

## INDICE

INTRODUZIONE .....	1
CAPITOLO 1: LE RETI DISTRIBUITE .....	1
1.1 Introduzione .....	1
1.2 Le Reti Ad – Hoc .....	2
1.2.1 Cenni storici e ambiti applicativi .....	3
1.2.2 Dettagli tecnici e caratteristiche .....	4
1.2.3 Problematiche di maggior rilievo .....	6
1.2.4 Routing .....	7
1.3 Le reti MANET .....	11
1.3.1 Caratteristiche principali .....	12
1.3.2 Vantaggi e svantaggi .....	13
1.3.3 Scenari applicativi .....	13
1.3.4 Problematiche principali .....	15
1.3.5 Routing specifico per reti MANET .....	16
1.3.5.1 Il protocollo OLSR .....	17
1.3.5.2 Il protocollo TBRPF .....	18
1.3.5.3 Il protocollo AODV .....	19
1.4 Le reti VANET .....	20
1.4.1 Caratteristiche specifiche rispetto alle reti MANET .....	21
1.4.2 Ambiti applicativi .....	23
1.4.3 Routing specifico per reti VANET .....	23
1.4.4 Sicurezza e problematiche connesse .....	26
1.4.5 Problematiche relative alla comunicazione tra veicoli .....	27
1.4.6 Modelli di mobilità .....	27
CAPITOLO 2: STANDARD PER LE RETI VEICOLARI .....	29
2.1 Introduzione: lo Standard IEEE 802.11 .....	29
2.2 Architettura Protocollare dello Standard IEEE 802.11 .....	31
2.2.1 Livello Fisico .....	32
2.2.1.1 Sottolivello PLCP .....	32
2.2.1.2 Sottolivello PMD .....	33
2.2.2 Livello Data-Link .....	34
2.2.2.1 Sottolivello MAC .....	34
2.3 Alcuni standard appartenenti alla famiglia IEEE 802.11 .....	36
2.3.1 Standard IEEE 802.11a .....	36
2.3.2 Standard IEEE 802.11b .....	37
2.3.3 Standard IEEE 802.11g .....	38
2.3.4 Standard IEEE 802.11e .....	38
2.4 Standard di riferimento per le Reti Veicolari .....	39
2.4.1 Standard IEEE 802.11p .....	41
2.4.1.1 Livello MAC .....	42
2.4.1.1.1 Protocollo di accesso al mezzo a livello MAC .....	44
2.4.1.1.2 Gestione della priorità .....	45
2.4.1.2 Livello Fisico .....	48
2.4.1.2.1 Controllo della potenza di trasmissione .....	50
2.4.2 Altri standard dedicati alla comunicazione veicolare .....	51
2.4.2.1 Standard IEEE 1609.4 .....	52
2.4.2.1.1 Il protocollo CREM .....	53
2.4.2.1.1.1 Meccanismi offerti dal protocollo CREM .....	54
2.4.2.1.1.2 Protocollo CREM-E .....	56
2.4.2.1.2 Protocollo CREM-E .....	57
2.4.2.1.2.1 Meccanismi offerti dal protocollo CREM .....	57
2.4.2.1.2.2 Protocollo CREM-E .....	56
CAPITOLO 3: MODELLI DI MOBILITÀ PER LE RETI VEICOLARI .....	57
3.1 Introduzione .....	57
3.2 Descrizione delle Notazioni Utilizzate .....	61
3.3 Modelli Casuali .....	62
3.4 Modelli di Flusso .....	64
3.4.1 Modelli di Flusso Microscopici .....	65
3.4.1.1 Car Following Models .....	65
3.4.1.2 Intelligent Driver Model .....	68
3.4.1.3 Modello di Krauss .....	68
3.4.1.4 Modello di Wiedemann .....	69
3.4.2 Modelli di Flusso Macroscopici .....	70
3.4.3 Modelli di Flusso Mesoscopici .....	72
3.4.4 Gestione degli Ineroci .....	74
3.5 Modelli di Traffico .....	75

