanto precisi ed affidabili possano essere come velivoli - sono innegabilmente più delicati di quanto non sia un router tradizionale poggiato su una scrivania e alimentato dalla rete elettrica. Eventi come la scarica di una batteria o il malfunzionamento di un dispositivo rendono quindi la situazione di node-collapse più probabile, ed è fondamentale che la rete sappia farvi fronte intervenendo autonomamente e in tempi ridotti.

3.3 Nodi in movimento

Calcolare il corretto numero di droni necessari, dotarli di un dispositivo di mesh-networking (tra cui almeno uno con connessione ad internet) e disporli alla corretta distanza reciproca sopra all'area interessata è indubbiamente sufficiente per realizzare una copertura di rete. La versatilità di questi dispositivi, tuttavia, e in particolar modo la loro possibilità di muoversi - a differenza dei nodi delle reti tradizionali - liberamente nello spazio, rende possibili alcune funzionalità più avanzate. Quelle pensate per il progetto sono sostanzialmente 3, ed hanno lo scopo comune di accrescere la stabilità della rete e migliorarne le prestazioni.

In primo luogo, la possibilità dei droni di cambiare la loro posizione potrebbe essere sfruttata nel caso di node-collapse per la sostituzione del nodo disattivato. Questo, potrebbe venire sostituito da un eventuale drone di backup (ossia ridondante, non necessario al funzionamento della rete) o da un nodo ordinario il cui esercizio sia meno importante di quello del dispositivo caduto (dove, chiaramente, il concetto di importanza è da valutarsi in relazione alla quantità di dati che il suo ruolo gestisce e alla dimensione del danno che causerebbe la sua eventuale disattivazione). Il drone sostituito, quindi, dovrebbe portarsi nella posizione precedentemente occupata dal drone disattivato, o in una posizione alternativa che permetta di raggiungere gli stessi host e di coprire la medesima area.

Una seconda funzionalità resa possibile dalla traslazione dei droni è rappresentata dal collocamento dinamico di dispositivi ausiliari. Si tratta di droni che si trovano nella zona geografica interessata, ma che non svolgono un ruolo indispensabile per la corretta copertura. Essi, infatti, partecipano alla rete al solo scopo di "rinforzare" eventuali aree critiche o sovraffollate.

Questi droni, spostandosi, non creano quindi disservizi o discontinuità di rete, e contribuiscono - dal punto di vista quantitativo - incrementando le prestazioni medie della rete.

Essenzialmente, si tratta di individuare le sotto-aree più critiche e calcolare di conseguenza la futura posizione del drone; questa operazione può essere svolta da un software prendendo in analisi i

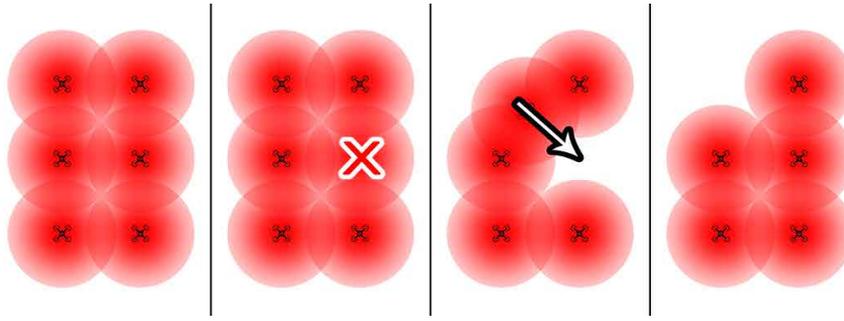


Figura 3.3: Sostituzione di un drone disattivato con uno il cui ruolo è di importanza minore

dati forniti dalla rete riguardo le prestazioni garantite agli utenti e la quantità di dati regolarmente interscambiati tra i diversi nodi.

Il dispositivo, una volta collocato nel punto di interesse, viene automaticamente incluso nella topologia di rete di quella zona, e sia gli utenti che gli altri nodi possono immediatamente sfruttarne la presenza. Dal punto di vista pratico, il nuovo drone può infatti svolgere due tipi di operazioni (anche in contemporanea): rinforzare la connessione tra nodi della rete - aggiungendo un hop allo scopo di rendere più stabile e prestante un percorso - e divenire il nuovo punto di accesso per alcuni utenti, in maniera da “alleggerire” il carico di un altro access point.

