



**Università di Pisa**

---

DIPARTIMENTO DI INFORMATICA  
Corso di Laurea Triennale in Informatica

TESI DI LAUREA TRIENNALE

## **Rilevazione di disservizi nella connettività di rete**

Candidato:  
**Daniel Casenove**

Relatore:  
**Luca Deri**

---

**Anno Accademico 2018/2019**



## Sommario



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Obiettivo . . . . .	3
1.2	Contributo originale . . . . .	3
1.3	Struttura della tesi . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Stato dell'arte</b>	<b>5</b>
2.1	Motivazione . . . . .	5
2.2	IEEE 802.11 Distributed Coordination Function . . . . .	6
2.3	Analisi della performance IEEE 802.11 DCF . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Soluzione proposta</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Validazione</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Conclusione</b>	<b>17</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>19</b>



---

# Capitolo 1

## Introduzione

Nell'ultimo decennio, con la crescita in popolarità degli smartphone, si é assistito ad un aumento e ad una diversificazione di dispositivi connessi in rete senza precedenti. Una tipica rete non é più composta semplicemente da qualche PC e server, in caso aziendale, ma anche da telefoni, tablet, smart TV, weareables ed elettrodomestici. Inoltre non é poi così raro per un utente possedere più di uno di questi device, aumentando drasticamente il numero di apparecchiature collegate in una singola rete. Secondo previsioni Cisco, il numero di dispositivi connessi a reti IP sarà pari al triplo del numero della popolazione globale entro il 2022[1]. Lo stesso studio riporta un forte cambiamento nel tipo di dispositivi connessi, con dispositivi mobili quali smartphone e tablet, sistemi embedded in TV ed elettrodomestici in costante crescita a discapito dei più tradizionali PC. Viene stimato che, entro il prossimo triennio, il 51% dei dispositivi e connessioni saranno di tipo machine-to-machine, ovvero senza interazione umana, e principalmente costituiti da device IoT. Data la natura dei dispositivi in crescita nelle reti, si osserva anche un cambiamento nel mezzo trasmissivo in favore della connessione senza fili a discapito della connessione cablata.

In contemporanea all'aumento del numero di dispositivi connessi ad Internet si é assistito anche ad un cambio nel paradigma di erogazione di servizi in favore del cloud computing e cloud storage. Ad esempio, servizi come Google Drive e Dropbox permettono di salvare i propri file in remoto ed accederne tramite connessione ad Internet, diminuendo l'uso di memoria nel dispositivo personale a discapito della necessità di connessione performante. Allo stesso modo, servizi di streaming come Netflix e Spotify forniscono cataloghi multimediali pressochè infiniti.

In un mondo sempre più connesso digitalmente diventa quindi fondamentale, per una rete locale, essere in grado di sostenere un traffico di dati elevato ed un numero di dispositivi in costante crescita in modo da poter fornire una

buona connettività per una corretta esperienza d'uso.

Sebbene gran parte del traffico verso questi tipi di servizi venga generato tramite connessioni mobili, quali 3G e 4G, queste non saranno oggetto di discussione. Il motivo principale risiede nel fatto che la qualità della connessione, in questo caso, dipende quasi interamente dalla bontà del segnale ricevuto dalle antenne dell'operatore. Incidono anche fattori meteorologici [2], il posizionamento delle apparecchiature sul territorio e la loro rispettiva capillarità. Fattori secondari di qualità del segnale possono essere invece ricondotti alle antenne del dispositivo mobile che usufruisce della connessione ma, anche in questo caso, esse vengono scelte dal fabbricante e quindi sono fuori dal controllo dell'utente. I temi affrontati da questo elaborato riguardano la qualità del servizio offerto da reti locali e dei dispositivi collegati ad esse. Gli sviluppi nel mondo tecnologico precedentemente citati hanno dato vita a diverse sfide per fabbricanti di apparecchiature di rete e personale specializzato del settore. Ad esempio, l'introduzione della connessione senza fili, richiede particolare attenzione per via della natura delle onde radio. Gli access point devono essere posizionati in modo strategico all'interno del locale dove si vuole instaurare la connessione, tenendo conto di problemi come l'attenuazione del segnale attraverso mura [3] e interferenze causate con altri dispositivi attivi sulla stesse frequenze. Una soluzione al primo problema si trova nel posizionare apparecchiature come repeater per estendere il campo di copertura mentre l'utilizzo di software professionale può essere necessario per la scelta corretta di un canale libero da interferenze. L'aumento vertiginoso del numero dei dispositivi connessi alle reti aumenta anche l'importanza di riuscire a capirne il tipo ed eventuali servizi offerti prima di iniziare una fase di monitoraggio riguardante il traffico di rete. Ci sono diverse tecniche in letteratura per questo tipo di analisi, sia di tipo attivo che passivo, che verranno presentate ed approfondite nel prossimo capitolo. Questo tipo di studio, come vedremo, è fondamentale per fornire una corretta analisi dei disservizi di una rete locale poichè è necessario, prima di tutto, avere un'idea della quantità e del tipo dei dispositivi che si andranno a monitorare. In un secondo momento verranno poi presentati alcuni strumenti per il monitoraggio effettivo della rete che, anche in questo caso, possono essere divisi in passivo o attivo. Purtroppo le principali limitazioni di questo tipo di strumenti includono l'implementazione in sole apparecchiature professionali e la difficoltà d'uso per personale non specializzato. Lo studio si è quindi incentrato sulla possibilità di implementare tecniche per la rilevazione di disservizi in reti locali tenendo in mente la facilità d'uso e la possibilità di implementazione su apparecchiature a basso costo per reti di piccole dimensioni.



