

Indice

Introduzione	I
Capitolo 1: Reti Wireless e Modellazione	1
1.1 Introduzione	1
1.2 Le WLAN	1
1.2.1 Vantaggi delle WLAN	2
1.2.2 Svantaggi delle WLAN	3
1.3 Reti con Infrastruttura e Reti Ad-Hoc	4
1.4 Lo standard IEEE 802.11	5
1.4.1 Il protocollo MAC 802.11	6
1.5 Lo standard 802.11n	7
1.6 Le reti Vanet	9
1.6.1 I Protocolli di Routing	10
1.7 WiMax	12
1.7.1 La versione mobile	14
1.7.2 Possibili successori: 802.11p e 802.20	15
1.8 Long Term Evolution	15
1.8.1 Il livello fisico	17
1.9 Introduzione alla modellazione ed alla simulazione	18
1.9.1 Modelli e Classificazione	19
1.9.2 Organizzazione di uno studio di Simulazione	20
1.9.3 Simulazione ad eventi Discreti	21
Capitolo 2: Le Reti Complesse	22
2.1 Introduzione	22
2.2 Primo approccio alle Reti Complesse	23
2.3 Definizioni e Concetti Chiave	26
2.3.1 Grado di un Nodo e Shortest Path	26
2.3.2 Coefficiente di Clustering	28
2.4 Cenni storici e topologie di reti	28
2.5 Le reti nel mondo reale	29
2.5.1 Social Network	29
2.5.2 Reti di informazioni	31
2.5.3 Reti Tecnologiche	33
2.5.4 Reti Biologiche	34
2.6 Reticoli Regolari	35
2.7 Reti Random	36

2.8 Reti Small World	39
2.9 Reti Scale Free	42
Capitolo 3: Le reti Small World	47
3.1 Introduzione	47
3.2 L'architettura di un sistema complesso	48
3.3 Small world nel sociale.....	50
3.3.1 I sei gradi di separazione	52
3.4 Spiegare il "Piccolo Mondo"	54
3.5 Albero di Cayley e primi sviluppi.....	56
3.6 Il modello di Watts e Strogatz	58
3.7 Small World nelle reti pesate.....	62
3.8 Oltre il modello di Watts e Strogatz	66
3.9 Small World e Social Network	68
3.9.1 Kleinberg: un piccolo mondo navigabile.....	72
3.9.2 Il modello di Kleinberg.....	73
3.9.3 L'algoritmo decentralizzato.....	75
Capitolo 4: Le Small World Networks nel mondo delle telecomunicazioni:Modellazione di reti Ad-hoc	77
4.1 Introduzione	77
4.2 Perché modellare con Small World Networks.....	78
4.3 Modellazione tramite ricablaggio dei link	81
4.4 Reti Small World nelle reti wireless di Sensori	84
4.4.1 Costruire Reti Small World in WSN statiche	85
4.4.2 Costruire Reti Small World in WSN dinamiche.....	90
4.5 Modellazione tramite rivisitazione del modello di Kleinberg	91
4.6 Modellazione di reti ad hoc tramite utilizzo di nodi speciali.....	94
4.7 Modellazione tramite utilizzo dei Data Mules.....	99
4.7.1 Data Mules nelle reti wireless connesse	102
4.7.2 Data Mules nelle reti wireless non connesse	103
4.7.3 Data Mules nelle reti di sensori wireless	105
4.8 Small World Networks in reti di sensori eterogenee	106
4.9 Applicazioni reali di Small World Networks	110
Capitolo 5:Analisi delle performance	112
5.1 Introduzione	112
5.2 Introduzione alla Simulazione	113
5.3 Progettazione e implementazione di ARF 1.0	115
5.4 Simulazioni effettuate	119