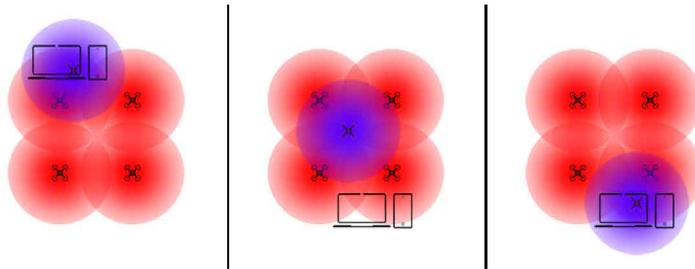


Figura 3.4: Movimento di un drone ausiliario (in blu) per rinforzare le zone più affollate

Infine, il movimento dei nodi può essere sfruttato per un miglioramento della distribuzione della connessione. Si ipotizza, infatti, che nella mesh-network uno o più droni siano dotati di accesso ad Internet. Questi, logicamente, costituiranno un punto di passaggio indispensabile per l’informazione: qualsiasi pacchetto provenga o sia direzionato verso la rete globale dovrà infatti passarvi.

L’idea, quindi, è di spostare i nodi dotati di accesso ad internet in posizioni ottimali, in maniera da ridurre complessivamente la lunghezza media dei percorsi per giungervi. La valutazione della posizione ottimale dovrà tenere conto non solo della disposizione di nodi e host, ma anche della quantità di dati che questi stanno mediamente gestendo: un incremento delle prestazioni medie dell’intera rete può avvenire, infatti, solo attribuendo ad ogni sotto-zona un’importanza ponderata sulla specifica mole di dati.

Va considerato anche che i droni con accesso ad Internet costituiscono parte integrante della mesh-net; essi svolgono anche l’ordinaria attività di inoltro pacchetti e partecipano alla topologia allo stesso modo degli altri dispositivi. Questo significa che nessun drone, sebbene corredato di accesso alla rete globale, può lasciare libera la propria posizione (a meno che non si tratti di un drone ausiliario come sopra descritto); questa funzionalità è quindi possibile solamente facendo corrispondere - ad ogni spostamento di un drone - un relativo spostamento di un altro dispositivo. In tal caso la traslazione del nodo con accesso Internet diviene di fatto uno scambio di posizione con un altro drone.

È importante notare, infine, che - per quanto rapidi possano essere i droni nello scambio di posizione - l’operazione darà innegabilmente luogo a un periodo di disservizio nelle due zone interessate.

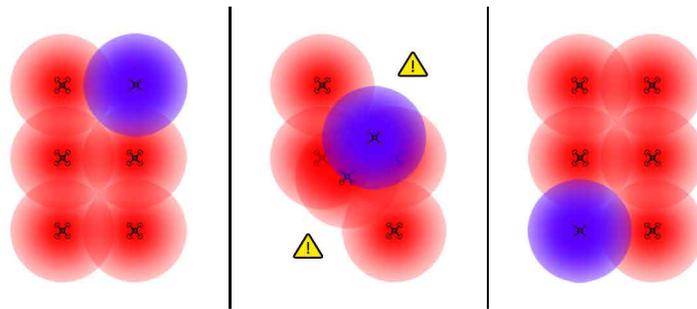


Figura 3.5: Movimento di un drone con accesso ad Internet (in blu) per ottimizzare la topologia

4 Conclusioni e Progettazione

Giunti in conclusione, si intende valutare i risultati ottenuti dalle prove finora svolte e proporre - compatibilmente con questi - una soluzione progettuale al problema analizzato.

4.1 Valutazione dei dati raccolti e della fattibilità del progetto

In primo luogo, si analizzano i dati e le osservazioni relativi agli esperimenti del *capitolo 2*, al fine di valutare quanto - il firmware di mesh-networking e i dispositivi fisici scelti per le prove - siano qualitativamente validi, e quanto siano inoltre compatibili con il progetto di sviluppo di una rete mesh con i droni.