3.5.1 Pianificazione di Viaggio.....	76
3.5.2 Pianificazione di Percorso .....	77
3.5.2.1 Pianificazione di Percorso Flow-centric e Agent-centric .....	78
3.5.3 Influenza dell'orario .....	79
3.6 Modelli Comportamentali.....	80
3.7 Modelli Basati su Tracce e Rilevazioni .....	82
3.8 Integrazione dei modelli di mobilità nei simulatori di rete.....	84
3.8.1 Modelli di mobilità isolati.....	84
3.8.2 Modelli di mobilità incorporati.....	85
3.8.3 Modelli di mobilità federati.....	86
<b>CAPITOLO 4: ANALISI DELLE PERFORMANCE</b> .....	87
4.1 Introduzione.....	87
4.2 Progettazione e realizzazione del generatore di tracce di mobilità.....	88
4.3 Le simulazioni e lo studio delle reti.....	91
4.4 Descrizione delle simulazioni effettuate.....	92
4.4.1 Simulazioni per il calcolo della lunghezza media del percorso al variare del numero di nodi.....	92
4.4.2 Simulazioni per il calcolo della lunghezza media del percorso al variare del raggio di copertura .....	94
4.4.3 Simulazioni per il calcolo della potenza media ricevuta al variare del raggio di copertura .....	99
4.4.3.1 Il modello Log-Normal Shadowing.....	99
4.4.3.2 Il modello Rayleigh .....	99
4.4.3.3 Simulazioni effettuate utilizzando i modelli Log-Normal Shadowing e Rayleigh.....	100
<b>CONCLUSIONI</b> .....	104
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	106

## INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi è stato realizzato con l'obiettivo di illustrare ed approfondire gli aspetti e le problematiche inerenti l'ambito delle reti ad - hoc veicolari. Tali reti, negli ultimi anni, sono divenute oggetto di particolare interesse da parte della comunità scientifica per via degli importanti e utili servizi che esse possono fornire agli utenti che ne fanno parte. Infatti, ad esempio, una rete ad - hoc veicolare può costituire l'infrastruttura di comunicazione per un' applicazione di sicurezza stradale distribuita, che consente ai nodi della rete (che in questo caso sono i veicoli) di scambiarsi informazioni relative alle condizioni del traffico o ad eventuali situazioni di pericolo, consentendo così ai conducenti di intervenire preventivamente al fine di evitare incidenti stradali. È facile quindi comprendere il motivo del crescente interesse da parte della comunità scientifica verso questa tipologia di rete che potrebbe, nel prossimo futuro, rivoluzionare il sistema dei trasporti.

Nella prima parte di questo elaborato saranno definiti e analizzati gli aspetti di carattere generale del mondo delle reti ad - hoc, ed in particolare delle reti ad - hoc mobili e veicolari. Una Rete Ad - Hoc può essere definita come una rete decentrata che non si basa su una infrastruttura preesistente (come ad esempio routers o punti di accesso) nella gestione della rete stessa; ogni nodo della rete comunica direttamente con gli altri nodi comportandosi non solo come host ma anche come router, cioè in oltre pacchetti per gli altri nodi della rete che non possono essere situati nel raggio della trasmissione wireless diretta di ogni altro nodo. Il mondo delle reti ad hoc si differenzia quindi profondamente da quello delle tradizionali reti wireless, le quali hanno bisogno di una infrastruttura di rete centralizzata (tipicamente un access point) che gestisce le procedure di accesso al mezzo trasmissivo e fornisce le funzionalità di inoltrare i dati. Nelle reti con infrastruttura centralizzata, al contrario di quanto avviene nelle reti ad - hoc, la comunicazione non avviene mai direttamente tra i terminali, ma è mediata dall'infrastruttura. Tale caratteristica peculiare delle reti ad - hoc va quindi ad eliminare uno dei vincoli pratici caratteristici delle tradizionali reti wireless, ovvero l'impossibilità per una rete wireless di esistere indipendentemente dalla presenza o meno nelle vicinanze di una qualche infrastruttura di rete. Infatti una rete ad - hoc permette la comunicazione in ogni istante di tempo ed in ogni luogo e concede la possibilità di