5.4.1 Simulazioni per il calcolo della densità	119
5.4.2 Simulazioni per il calcolo della lunghezza media del percorso minimo senza Data Mules	122
5.4.3 Simulazioni per il calcolo della lunghezza media del percorso minimo con l'aggiunta dei Data Mules	124
5.4.4 Simulazioni per il calcolo della distanza fisica media al variare dei nodi....	129
5.4.5 Simulazioni per il calcolo della distanza fisica media al variare dei Data Mules	130
Conclusioni	132
Bibliografia	134
Ringraziamenti	137

Introduzione

L'obiettivo di questo elaborato è quello di effettuare un'analisi più chiara possibile sullo studio delle reti complesse, le cui caratteristiche saranno ampiamente descritte nei capitoli seguenti. Negli ultimi anni è stato dedicato grande interesse all'approfondimento di tali reti, esso è determinato dalla possibilità di spiegare le dinamiche di importanti fenomeni naturali oppure di diverse possibili applicazioni tecnologiche. Inizialmente saranno analizzate in maniera generale ma abbastanza approfondita le moderne reti wireless, questo perché nelle reti di telecomunicazioni i dispositivi wireless (senza fili) hanno grande importanza per il fatto che ci permettono di installare una rete in un qualsiasi ambiente. Chiaramente queste tecnologie hanno reso il mondo delle telecomunicazioni molto più flessibile rispetto a prima ed hanno portato notevoli cambiamenti che hanno reso possibile il miglioramento delle reti, l'abbattimento di numerosi costi ed il superamento delle opposizioni che sorgevano nei collegamenti cablati tradizionali. È normale però che c'è da considerare anche il fatto che, utilizzare dispositivi wireless può portare svantaggi con ad esempio il consumo di potenza o una sicurezza poco affidabile. Sarà spiegata la differenza tra reti con infrastruttura, cioè reti in cui la comunicazione avviene tramite un Access Point, e le reti ad hoc che invece non hanno bisogno di nessuna infrastruttura e in cui tutti i nodi sono capaci di comunicare tra di loro senza nessun Access Point. Un aspetto fondamentale delle reti wireless è lo standard 802.11 che definisce in particolare in livello fisico e MAC del modello ISO/OSI, specificando sia l'interfaccia tra client e access point che quella tra client wireless. Dopo l'analisi di tale standard saranno analizzati gli standard 802.11n e 802.11p quali due delle migliori revisioni dello standard 802.11. Saranno esposti i concetti di Reti VANET, acronimo di Vehicular Ad-Hoc NETWORKS, che sono la denominazione di una modalità di comunicazione tra autoveicoli, ed in tal senso costituiscono un'evoluzione delle MANET (Mobile Ad-hoc NETWORK) che sono state studiate con riferimento a nodi dai movimenti incoerenti. In queste reti ogni nodo è un router, ossia oltre che inviare e ricevere messaggi per sé, può funzionare da intermediario tra terzi; il fatto che le parti in comunicazione siano anche in movimento, determina la necessità di definire opportuni meccanismi di localizzazione, eventualmente aiutati da dispositivi GPS, al fine di individuare la direzione in cui inoltrare il messaggio. Oltre alle reti VANET saranno descritte anche le caratteristiche del WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access), una tecnologia che