4.1.1 LibreMesh

Partendo dal software, LibreMesh si è rivelato fin dall'installazione semplice ed efficace. La sostituzione del firmware dei dispositivi, infatti, non ha dato luogo a problematiche di incompatibilità, ed ha richiesto pochi semplici passaggi. Appena avviati - i dispositivi con il nuovo firmware - hanno generato autonomamente una mesh-network, che ha richiesto una riconfigurazione al solo scopo di adattarne il comportamento ai nostri requisiti; per un utilizzo più ordinario che non prevedesse la necessità di svolgere test ed operare con configurazioni particolari, questo passaggio - poco più complesso dell'installazione - non si sarebbe neanche reso necessario.

Il pannello di controllo e la dashboard di LibreMesh hanno dimostrato praticità ed efficienza, permettendo di impostare numerosi parametri e di personalizzare quindi fortemente la condotta della rete. I dati forniti riguardo alla situazione dei dispositivi, inoltre, sono completi e dettagliati, e permettono di monitorarla efficacemente. Riguardo all'interfaccia, infine, si nota solo una carenza di documentazione che ne faciliti l'utilizzo.

Dal punto di vista dell'efficienza delle topologie realizzate e delle prestazioni, i risultati sono più che soddisfacenti. LibreMesh dimostra di saper prendere decisioni sempre intelligenti, frutto dell'interpolazione di numerosi dati. Le diverse situazioni in cui il software è stato testato hanno provato l'efficacia delle topologie scelte, e la rapidità con cui LibreMesh ha fatto fronte ai cambiamenti della rete delinea un firmware efficiente anche in situazioni reali e particolarmente mutevoli. Le prestazioni - sotto un punto di vista più quantitativo - sono buone: la Bandwidth mediamente garantita agli utenti è sufficiente per un soddisfacente accesso ad Internet, e non è mai inferiore di quanto si potrebbe ottenere con una topologia tradizionale nelle stesse condizioni.

Infine, si attesta che durante l'intero svolgimento delle prove LibreMesh ha mantenuto un funzionamento stabile, senza che si verificasse alcun tipo di interruzione o errore di natura software. I dati raccolti le osservazioni svolte permettono di concludere che si tratta di una soluzione robusta ed efficiente.

4.1.2 GL.iNet AR300M

L'hardware impiegato è stato - in fase di prima configurazione - altrettanto intuitivo e semplice da utilizzare. L'interfaccia del firmware di default permette innanzitutto di condurre una breve verifica del funzionamento del dispositivo, e consente il caricamento del file del firmware alternativo per l'update direttamente dalla dashboard visualizzata sul browser.

I test svolti utilizzando questo tipo di dispositivo sono stati molti e spesso diversi tra loro; il router di GL.iNet si è rivelato praticamente sempre adatto alla situazione, riuscendo a gestire svariate connessioni WiFi anche in contemporanea ad altre cablate. Le prestazioni - anche se confrontate con quelle ottenute da router più costosi (ed ingombranti) - sono da considerarsi ottime. La vasta gamma di prodotti realizzati dalla medesima azienda prevede inoltre versioni di questo router con antenne

esterne: si tiene in considerazione questa opzione al fine di garantire una diffusione del segnale ancora migliore.

Si sottolinea che il limitato assortimento di interfacce del dispositivo (una sola porta ethernet ad utilizzo WAN ed una porta USB) è risultato più che sufficiente; la connessione ad un altro router (o modem) per l'accesso ad Internet è l'unico caso in cui - in applicazioni di mesh-networking - si ritiene opportuno utilizzare connessioni cablate, tutto il resto può (e deve) avvenire tramite connessioni wireless.

Un'ultima considerazione va fatta riguardo alle caratteristiche fisiche del dispositivo: esso è molto compatto e soprattutto leggero, e non ha mai mostrato alcun problema di surriscaldamento nonostante le ridotte dimensioni. Dall'apertura di uno di questi dispositivi si può oltretutto osservare che - in caso vi fosse necessità di alleggerirlo e snellirlo - la rimozione del case esterno risulterebbe semplice e molto efficace a tale scopo.