creare e disfare in maniera spontanea una rete, può essere formata per la risoluzione di problemi specifici e allestita con quanto immediatamente disponibile. Ciò rende tali reti particolarmente adatte all'utilizzo in situazioni di emergenza quali, ad esempio, disastri ambientali, calamità naturali o terremoti che hanno distrutto le infrastrutture esistenti.

Un interessante scenario nell'ambito delle reti ad hoc è costituito dalle reti MANET (Mobile Ad-hoc Network) cioè le reti ad hoc mobili; una MANET è definita come un sistema autonomo di terminali mobili connessi mediante collegamenti wireless. Tali reti, in quanto facenti parte della famiglia delle reti ad hoc, presentano tutte le caratteristiche specifiche sopra descritte; l'aspetto caratterizzante delle reti MANET è che i loro terminali di comunicazione hanno una natura mobile che rende la topologia della rete variabile nel tempo, quindi esse sono in grado di fornire l'accesso a informazioni e servizi indipendentemente dalla posizione geografica.

Nell'ambito delle reti ad hoc mobili, un settore molto interessante è costituito dalle cosiddette reti VANET (Vehicular Ad-hoc Network). In questa tipologia di rete i nodi si muovono a velocità ragguardevoli in senso relativo (tra loro) e assoluto (rispetto a punti di riferimento fissi) e la differenza fondamentale tra le reti MANET (generiche) e le reti VANET (specifiche) è la velocità di spostamento dei nodi e, di conseguenza, il rapido mutamento della topologia della rete. Le ragioni dell'interesse per questo genere di tecnologia di comunicazione sono molteplici infatti, ad esempio, può essere di aiuto in situazioni di pericolo su strade o autostrade in caso di incidenti (attraverso la diffusione di messaggi di *warning* che possono essere di ausilio ai conducenti dei veicoli); oppure può apportare benefici all'intero sistema di trasporto attraverso la fornitura di servizi innovativi (ad esempio distributori di benzina che forniscono la loro posizione geografica, i loro servizi e il prezzo del carburante, condivisione di materiale informatico, documenti, film o musica tra vetture e servizi di localizzazione vari). Le reti VANET cercano di estendere completamente la mobilità dei nodi senza far uso di reti infrastrutturate. Tra gli aspetti più importanti delle reti VANET quello che maggiormente attira l'interesse della comunità scientifica è l'instradamento dei pacchetti; infatti in tali reti la topologia dell'infrastruttura di routing (essendo costituita dai nodi della stessa rete) subisce cambiamenti nei suoi componenti quindi, per trovare la posizione geografica di un veicolo e dunque la sua posizione nella rete, è necessario trovare il veicolo-router che lo instrada. La natura estremamente dinamica che caratterizza le VANET e la necessità di avere comunicazioni estremamente veloci ed efficienti per poter far fronte ad eventi imprevisibili, implica quindi una serie di studi

dettagliati sulle performance reali delle soluzioni offerte. Infatti la comunicazione deve avvenire a prestazioni molto elevate e inoltre deve evitare di intasare la rete di messaggi inutili.