## **1.1 Obiettivo**

Lo scopo di questo elaborato é quello di fornire uno strumento in grado di rilevare eventuali disservizi nella connettività di piccole reti locali dove le apparecchiature presenti non sono dotate di funzioni di monitoraggio. La crescita non omogenea di questo tipo di reti, il numero spesso imprevedibile di dispositivi connessi e la moltitudine di servizi che questi offrono, rendono, però, necessaria anche una prima analisi di rete finalizzata a determinare la quantità ed il tipo di device connessi. Successivamente, con metriche che verranno introdotte nei prossimi capitoli, si procede al monitoraggio di tutti i dispositivi appartenenti alla rete. In particolare, in caso di malfunzionamenti, si vuole identificare se questi siano dovuti a problematiche interne alla propria Local Area Network (LAN) o alla Wide Area Network (WAN) del provider Internet. Per disservizi interni alla LAN, successivamente alla localizzazione del problema, si procede proponendo soluzioni all'utente e identificando tutti i dispositivi il cui servizio é degradato.

## **1.2 Contributo originale**

Durante lo studio iniziale si é notata la mancanza di strumenti open-source in grado di fornire una visione topologica dei dispositivi Wi-Fi. Si è quindi sviluppata una libreria in grado di monitorare, tramite ispezione di frame 802.11, il traffico Wi-Fi delle reti circostanti per poi fornirne dati relativi alla potenza del segnale dei dispositivi connessi ed una topologia dettagliata. Questo passaggio permette il discovery di dispositivi Wi-Fi nella nostra rete locale ed un monitoraggio nel tempo della bontà del segnale. I dettagli implementativi e la relativa validazione sono lasciati ai corrispettivi capitoli dell'elaborato.

## 1.3 Struttura della tesi

La tesi é divisa in cinque capitoli di cui si elenca un breve sommario:

- Capitolo 1: **Introduzione**, vengono presentati il problema analizzato e le motivazioni che hanno portato alla stesura di questa tesi.
- Capitolo 2: **Stato dell'arte**, vengono descritte le attuali tecnologie utilizzate per la rilevazione di disservizi nella connettività di rete.
- Capitolo 3: **Soluzione proposta**, vengono espone la soluzione proposta e la libreria sviluppata.
- Capitolo 4: **Validazione**, vengono mostrati i risultati ottenuti al fine di validare la soluzione proposta.
- Capitolo 5: **Conclusione e lavoro futuro**, presentazione delle conclusioni raggiunte ed alcune ipotesi per lavori futuri.

---

# Capitolo 2

## Stato dell'arte

In questo capitolo vengono presentate le motivazioni che hanno portato alla stesura di questo elaborato e le soluzioni per rilevazione di disservizi nella connettività più utilizzate.