Come concluso per il software, si può dire dell'hardware che si è dimostrato una soluzione efficace, prestante e sicura.

4.1.3 Esito complessivo delle prove svolte e compatibilità con l'impiego dei droni

Come detto, sia LibreMesh che i router GL.iNet hanno dimostrato di essere ottime soluzioni per la qualità dei risultati ottenuti e la robustezza dimostrata; lo stesso si può dire del loro utilizzo combinato: si è infatti verificata con successo la compatibilità del firmware con il dispositivo selezionato, e le soddisfacenti prestazioni ottenute confermano la correttezza della scelta effettuata.

Complessivamente, quindi, si può affermare che una rete di mesh-networking realizzata con dispositivi GL.iNet AR300M con firmware LibreMesh è una soluzione efficace e prestante.

È altresì importante, però, che una mesh-network di questo tipo sia a sua volta compatibile con lo scenario di rete sospesa da droni descritto al *capitolo 2*. Si può notare, a riguardo, che LibreMesh è risultato senza dubbio sufficientemente veloce e versatile per un utilizzo simile, e il vasto numero di topologie differenti che ha mostrato essere in grado di realizzare potrebbe soddisfare la mutabilità della disposizione dei droni. Allo stesso modo, i router si prestano particolarmente per tale scopo: le dimensioni ridotte e il peso irrisorio rendono i dispositivi perfetti per il trasporto da parte di un drone, e il basso assorbimento di corrente facilita sicuramente l'alimentazione del dispositivo tramite batterie anche per tempi prolungati. Inoltre, le prestazioni mostrate e le distanze coperte dall'antenna WiFi risultano sufficienti per l'impiego del dispositivo in un progetto di questo tipo.

4.2 Soluzione proposta

Si propone - sulla base di quanto studiato e analizzato nel *capitolo 2* e in relazione a quanto discusso nel *capitolo 3* - una soluzione progettuale di mesh-net con droni. L'intento non è quello di realizzare un progetto dettagliato, bensì di fornire un'idea più pratica di come il setup tanto discusso potrebbe essere realizzato concretamente.

In questa fase, si ipotizza una situazione (e una relativa area geografica) caratterizzata dai seguenti dati:

- Area di forma rettangolare
- Altezza: 230m
- Larghezza: 350m
- Raggio area sferica di copertura singolo drone: 100m
- Quota di volo: 45m

dove la dimensione dell'area di copertura del drone è un risultato ottenuto osservando la qualità del segnale WiFi al progressivo allontanamento dal router durante le prove. Una qualsiasi applicazione con dimensioni differenti può essere ottenuta scalando questa soluzione.

Il primo step nella progettazione del sistema è quello di definire quanti droni sono necessari per la copertura dell'area specificata. Questa operazione si può svolgere in maniera automatica con lo script descritto nella *sezione 3.2.1*. L'esito della simulazione è riportato nella *tabella 4.1*.

Numero di droni	6
Area geografica	80500 mq
Raggio copertura sferica drone	90 m
Quota di volo droni	45m
Raggio area circolare drone	90m
Area drone	25055 mq
Area totale droni	150326 mq
Copertura ridondante	69826 mq
Percentuale coperta	100%
Percentuale scoperta	0%
Copertura	OK

Tabella 4.1: Esito della simulazione effettuata con lo script per il calcolo del numero di droni

Si considera, per il progetto, la qualità della connessione Internet come informazione marginale; lo scopo principale, infatti, è di realizzare una rete efficace a livello locale, che potrà servire agli utenti un accesso alla rete globale più o meno prestante in base alla tecnologia scelta e alla banda totale fornita. Le alternative sono sostanzialmente un router USB con scheda SIM (il formato “chiavetta” è particolarmente indicato per le sue dimensioni contenute) o l'accesso tramite partecipazione dei nodi ad una rete WiFi ausiliaria che fornisca connessione ad Internet.