Successivamente, dopo aver effettuato una panoramica generale sul mondo delle reti ad hoc, e in particolare delle reti ad hoc veicolari, necessaria a comprendere aspetti e problematiche caratterizzanti l'ambiente del quale ci si andrà ad occupare, saranno analizzati gli standard di comunicazione specifici per le reti veicolari. Verranno analizzati gli standard appartenenti alla famiglia IEEE 802.11, sigla che definisce una famiglia di standard sviluppati dal gruppo 11 della commissione IEEE 802 per le reti WLAN (Wireless Local Area Network); la famiglia 802.11 consta di tre standard dedicati alla trasmissione delle informazioni (a, b, g), mentre gli altri standard (c, d, e, f, h, ecc.) riguardano estensioni dei servizi base e miglioramenti di servizi già disponibili. Particolare attenzione sarà posta all'analisi dell'architettura protocollare la quale mantiene la stessa struttura per i livelli OSI sovrastanti il livello Data-Link. Il livello Data-Link si divide in due sottolivelli: LLC (Logical Link Control), che è sempre lo stesso all'interno della famiglia 802.x, e MAC (Medium Access Control) che invece differenzia le varie tipologie di reti LAN. Per quanto riguarda il livello fisico, invece, questo si divide in due sottolivelli: PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) e PMD (Physical Medium Dependent). Oltre alla descrizione del livello fisico e data-link, lo standard IEEE 802.11 fornisce anche delle indicazioni sulla gestione di tali livelli e dei singoli nodi della rete.

Come già precedentemente detto, lo standard IEEE 802.11 è costituito da più standard; sarà quindi fornita una breve descrizione dei vari standard appartenenti alla famiglia e sarà dedicato ampio spazio all'analisi dello standard IEEE 802.11p che è lo standard dedicato alle comunicazioni veicolari. Questo standard nasce circa a metà degli anni '90 per standardizzare nel Nord America i sistemi di pagamento a distanza dei pedaggi, sotto la denominazione di progetto DSRC (Dedicated Short Range Communications) promosso dal Dipartimento dei Trasporti. Nel giro di qualche anno ha perso entrambe le caratteristiche comprese nel suo nome: la tecnologia di cui si discute oggi non è ne dedicata a trasportare i semplici messaggi del pagamento dei pedaggi, ne funziona solo a breve distanza, ma supporta range che vanno dai 300 metri sino a 1000 metri con un rate minimo di 6 Mbps.

Oltre all'analisi delle caratteristiche generali dello standard IEEE 802.11p particolare attenzione sarà dedicata allo studio dell'architettura protocollare di tale standard, studio

che cercherà di mettere in evidenza le differenze tra l'architettura protocollare dello standard specifico (IEEE 802.11p) e quella dello standard generale (IEEE 802.11). Per quanto riguarda il livello MAC, il principio di funzionamento dello standard IEEE 802.11 si basa sullo scambio di informazioni preliminari per stabilire e mantenere una connessione sicura, mentre l'idea proposta dallo standard IEEE 802.11p è quella di riuscire a creare una comunicazione molto efficiente senza il pesante overhead (informazioni di controllo) tipicamente presente nel MAC 802.11 e questo a vantaggio della velocità di trasmissione per l'utilizzo nelle reti veicolari. Il livello fisico dello standard IEEE 802.11p invece, adotta la filosofia di apportare cambiamenti minimi rispetto al già esistente livello fisico dello standard IEEE 802.11, in modo da ottimizzare quest'ultimo per l'utilizzo nelle reti veicolari. Lo standard IEEE 802.11p opera alla frequenza di 5,9 GHz ed è essenzialmente basato sulla tecnica di modulazione OFDM (Orthogonal Frequency Division Modulation) per suddividere i 75 MHz del canale in sette sottocanali da 10 MHz.