### 2.1 Motivazione

Come introdotto nel precedente capitolo, lo scopo di questo lavoro é di fornire una soluzione per la rilevazione di disservizi in reti locali domestiche. Lo studio si é focalizzato su questo tipo di infrastrutture poichè esse rappresentano la maggioranza delle reti e, molto spesso, la loro configurazione é lasciata ad un utente finale con poche conoscenze del campo. Questo può portare a prestazioni poco efficienti per quanto riguarda le connessioni Wi-Fi o all'uso di apparecchiature di scarsa qualità che diminuiscono le velocità di download ed upload dei dispositivi. In aggiunta, access point vicini, se sullo stesso canale Wi-Fi, potrebbero interferire sulla connessione locale. Per questo motivo, software come Kismet[4], possono essere utilizzati anche per scegliere un canale non sovrautilizzato oltre a monitorare il traffico Wi-Fi ed i device connessi ad una rete. Negli ultimi tempi, i produttori di router, stanno cercando di implementare in tutti i loro dispositivi metodi di monitoraggio per rilevare disservizi di reti. Questo permette agli Internet Service Providers (ISP) di fornire una diagnostica iniziale che circoscriva il problema all'interno o all'esterno della rete. Nel primo caso, l'utente viene informato della presenza del problema nella sua rete locale e quali dispositivi ne siano affetti, mentre nel secondo caso é il fornitore del servizio Internet a dover intervenire sulla propria rete per rimediare al disservizio. Le soluzioni attuali per il monitoraggio e la gestione di rete presentano infatti diverse problematiche quando applicate a reti piccole locali.

In particolare il software é:

- Ristretto ad apparecchiature di fascia alta.
- Non sempre fornito di interoperabilità con software di altri produttori.
- Difficile da utilizzare per personale non specializzato.

Per questi motivi l'elaborato vuol fornire, dopo aver introdotto le tecniche di rilevazione di disservizi più comuni, una soluzione che possa essere utilizzata in piccole reti da utenti non esperti e su apparecchiature non professionali.

## 2.2 IEEE 802.11

### Distributed Coordination Function

Nel protocollo 802.11 il meccanismo di accesso al mezzo trasmissivo é chiamato distributed coordination function (DCF). Questo metodo di accesso casuale é basato sul protocollo di accesso multiplo tramite rilevamento della portante con evitamento delle collisioni (CSMA/CA) in cui i terminali tentano di evitare a priori il verificarsi di collisioni durante la trasmissione. La ritrasmissione, in caso di collisione di pacchetti, é gestita tramite un algoritmo di backoff esponenziale binario (BEB) che verrà presentato in dettaglio successivamente. É importante notare che lo standard IEEE 802.11 definisce anche un protocollo opzionale, chiamato point coordination function (PCF), in cui l'access point ha il compito di coordinare l'accesso al mezzo trasmissivo per evitare collisioni. Questo tipo di meccanismo di accesso non verrà trattato per via del suo poco utilizzo.

DCF descrive due tecniche per la trasmissione di pacchetti:

- Two-way handshake: meccanismo di accesso base.
- Four-way handshake: request to send/clear to send (RTS/CTS).

Il meccanismo di accesso base é ottenuto attraverso la trasmissione immediata di un acknowledgment positivo (ACK) da parte della stazione destinataria dopo aver ricevuto correttamente un pacchetto dal mittente. L'invio esplicito dell'ACK é richiesto poichè in un mezzo trasmissivo senza fili il mittente non può determinare se il pacchetto sia stato ricevuto correttamente ascoltando la sua stessa trasmissione.

Il meccanismo RTS/CTS é opzionale e prevede che una stazione interessata all'invio di un pacchetto riservi il mezzo tramite un pacchetto request to

## 2.2. IEEE 802.11 DISTRIBUTED COORDINATION FUNCTION

send. Dopo che il destinatario riconosce questo pacchetto con un frame CTS la comunicazione continua con l'invio del pacchetto desiderato e di relativo ACK.

Questo meccanismo permette l'incremento della performance del sistema grazie alla riduzione della durata di collisione che potrebbe avvenire con l'invio di lunghi pacchetti. Infatti, in questo caso, la collisione può solamente avvenire sul frame RTS e viene riconosciuta dalla mancanza di un frame CTS di risposta del destinatario. In aggiunta il meccanismo RTS/CTS implementato nello standard IEEE 802.11 è sviluppato per contrastare il problema dei terminali nascosti [5] che si presenta quando un paio di stazioni mobili non riescono a rilevarsi.