4.2.1 Scelta dei droni

Se l'hardware e il software di rete sono stati ampiamente discussi e valutati, poco si è detto riguardo ai droni da impiegare per il progetto. Le alternative sul mercato sono innumerevoli, e permettono di spaziare all'interno di un grande range di prezzi e prestazioni.

Il drone ideale per l'applicazione che si intende realizzare si distingue per le seguenti caratteristiche:

- dimensioni abbastanza ridotte
- buona capacità di volo ed efficacia nel mantenimento della posizione
- batterie prestanti e durature
- veloci tempi di ricarica
- predisposizione al volo in condizioni atmosferiche avverse
- possibilità di pilotaggio automatico tramite comunicazione delle sole coordinate GPS in cui si vuole esso si collochi
- controllo della posizione degli altri droni per incrementare la sicurezza del volo in flotta.

Si procede individuando, come dispositivo per il trasporto dei nodi, il drone “m200” di DJI, leader mondiale nella produzione di velivoli radiocomandati. Si noti che il dispositivo è attualmente un top di gamma, che rappresenta un'eccezione per qualità caratteristiche; in futuro ci si aspetta che sempre più modelli (anche di aziende differenti) raggiungeranno standard comparabili a questo dispositivo, permettendo l'acquisto di apparecchi simili a prezzi più accessibili.

Tra le caratteristiche tecniche del drone - riportate integralmente nell'*allegato A, punto 3* - spiccano alcuni aspetti particolarmente interessanti:

- autonomia di 38 minuti
- International Protection 43
- peso inferiore ai 5kg
- algoritmo di aggiramento degli ostacoli
- resistenza a pioggia e vento sostenuto.

Per collocare i router a bordo dei droni, si prevede l'utilizzo di una batteria ausiliaria destinata all'alimentazione del solo dispositivo di rete; in alternativa, un convertitore di tensione DC-DC permetterebbe di adattare la batteria del drone a tale funzione, abbassando la tensione da 22,8V ai 5V richiesti. Quest'ultima soluzione faciliterebbe inoltre il processo di carica, consentendo di evitare una doppia connessione per ricaricare due distinte batterie.

Si ritiene che la posizione ottimale del router a bordo del velivolo sia sotto al corpo principale, in corrispondenza della videocamera integrata; tale scelta ottimizza le prestazioni del volo (che nonostante il peso esiguo del dispositivo di rete potrebbe risentire del trasporto di un oggetto) e favorisce la propagazione del segnale verso l'area sottostante.



Figura 4.1: Drone DJI m200 con router GL.iNet AR300M (immagine originale: dji.com [8])

4.2.2 Coordinazione dei dispositivi e processo di ricarica

Due aspetti fondamentali restano da definire per concludere una progettazione essenziale: si tratta della strategia di coordinazione dei droni - ossia il modo in cui si intende pilotarli e gestirli - e il processo di ricarica reso, dalle batterie, ripetutamente necessario al fine di mantenere la flotta in volo.

Per quanto riguarda la coordinazione, si considera sufficiente collocare i droni nelle corrette posizioni che garantiscano un'efficace copertura dell'area geografica interessata. A tale scopo, un sistema di pilotaggio autonomo - come quelli forniti da diverse case produttrici di droni industriali - permette di ottenere una traslazione del drone e un mantenimento della posizione previa comunicazione delle coordinate GPS richieste. Un sistema centrale (costituito semplicemente da un PC e un trasmettitore compatibile per il pilotaggio dei droni) potrebbe coordinarne il posizionamento, decidendo a quale macchina assegnare ogni ruolo (e relativa posizione geografica). Un sistema di questo tipo andrebbe apparentemente contro il principio di decentralizzazione del mesh-networking, ma va tenuto in considerazione che il posizionamento dei nodi è - in un caso basilare - un'operazione semplice e meccanica. Qualora si decidesse invece di implementare alcune delle funzionalità avanzate discusse nel *paragrafo 3.3*, un sistema di controllo del pilotaggio distribuito potrebbe essere pensato e realizzato per i droni.