Tra gli altri standard dedicati alla comunicazione veicolare, particolare importanza rivestono gli standard della famiglia IEEE 1609 dei quali sarà trattato in particolare lo standard IEEE 1609.4. Lo standard IEEE 1609.4 si occupa di descrivere il livello fisico e il livello MAC della modalità di comunicazione WAVE (Wireless Access for Vehicular Environment), inoltre si occupa dei parametri relativi alla priorità di accesso al mezzo, della commutazione tra i canali, del routing, dei servizi di gestione e definisce infine delle primitive progettate per le operazioni multicanale. Lo scopo principale dello standard IEEE 1609.4 è quello di fornire dei meccanismi che controllano efficacemente il funzionamento dei livelli superiori senza richiedere la conoscenza dei parametri del livello fisico; i servizi forniti da questo standard sono utilizzati per gestire il coordinamento dei vari canali e per supportare la consegna di unità dati a livello MAC (MSDU). In pratica, lo standard IEEE 1609.4 è stato proposto per fornire operazioni multi-canale per ambienti veicolari (WAVE), dove tutti i canali sono sincronizzati periodicamente in intervalli di controllo e di servizio (il periodo di sincronizzazione comprende sia l'intervallo di controllo che l'intervallo di servizio). Il dispositivo di comunicazione in ogni veicolo rimane presso il canale di controllo per la negoziazione e la contesa del mezzo durante l'intervallo di controllo e, successivamente, passa ad uno dei canali di servizio per la trasmissione dei dati durante gli intervalli di servizio.

Dopo l'analisi dei vari standard di comunicazione dedicati alle reti veicolari, seguirà l'analisi dell'argomento principale di questo elaborato: i modelli di mobilità per le reti

veicolari. Infatti, praticamente dall'avvento di un simbolo importante del 20° secolo quale l'automobile, scienziati e ingegneri hanno cercato di capire e riprodurre modelli di mobilità veicolare. Questo sforzo è stato reso più critico con la popolarizzazione delle automobili personali e lo scoppio delle prime congestioni di traffico. Nella metà del 20° secolo un dominio di ricerca nuovo, chiamato teoria del traffico, ha avuto l'obiettivo di comprendere il nesso tra la velocità del traffico, il flusso e la densità per un dimensionamento efficiente delle infrastrutture di trasporto al fine di contribuire a risolvere i problemi di traffico; ma solo quando i veicoli effettivamente iniziarono a far parte della rete di comunicazione con la comparsa delle VANET, si iniziarono a effettuare degli studi più approfonditi sulla mobilità veicolare. Infatti la mobilità ha dimostrato di essere fonte di problemi, e la sua la modellazione e comprensione è una giustificazione per raggiungere gli stessi obiettivi della la teoria del traffico: migliorare il dimensionamento di infrastrutture di trasporto dati e, soprattutto, risolvere i problemi di traffico dati.

È facile comprendere l'importanza di testare e valutare applicazioni di rete da veicolo a veicolo o da veicolo a infrastruttura in ambienti reali, ma le difficoltà logistiche, le questioni economiche e le limitazioni tecnologiche che si devono affrontare per effettuare dei test nell'ambiente reale, hanno fatto delle simulazioni la scelta migliore per la validazione di protocolli di rete per le applicazioni veicolari, un primo passo ampiamente adottato nello sviluppo di tecnologie del mondo reale. Nella progettazione di un ambiente di simulazione specifico per ambienti veicolari, particolare importanza assume la definizione di modelli di mobilità che riescano a riprodurre, il più fedelmente possibile, il comportamento dei veicoli.

I modelli di mobilità per ambienti veicolari possono essere classificati in cinque diverse classi in funzione dei loro obiettivi e delle loro caratteristiche: modelli casuali, modelli di flusso, modelli di traffico, modelli comportamentali e modelli trace-based. Nei modelli di mobilità casuali i parametri di mobilità, come velocità, direzione e destinazione sono campionati da processi casuali ed è considerata una interazione molto limitata tra i veicoli; essi sono stati i preferiti da lungo tempo per la modellazione della mobilità in applicazioni di informatica e telecomunicazioni. La loro popolarità è dovuta principalmente alla loro semplicità di applicazione e alle loro proprietà stocastiche che hanno permesso di condurre studi analitici e ottenere risultati facilmente riproducibili. Con l'emergere di applicazioni più specifiche, i modelli sono stati adattati per simulare schemi di mobilità più realistici, mantenendo sempre la loro natura stocastica.