Si presenta ora il funzionamento di DCF, come standardizzato dal protocollo 802.11.

Una stazione che vuole trasmettere un pacchetto, prima di inviarlo, monitora l'attività presente sul canale. Se il canale risulta inattivo per una durata pari ad un distributed interframe space (DIFS), il mittente procede all'invio del frame. In caso contrario, se il canale è attualmente in uso, la stazione continua a monitorarlo finché esso non risulta inattivo per un DIFS. A questo punto la stazione attende per un intervallo casuale di backoff per minimizzare la probabilità di collisione di pacchetti con altre stazioni che hanno intenzione di trasmettere. Nello stesso modo, una stazione dovrà attendere un altro intervallo casuale per l'invio di due pacchetti consecutivi, anche se il canale risulta inattivo per un DIFS in modo da non impossessarsi del canale di trasmissione. L'uso del backoff casuale è il meccanismo che questo protocollo implementa per la collision avoidance.

DCF utilizza una scala a tempo discreto di backoff per motivi di efficienza, infatti il tempo immediatamente successivo ad un DIFS viene diviso in slot ed ogni stazione può solo trasmettere all'inizio di ciascuno di questi.

La dimensione dello slot,  $\delta$ , è pari al tempo che una stazione impiega per rilevare la trasmissione di un pacchetto da parte di una qualsiasi altra stazione. Questo valore dipende dal tipo dal tipo del mezzo trasmissivo e viene raffigurato nella tabella 2.1. Come precedentemente introdotto, DCF, implementa un backoff esponenziale ed il tempo viene scelto in un range  $(0, \omega-1)$  dove  $\omega$  è detta contention window. Questo valore dipende dal numero di trasmissioni fallite per un pacchetto, a partire da un valore pari a  $CW_{\min}$  viene raddoppiata ad ogni trasmissione fallita fino ad un valore massimo pari a  $CW_{\max}=2^m CW_{\min}$ . I valori minimi e massimi della

PHY	$\delta$	$CW_{\min}$	$CW_{\max}$
FHSS	50	16	1024
DSSS	20	32	1024
IR	8	64	1024

Tabella 2.1: Tabella 1

finestra sono specificati, a seconda del tipo di mezzo di trasmissione, nella tabella 2.1. Il contatore del backoff viene decrementato quando il canale si trova in uno stato di idle mentre é mantenuto inalterato quando una trasmissione viene captata sul canale. Infine, la stazione trasmette quando il valore del contatore raggiunge lo 0.

Si presentano ora due esempi di trasmissione usando i due metodi di accesso al metodo trasmissivo presentati.

Considerando due stazioni A e B che condividono lo stesso canale utilizzando il metodo base di accesso, alla fine della trasmissione B attende un DIFS e sceglie un tempo di backoff prima di trasmettere un nuovo pacchetto. Durante questo periodo la stazione A invia un pacchetto sul canale e, di conseguenza, il timer di backoff della stazione B rimane invariato fino a che il canale non verrà percepito come libero per almeno un DIFS. Per quanto riguarda la stazione A, essa riceve un ACK per segnalare la ricezione con successo del pacchetto da parte del destinatario. Il pacchetto di ACK viene inviato immediatamente trasmesso alla fine del messaggio, dopo un periodo di attesa chiamato short interframe space (SIFS). La durata di un SIFS é inferiore a quella di un DIFS, questo rende impossibile alle altre stazioni di rilevare come libero il canale fino a che non venga inviato l'ACK. In caso di mancata ricezione dell'ACK da parte della stazione A entro un tempo specificato ACKTimeout o della trasmissione di altri pacchetti nel canale, questa rischedula l'invio del pacchetto tramite le regole di backoff presentate.

Nel meccanismo RTS/CTS una stazione che vuole trasmettere un pacchetto aspetta fino a che non rileva il canale inattivo per un DIFS, segue le regole di backoff precedentemente introdotte e trasmette un frame speciale chiamato RTS. Quando la stazione ricevente riconosce un frame RTS risponde, dopo un SIFS di attesa, con un frame CTS. Il mittente é autorizzato ad utilizzare il canale solo alla corretta ricezione di un CTS. I frame RTS e CTS contengono inoltre la lunghezza del pacchetto da trasmettere, permettendo a tutte le stazioni in ascolto di aggiornare un network allocation vector (NAV) contenente il periodo di tempo per il quale il canale sarà occupato. Questo meccanismo fornisce, quindi, una soluzione al problema dei terminali nascosti oltre a ridurre la lunghezza dei frame coinvolti nella contesa del canale.