In merito alle batterie, una valida strategia è necessaria al fine di garantire un corretto funzionamento della rete. Il primo problema a riguardo è rappresentato dalla necessità di continuità: non si può infatti pensare di realizzare un sistema con un'autonomia limitata, o che dia luogo a tempi di disservizio a causa delle operazioni di sostituzione delle batterie. L'idea, quindi, è quella di predisporre più batterie per ogni drone, in un numero sufficiente da permettere un processo di ricarica e utilizzo

“a rotazione” che non preveda tempi morti. La strategia ipotizzata per l’operazione è riassunta nei seguenti passaggi:

- il drone A, in prossimità di scarica completa, segnala la propria situazione al sistema di pilotaggio remoto
- il drone B, dotato di batteria completamente carica, si alza in volo per recarsi nella posizione del drone A al fine di non lasciarla mai scoperta
- il drone A si reca presso l’area predisposta alla sostituzione batterie, dove un operatore - o magari in futuro un sistema automatico - rimuove la batteria scarica per inserirne un’altra
- il drone A attende la prossima richiesta di sostituzione per portarsi nuovamente in posizione.

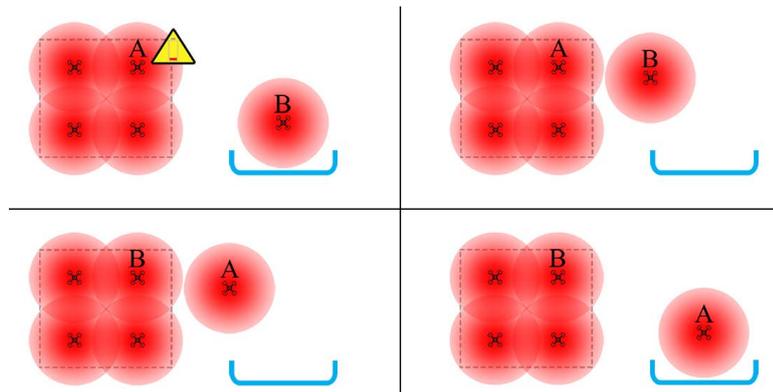


Figura 4.2: Processo di sostituzione del drone scarico per ricarica della batteria

In questo modo, un solo drone in più rispetto al numero sufficiente a coprire l’area è necessario, e il processo di rotazione permette a tutti i droni di svolgere, mediamente, la stessa quantità di lavoro.

Una considerazione va fatta - sia in relazione alla gestione del pilotaggio, sia alle operazioni di cambio batterie - riguardo all’accesso a Internet. I nodi dotati di tale funzione, infatti, vanno considerati indispensabili per la mesh-network, ed alcune regole fondamentali vanno rispettate al fine di non creare disconnessioni dalla rete globale o diminuzioni delle prestazioni. Un nodo con accesso ad Internet, quindi, va sempre sostituito con uno che sia dotato della stessa funzionalità, e il suo subentro nella rete va fatto antecedere la disconnessione del primo router. Importante è anche la posizione: se i nodi ordinari possono essere scambiati liberamente, lo stesso non si può dire di quelli con accesso ad Internet, il cui ruolo rende problematici gli spostamenti.

4.3 Valutazioni finali

In conclusione, si può affermare che il progetto è di fatto realizzabile, e che le tecnologie individuate (hardware, software e velivoli) sono indicate per tale scopo e giudicate tra loro compatibili. Se la parte prettamente inerente la rete mesh è stata affrontata sufficientemente nel dettaglio, la coordinazione dei droni e quanto discusso al punto precedente meritano senza dubbio ulteriori approfondimenti al fine di realizzare una progettazione più completa e dettagliata.

4.3.1 Prestazioni attese

Malgrado il livello di abbozzata progettazione seguito nell’ultima sezione, si intende prevedere quali potrebbero ragionevolmente essere le prestazioni garantite dal sistema. Come detto, si considera un caso d’esempio con dimensioni e caratteristiche specifiche, da scalarsi per l’adattamento a situazioni differenti:

- Area geografica: 80500 mq
- Numero totale di droni necessari: 7

- Area totale coperta dal segnale dei droni: 150326 mq
- Esito della copertura: Efficace (area droni \geq area da coprire)
- Durata massima del funzionamento della rete: Illimitato (grazie al sistema di sostituzione delle batterie proposto in questo capitolo).