I modelli di flusso considerano l'interazione fisica tra i diversi veicoli e la loro interazione con l'ambiente, modellando la mobilità veicolare con la teoria dei flussi. La categoria dei modelli di flusso si suddivide a sua volta in tre sottoclassi: modellazione microscopica (descrive i parametri di mobilità di uno specifico veicolo rispetto agli altri); modellazione macroscopica (che non prende in considerazione i parametri di mobilità di un veicolo specifico, ma piuttosto modella quantità a livello macroscopico come flusso, velocità, densità); modellazione mesoscopica (descrive i flussi di traffico ad un livello di dettaglio intermedio).

Per quanto riguarda i modelli di traffico, essi descrivono i modelli di viaggio e di percorso, in cui o ogni vettura ha un singolo viaggio o un percorso, o un flusso di auto è assegnato a viaggi o percorsi. Inoltre, descrivono anche l'impatto del tempo su questi modelli.

I modelli comportamentali invece, non si basano su regole predefinite ma si adattano dinamicamente ad una particolare situazione imitando comportamenti umani, come gli aspetti sociali e l'apprendimento dinamico. Essi sono particolarmente interessanti in quanto i conducenti sono ovviamente lontani dall'essere macchine e non possono essere programmati per seguire un determinato comportamento in tutti i casi; essi rispondono invece agli stimoli e perturbazioni locali che possono avere un effetto globale sulla modellazione della mobilità.

I modelli di mobilità trace-based infine, propongono un approccio diverso: invece di sviluppare modelli complessi e poi tararli utilizzando tracce di mobilità o rilevazioni, cercano di estrarre direttamente modelli di mobilità generici dalle tracce di mobilità.

Sarà analizzata in dettaglio ognuna di queste categorie di modelli di mobilità e per ognuna di esse saranno descritti e analizzati i modelli più importanti. Dopo lo studio e l'analisi dei modelli di mobilità sarà affrontata la problematica dell'integrazione dei simulatori di mobilità con i simulatori di rete. Inizialmente, i modelli di mobilità non erano stati creati per comunicare con i simulatori di rete poiché venivano utilizzati per condurre studi separati che non prevedevano interazioni con i simulatori di rete; ma con la nascita e lo sviluppo delle reti VANET, in cui la comunicazione può alterare la mobilità, e la mobilità può migliorare la capacità della rete, la comunità VANET ha lavorato, specialmente negli ultimi anni, per definire delle interfacce di comunicazione efficienti tra i simulatori di rete e quelli di mobilità. Esistono tre possibili tipologie di interazione tra i modelli di mobilità e i simulatori di rete: isolata, incorporata e federata. Nel caso isolato, le tracce di mobilità veicolare sono staticamente generate e analizzate

da un simulatore di rete; nessuna interazione specifica è definita o possibile tra il simulatore di rete e quello di traffico.

Nel caso incorporato, invece, un simulatore di traffico veicolare è incorporato in un simulatore di rete, o viceversa un simulatore di rete è incorporato in un simulatore di traffico veicolare; in pratica è presente un'interazione bidirezionale tra i due simulatori. Infine, nel caso federato, un simulatore di traffico veicolare non è incluso, ma federato con un simulatore di rete attraverso una interfaccia di comunicazione che controlla le informazioni scambiate tra i due simulatori. Grazie alla caratteristica della federazione, possono essere aggiunti più simulatori di mobilità ad un simulatore di rete.

La parte finale di questo lavoro sarà dedicata all'implementazione in Java di un generatore di tracce di mobilità, costituito da una parte logica che si occupa della generazione di tracce di mobilità per un dato numero di veicoli, ed in base ad uno specifico modello di mobilità. Oltre alla parte logica sarà realizzata anche una semplice interfaccia grafica che permetterà all'utente di visualizzare il movimento dei veicoli in base alle tracce generate.

Le tracce di mobilità generate attraverso il generatore di tracce di mobilità saranno successivamente date in input ad un simulatore di rete prodotto e messo a disposizione dal Laboratorio di Telematica, il quale produrrà delle statistiche che saranno oggetto di discussione, studio ed analisi approfondita nella parte conclusiva di questo elaborato.