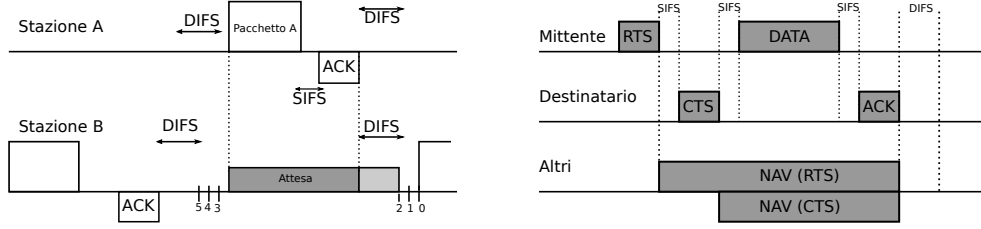


Figura 2.1: DCF con metodo accesso base (sinistra) e RTS/CTS (destra)

## 2.3 Analisi della performance IEEE 802.11 DCF

Uno dei primi e più rilevanti studi sulle prestazioni del meccanismo DCF é quello svolto da Bianchi [6] che propone la valutazione analitica del saturation throughput, ovvero il limite del throughput di sistema raggiunto all'aumentare del carico sul sistema stesso. L'analisi é stata effettuata con un numero fissato di stazioni ed uno stato di saturazione, ovvero assumendo che ogni stazione abbia sempre un pacchetto disponibile ad essere trasmesso. Diviso in due parti, lo studio improntato da Bianchi si concentra prima nel fornire una rappresentazione in catena di Markov del comportamento della singola stazione per ottenere la probabilità stazionaria  $\tau$  che essa trasmetta un pacchetto in uno slot di tempo casuale. L'approccio utilizzato fornisce una probabilità indipendente dal tipo di meccanismo di accesso (base o RTS/CTS). Dopo aver trovato questo valore, analizzando i possibili eventi che possono accadere in un determinato slot temporale, lo studio si conclude esprimendo il throughput dei due possibili metodi di accesso al mezzo trasmissivo in funzione del valore  $\tau$ .

$$\begin{cases} P\{i, k|i, k+1\} = 1 & k \in (0, W_i - 2) \ i \in (0, m) \\ P\{0, k|i, 0\} = (1-p)/W_0 & k \in (0, W_0 - 1) \ i \in (0, m) \\ P\{i, k|i-1, 0\} = p/W_i & k \in (0, W_i - 1) \ i \in (1, m) \\ P\{m, k|m, 0\} = p/W_m & k \in (0, W_m - 1) \end{cases}$$

La prima equazione tiene conto del decremento del tempo di backoff all'inizio di ogni slot di tempo mentre la seconda equazione del fatto che un nuovo pacchetto in seguito ad una trasmissione con successo inizia con un backoff stage pari a 0. I restanti due casi esprimono il sistema in caso di fallimento nella trasmissione. In particolare la terza equazione esprime come avvenga un aumento del backoff stage e la scelta di un nuovo valore di backoff iniziale nel range  $(0, W_i)$ . Infine, l'ultima equazione, modella il massimo

valore  $m$  che il tempo di backoff può assumere. Dopo aver trovato la formula chiusa della catena di Markov si può esprimere la probabilità  $\tau$  che una stazione trasmetta in uno slot di tempo casuale. Poichè la trasmissione avviene quando il timer di backoff raggiunge lo 0, a prescindere dal backoff stage il valore di  $\tau$  è pari a:

$$\tau = \frac{2(1 - 2p)}{(1 - 2p)(W + 1) + pW(1 - (2p)^m)} \quad (2.1)$$

Il valore di  $p$ , ovvero della probabilità di collisione, è pari alla probabilità che una delle restanti  $n-1$  stazioni decida di trasmettere un pacchetto.