Dal punto di vista della Bandwidth, è interessante osservare come la banda media fornita ad utenti uniformemente distribuiti nell'area geografica sia influenzata dal posizionamento del nodo con accesso ad Internet. Ipotizzando infatti che un solo router porti alla mesh-net la connessione alla rete globale, il problema del suo posizionamento nella maglia di droni si risolve massimizzando la Bandwidth media calcolata sulla base della funzione sperimentale derivata dal *test 1* al *punto 2.3.3*.

Anche questo calcolo è svolto - per fini di semplicità e automatizzazione - dal simulatore di disposizione dei droni: vengono considerati tutti i possibili router come candidati al ruolo di dispositivo con accesso diretto ad Internet, e calcolate di conseguenza le diverse Bandwidth medie, con decisione automatica per la soluzione più efficiente.

Nel caso specifico proposto, la soluzione ideale è il posizionamento della connessione nelle due posizioni centrali, denominate dallo script *Drn-2* e *Drn-5*, che fornirebbe alla rete una Banda media per raggiungere il nodo con accesso ad internet pari a 26,39Mbit/s.

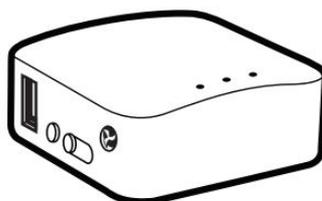
Bibliografia

- [1] B.a.t.m.a.n - wikipedia. <https://it.wikipedia.org/wiki/B.A.T.M.A.N>.
- [2] The best wi-fi mesh network systems for 2019 - pcmag.com. <https://www.pcmag.com/roundup/350795/the-best-wi-fi-mesh-network-systems>.
- [3] Fly safe: Dji airesense - dji.com. <https://www.dji.com/it/flysafe/airesense>.
- [4] Home page - openwrt. <https://openwrt.org/>.
- [5] Home page - the libremesh project. <https://www.libremesh.org/index.html>.
- [6] How it works - the libremesh project. <https://www.libremesh.org/howitworks.html>.
- [7] M200, il drone di dji per voli estremi sotto pioggia e neve - veb.it. <https://www.veb.it/m200-il-drone-di-dji-per-voli-estremi-sotto-pioggia-e-neve-49194>.
- [8] Matrice 200 series - dji.com. <https://www.dji.com/it/matrice-200-series>.
- [9] Mesh networking - wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Mesh_networking.
- [10] Open mesh - sito ufficiale di b.a.t.m.a.n. <https://www.open-mesh.org>.
- [11] Openwrt - wikipedia. <https://it.wikipedia.org/wiki/OpenWrt>.
- [12] Topologia di rete - wikipedia. https://it.wikipedia.org/wiki/Topologia_di_rete.
- [13] Andrew S. Tanenbaum. *Computer Networks*. Pearson India, 2013.
- [14] Kurose James F.; Ross Keith W. *Reti di Calcolatori e Internet - Un approccio top-down*. Pearson, 2013.

Allegato A Schede tecniche

A.1 Gl.inet Ar300m

Device name	GL.iNet GL-AR300M - Lite Mini Router
CPU	Atheros 9531, 650MHz
Memory	DDR2 128MB
Storage	Nor Flash 16MB
Frequency	2.4GHz
Transmission rate	300Mbps
Max Tx Power	20dBm
Protocol	802.11 b/g/n
WAN	10 / 100 Mbps
Power Voltage	5V
Power Input	1A
Power Consumption	< 2W
Dimension	85mm x 85mm x 25mm
Weight	35g
GPIO Count	1
Working Temperature	0 - 45°C



Dati e immagini dal manuale utente e dal sito ufficiale: www.gl-inet.com

A.2 Dispositivi impiegati nei test come host e server

Smartphone 1

Device name	Xiaomi Mi 8 Lite
CPU	4x 2.2 GHz Kryo 260
Architecture	64bit
RAM	4GB
WiFi	802.11 a/b/g/n/ac
WiFi direct	YES
Operating System	Android