consente l'accesso a reti di telecomunicazioni a banda larga e senza fili, e dell'LTE (Long Term Evolution) che è invece la più recente evoluzione degli standard di telefonia mobile. Saranno inoltre introdotte e descritte le principali tecniche di modellazione e simulazione delle reti wireless. Dopo questa prima parte introduttiva sulle reti wireless, questo lavoro si concentrerà sulla descrizione e sull'analisi delle reti complesse. A partire dalla nascita della teoria dei grafi, quando Eulero pubblicò la soluzione del problema dei ponti di Königsberg, ad arrivare all'analisi dei risultati ottenuti analizzando contesti specializzati come ad esempio le scienze sociali. Saranno analizzati i concetti chiave delle reti complesse come il grado di un nodo, la lunghezza media del percorso e il coefficiente di clustering e saranno descritte le reti nel mondo reale (social network, reti di informazioni, reti tecnologiche e reti biologiche). Per definire meglio i modelli di sistemi complessi si sono studiati i reticoli regolari e le reti casuali, dove la prima tipologia considera che i nodi della rete sono posizionati in modo regolare e ognuno di essi è caratterizzato dallo stesso numero di archi, e dunque dallo stesso grado. Mentre una rete casuale è un grafo in cui il numero di link tra i nodi varia secondo una distribuzione gaussiana, o un'altra distribuzione casuale, intorno ad un valore medio. I due principali modelli di reti complesse sono le reti small world e le reti scale free. Quest'ultimo modello definisce la rete a invarianza di scala (in inglese appunto scale-free network) come un grafo che gode della seguente proprietà: se si considera la relazione tra il numero di nodi ed il numero delle loro connessioni si vede che il suo grafico è di tipo esponenziale negativo, e quindi invariante per cambiamenti di scala. Questa invarianza di scala significa che paragonando il numero di due tipi di nodi, ad esempio quelli con 10 connessioni e quelli con 15, si vede che la proporzione fra i due è $e^{-a(Nb - Na)}$, dove Nb ed Na sono il numero di nodi del denominatore e numeratore rispettivamente mentre a è un parametro del tipo di rete considerato. Questa legge è detta legge di potenza, di cui a è il parametro ed è stata definita da Barabàsi nel 1998. Per quanto riguarda invece le reti small world gli è stato dedicato un intero capitolo per il fatto che questa tipologia di rete complessa è considerata una vera e propria rivoluzione nell'analisi e nella comprensione delle reti. Si è fatta un'introduzione alle reti small world nel sociale ed è stato definito il concetto dei "sei gradi di separazione". La teoria dei sei gradi di separazione è un'ipotesi secondo cui qualunque persona può essere collegata a qualsiasi altra persona attraverso una catena di conoscenze con non più di 5 intermediari. Tale teoria è stata proposta per la prima volta nel 1929 dallo scrittore ungherese Frigyes Karinthy in un racconto breve intitolato

Chain. Nel 1967 il sociologo americano Stanley Milgram trovò un nuovo sistema per testare la teoria, che egli chiamò "teoria del mondo piccolo". Selezione casualmente un gruppo di americani del Midwest e chiese loro di mandare un pacchetto ad un estraneo che abitava nel Massachusetts, a diverse migliaia di chilometri di distanza. Ognuno di essi conosceva il nome del destinatario, la sua occupazione, e la zona in cui risiedeva, ma non l'indirizzo preciso. Fu quindi chiesto a ciascuno dei partecipanti all'esperimento di mandare il proprio pacchetto a una persona da loro conosciuta, che a loro giudizio avesse il maggior numero di possibilità di conoscere il destinatario finale. Quella persona avrebbe fatto lo stesso, e così via fino a che il pacchetto non venisse personalmente consegnato al destinatario finale.

I partecipanti si aspettavano che la catena includesse perlomeno un centinaio di intermediari, e invece ci vollero solo (in media) tra i cinque e i sette passaggi per far arrivare il pacchetto. Le scoperte di Milgram furono quindi pubblicate in *Psychology Today* e da qui nacque l'espressione sei gradi di separazione.

Nel 2001 Duncan Watts, un professore della Columbia University, riprese per conto suo la ricerca e ricreò l'esperimento di Milgram su Internet. Watts usò un messaggio e-mail come "pacchetto" che doveva essere consegnato e, sorprendentemente, dopo aver analizzato i dati ottenuti dagli invii effettuati da 48.000 differenti persone residenti in 157 stati diversi, nei confronti di 19 "bersagli", Watts trovò che il numero medio di intermediari era effettivamente sei. La ricerca di Watts pubblicata su *Science* nel 2003 e l'avvento dell'era del computer, permisero l'applicazione della teoria dei sei gradi di separazione anche in aree differenti, tra cui l'analisi delle reti informatiche ed elettriche, la trasmissione delle malattie, la teoria dei grafi, le telecomunicazioni, e la progettazione della componentistica dei computer. Dopo aver introdotto e descritto queste caratteristiche delle reti small world sarà analizzato il modello di Watts e Strogatz che si concentrava maggiormente sulle reti sociali. Tale modello era in grado di soddisfare simultaneamente il bisogno di avere un diametro piccolo e un alto coefficiente di clustering. Il loro lavoro ebbe l'effetto di suscitare nuovo interesse verso gli studi per le reti sociali, attirando molti studiosi, tra cui numerosi matematici.