$$1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (2.2)$$

Possiamo quindi dire che

$$\tau(p) = \frac{2}{1 + W + pW \sum_{i=0}^{m-1} (2p)^i} \quad (2.3)$$

Per calcolare quindi  $S$ , il throughput normalizzato, ovvero il periodo di tempo in cui il canale è utilizzato per trasmettere correttamente pacchetti, Bianchi ha poi definito le probabilità degli eventi che possono accadere in uno slot di tempo. In particolare, viene identificata con  $P_{tr}$  la probabilità che ci sia almeno una trasmissione nello slot di tempo  $e$ , poichè ogni stazione trasmette sul canale con probabilità  $\tau$ , si ha:

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (2.4)$$

La probabilità  $P_s$  che una trasmissione avvenga correttamente è quindi data dalla probabilità che esattamente una stazione trasmetta condizionata dalla probabilità che almeno una stazione trasmetta.

$$P_s = \frac{n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{1 - (1 - \tau)^n} \quad (2.5)$$

Si può ora descrivere  $S$  come il rapporto

$$S = \frac{E[\text{payload trasmesso in uno slot di tempo}]}{E[\text{lunghezza dello slot di tempo}]} \quad (2.6)$$

Dato che  $E[P]$  è la dimensione media di un pacchetto, la media di informazione trasmessa correttamente in uno slot di tempo è pari a  $P_{tr}P_sE[P]$ , poichè una trasmissione corretta avviene in uno slot con probabilità  $P_{tr}P_s$ .



### 2.3. ANALISI DELLA PERFORMANCE IEEE 802.11 DCF

---

Con probabilità  $1 - P_{tr}$  lo slot di tempo é vuoto, con probabilità  $P_{tr}P_s$  contiene una trasmissione con successo e con probabilità  $P_{tr}(1 - P_s)$  una collisione. L'equazione per ottenere  $S$  diventa quindi

$$S = \frac{P_s P_{tr} E[P]}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr}P_s T_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c} \quad (2.7)$$

In questa equazione si identifica il tempo medio in cui il canale viene visto come occupato per via di una trasmissione avvenuta con successo con  $T_s$  ed il tempo medio in cui il canale viene visto come occupato per via di una trasmissione con collisione con  $T_c$ . Questi valori, necessari per il calcolo del throughput, dipendono dal tipo di meccanismo di accesso utilizzato. Per quanto riguarda il meccanismo di accesso base, identificando con  $H = PHY_{hdr} + MAC_{hdr}$ ,  $\delta$  il ritardo di propagazione e  $E[P^*]$  la lunghezza media del più grande pacchetto coinvolto in una collisione:

$$\begin{cases} T_s^{bas} &= H + E[P] + SIFS + \delta + ACK + DIFS + \delta \\ T_c^{bas} &= H + E[P^*] + DIFS + \delta \end{cases}$$

Per il meccanismo di accesso basato su RTS/CTS i valori sono invece

$$\begin{cases} T_s^{rts} &= RTS + SIFS + \delta + CTS + SIFS + \delta + H + E[P] \\ &\quad + SIFS + \delta + ACK + DIFS + \delta \\ T_c^{rts} &= RTS + DIFS + \delta \end{cases}$$



---

## Capitolo 3

# Soluzione proposta

In questo capitolo viene presentata la soluzione proposta per la rilevazione di disservizi nella connettività di reti locali.



---

## Capitolo 4

# Validazione

In questo capitolo viene validato il lavoro svolto e vengono presentati i risultati ottenuti.



---

## Capitolo 5

## Conclusione





## Bibliografia

- [1] Cisco. *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022*. Rapp. tecn. Technical report, Cisco Systems Inc, 2019. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>.
- [2] Abdul Jabbar et al. «Performance Comparison of Weather Disruption-Tolerant Cross-Layer Routing Algorithms». In: apr. 2009, pp. 1143–1151. DOI: 10.1109/INFCOM.2009.5062027.
- [3] D. Micheli et al. «Measurement of Electromagnetic Field Attenuation by Building Walls in the Mobile Phone and Satellite Navigation Frequency Bands». In: *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 14 (2015), pp. 698–702. ISSN: 1536-1225. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2376811.
- [4] Kismet Wireless. *Kismet*. URL: <https://www.kismetwireless.net>.
- [5] Fouad Tobagi e Leonard Kleinrock. «Packet switching in radio channels: Part II-The hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution». In: *IEEE Transactions on communications* 23.12 (1975), pp. 1417–1433.
- [6] Giuseppe Bianchi. «Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function». In: *IEEE Journal on selected areas in communications* 18.3 (2000), pp. 535–547.