Smartphone 2

Device name	Samsung Galaxy J5
CPU	1.2 GHz Quad Core
Architecture	64bit
RAM	1,5GB
WiFi	802.11b/g/n
WiFi direct	YES
Operating System	Android

Laptop PC

Device name	Acer Aspire S3
CPU	Intel core i5
Architecture	64bit
RAM	4GB
WiFi	802.11ac
WiFi direct	YES
Operating System	Windows

Dati dai siti ufficiali: www.mi.com - www.samsung.com - www.acer.com

A.3 DJI m200

Aircraft

Device name	DJI Matrice Series - M200
Dimensions (unfolded)	887mm × 880mm × 378mm)
Diagonal Wheelbase	643 mm
Number of Batteries	2
Weight	Approx. 4.53kg
Max Takeoff Weight	6.14KG
Vertical Hovering Accuracy	±0.1m
Horizontal Hovering Accuracy	±0.3m)
Max Angular Velocity	Pitch: 300°/s; Yaw: 150°/s
Max Ascent Speed	5m/s
Max Descent Speed	3m/s
Max Flight Time	38min
Motor Model	DJI 3515
Propeller Model	1760S
Operating Temperature	-20° - 45°C
IP Rating	IP43

Battery

Model	TB55
Capacity	7660 mAh
Voltage	22.8V
Battery Type	LiPo 6S
Energy	176.93Wh
Net Weight	Approx. 885g
Operating Temperature	-4° to 113° F (-20° to 45° C)

Dati dal sito ufficiale: www.dji.com

Allegato B Interfaccia del simulatore

B.1 Input dei dati

Dei cursori permettono di selezionare le dimensioni dell'area sferica di copertura dei droni, la loro quota di volo, e altezza e larghezza dell'area geografica da coprire. Un tasto permette all'utente di avviare la simulazione.

 UNIVERSITÀ DI TRENTO

StarMESH project

Nicola Fiorello 2019

Raggio copertura sferica drone:
100 m

50m 200m



Quota di volo:
45 m

0m 80m



Dimensioni dell'area geografica:

50m 500m

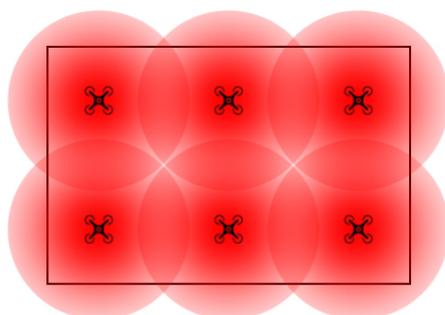
50m 500m

Webbed by [nicolafirello.it](#) - hosted by [delnHost](#)

B.2 Dati in output e rappresentazione grafica

La rappresentazione grafica mostra i droni disposti sopra all'area rettangolare. Una tabella riporta i risultati dei calcoli e l'esito della verifica di copertura. Facendo "click" su un drone è possibile visualizzare, nella penultima riga della tabella, il nome che gli è stato assegnato. Un tasto posto infine all'ultima riga permette di effettuare una nuova simulazione variando i dati di input.

L'esito dei calcoli della Bandwidth media è riportato in una tabella in fondo alla pagina, dove per ogni drone è mostrato il valore medio di Banda che fornirebbe alla rete se ricoprisse il ruolo di nodo con accesso ad internet. Le soluzioni migliori sono evidenziate automaticamente.



Informazioni simulazione	
Numero droni	6
Area geografica	80500 mq
Raggio copertura sferica drone	100 m
Quota di volo droni	45 m
Raggio area circolare drone	90 m
Area drone	25055 mq
Area totale droni	150326 mq
Copertura ridondante	69826 mq
Percentuale coperta	100%
Percentuale scoperta	0%
Copertura	OK
Drone name	Click one
Nuova Simulazione	

Calcolo della Bandwidth media in base al drone con accesso ad Internet	
Drone di riferimento	Banda media agli utenti
Drn-1	24,31
Drn-2	26,39
Drn-3	24,31
Drn-4	24,31
Drn-5	26,39
Drn-6	24,31