Il risultato principale, degli studi condotti da Watts e Strogatz, consiste nella scoperta empirica che la rete riesce a mantenere i vantaggi di entrambe le proprietà (diametro piccolo e alto coefficiente di clustering) per valori intermedi della probabilità p .

Per valori di p compresi tra 0 e 1, infatti, l'alto coefficiente di clustering persiste, perché molti degli archi originali rimangono immutati (la probabilità p che questi siano

ricollegati è piccola), e per due nodi vicini u e v , i nodi chiusi ad u sono, nella maggior parte dei casi, gli stessi che sono chiusi a v . Al contempo, risulta intuitivo come, il piccolo diametro appaia anche per valori relativamente piccoli di p , perchè gli archi inseriti casualmente, formano a tutti gli effetti un grafo random, formato da piccoli cluster di nodi vicini, in cui il diametro di ogni singolo cluster risulta piccolo.

Oltre a tale modello sarà analizzato anche il modello di Kleinberg, che ha avuto il merito di compiere un'importante osservazione sull'esperimento che portò Milgram alla scoperta dello small world. L'esperimento del sociologo di Harvard mostrava due importanti peculiarità delle reti sociali. Non solo, infatti, esistono corte catene di "amici" tra due vertici scelti a caso nella rete, ma i membri della rete sono in grado di costruire cammini brevi utilizzando solo le informazioni "locali", rappresentate dai nodi a cui sono direttamente connessi. In altre parole piuttosto che vedere l'esperimento di Milgram come un risultato relativo alla grandezza del diametro di una rete sociale, Kleinberg considerò l'esito dell'esperimento come il risultato relativo al successo di un particolare algoritmo di routing applicato al grafo. Compiuta questa osservazione, Kleinberg dimostrò che il modello di Watts e Strogatz non forniva informazioni sufficienti per la creazione del cammino da intraprendere. Sviluppò, quindi, un'estensione del modello di Watts e Strogatz che sarà approfonditamente descritto nei capitoli di questo elaborato.

Una grossa fetta di questa tesi è stata inoltre dedicata allo studio della modellazione di reti wireless tramite tecniche di reti complesse, utilizzando in particolare i concetti e le proprietà delle reti small world. Questo perché nelle moderne reti di telecomunicazioni il problema della scalabilità è che, la distanza media tra ogni coppia di nodi dovrebbe essere tenuta bassa quando il sistema cresce. Ma idealmente, in una rete completamente connessa di grandi dimensioni, la distanza minima di separazione tra una qualsiasi coppia di nodi è un requisito fondamentale nel mondo attuale della comunicazione, cioè, le caratteristiche di rete small world in una qualsiasi rete dovrebbero essere sempre disponibili. Quindi, se ogni tipologia di rete ad hoc è modificata e convertita in una rete small world, la comunicazione può essere fatta in maniera sempre più efficiente. Saranno descritte diverse tecniche, a partire da quella che utilizza il ricablaggio dei link per ottenere caratteristiche di rete small world e quindi che utilizza dei veri e propri collegamenti fisici tramite aggiunta di linee di cavo.

Inoltre verranno analizzati i comportamenti delle reti di sensori wireless arricchiti con proprietà di reti small world, questo perché le wireless sensor networks hanno

guadagnato l'attenzione in tutto il mondo per i loro vantaggi negli ultimi anni. Le reti small world hanno due caratteristiche principali: piccola lunghezza media del percorso e un alto coefficiente di clustering. Introdurre le reti small world nelle wireless sensor network ha un importante valore teorico nell'analisi topologica della rete, per trovare regole nascoste, ed analizzare il comportamento prevedibile delle reti di sensori wireless. In pratica costruire reti di sensori wireless con le caratteristiche di reti small world può migliorare le prestazioni della rete nella ricerca dei dati, può migliorare l'efficienza energetica e di vita della rete ed inoltre può essere ampiamente utilizzato nelle strategie militari.

Tra le tante, saranno utilizzate due tecniche fondamentali per quanto riguarda la modellazione: la tecnica che utilizza una rivisitazione del modello di Kleinberg oppure la tecnica che utilizza dei nodi speciali. Quest'ultima propone di utilizzare una piccola parte di nodi della rete dotati di due interfacce radio con intervalli di trasmissione differenti al fine di introdurre scorciatoie a lungo raggio. Dallo studio di questa tecnica è stato dimostrato che una piccola frazione di questi nodi speciali sono in grado di migliorare significativamente la connettività della rete. Sarà dimostrato anche che i nodi speciali hanno effetti sul processo di diffusione delle informazioni e sulla robustezza della rete.

Un'ultima tecnica che verrà descritta è quella della modellazione di una rete ad hoc tramite l'utilizzo di nodi mobili chiamati Data Mules (o traghetti di dati) che sono utilizzati per imitare le scorciatoie. La distanza del percorso che faranno i nodi mobili è rappresentata dalla lunghezza della scorciatoia. Anche se, i collegamenti con i Data Mules e quelli tradizionali hanno una natura completamente diversa, i risultati degli studi effettuati dimostrano che un numero ristretto di Data Mules può ridurre significativamente la lunghezza media del percorso, che è compatibile con il fenomeno piccolo mondo. In questo elaborato saranno ampiamente descritte tutte le caratteristiche e tutte le proprietà dei Data Mules ed inoltre sarà vista la loro applicazione in reti wireless connesse, non connesse e infine in reti di sensori wireless.

Un ultimo ma molto importante accenno sarà dato all'applicazione delle proprietà di reti small world all'interno delle reti di sensori wireless eterogenee. Tale modello presuppone l'esistenza di un gran numero di sensori di fascia bassa e un piccolo numero di sensori high-end. Nelle reti tradizionali, l'obiettivo dei collegamenti è quello di ottimizzare la comunicazione tra le coppie di nodi. Tuttavia, nelle reti di sensori wireless, la comunicazione dei dati avviene in genere tra il nodo sink e i nodi sensore o

vice-versa. Così, per migliorare meglio la comunicazione dei dati in una wireless sensor network, i collegamenti dovrebbero essere creati verso il nodo sink. Quando una rete di sensori wireless è modellata secondo i concetti piccolo mondo, in seguito all'aggiunta di scorciatoie, la rete diventa più robusta, cioè, la rete diventa più resistente. Saranno inoltre descritti degli esempi su alcune applicazioni reali di reti small world, come l'applicazione nel traffico urbano e nell'ambito militare.

L'ultima parte di questo elaborato è stata dedicata all'implementazione di un simulatore che ci ha permesso di effettuare un'analisi per quanto riguarda la modellazione delle reti Ad-hoc utilizzando le caratteristiche delle Small World Networks. Il simulatore *ARF 1.0* è stato sviluppato interamente in java tramite un sistema Multi-Thread e con l'utilizzo del pattern Observer. Sono stati introdotti dei nodi speciali alla rete, chiamati Data Mules, che ci hanno permesso di ottenere le caratteristiche e i benefici delle reti small world. I risultati delle simulazioni eseguite con *ARF 1.0* saranno ampiamente descritti nell'ultimo capitolo della tesi a dimostrazione che risulta efficace utilizzare i concetti delle reti complesse per modellare una rete Ad-hoc in quanto si ottengono notevoli benefici nel calcolo della lunghezza media del percorso minimo e del ritardo della rete.