

Indice

Introduzione	1
Capitolo 1 - Le comunicazioni wireless.....	1
1.1 Introduzione.....	1
1.2 Sistemi cellulari	1
1.2.1 Storia	2
1.2.2 La telefonia cellulare.....	3
1.2.3 La prima generazione di sistemi radiomobili	3
1.2.4 La seconda generazione di sistemi cellulari.....	5
1.2.4.1 Il GSM (Global System for Mobile Communications)	7
1.2.5 La terza generazione di sistemi cellulari (UMTS).....	8
1.2.5.1 Obiettivi e requisiti	8
1.2.5.2 Proposte per l'interfaccia aerea dei sistemi cellulari di terza generazione	9
1.3 LAN senza fili (WLAN)	9
1.3.1 Storia	9
1.3.2 Dispositivi.....	10
1.3.3 Wireless LAN.....	10
1.3.3.1 Lo standard IEEE 802.11 e le sue estensioni.....	11
1.3.4 Bluetooth	22
1.3.4.1 Connessioni.....	22
1.3.4.2 Topologia della rete.....	23
1.4 WiMAX.....	24
1.4.1 Caratteristiche	25
1.4.2 Elementi di una rete WiMAX.....	27
Capitolo 2 - QoS e protocolli di prenotazione delle risorse	29
2.1 Introduzione.....	29
2.2 Il modello dei Servizi Integrati.....	30
2.2.1 Assunzioni del modello IS.....	30
2.2.2 Requisiti per la Qualità del Servizio (QoS).....	31
2.2.3 Requisiti per la condivisione delle risorse.....	32
2.3 Un'infrastruttura di riferimento per l'implementazione di IS	32
2.3.1 Admission Control	33
2.3.2 Il Packet Classifier	33
2.3.3 Il Packet Scheduler	34
2.3.4 Il protocollo di prenotazione	34
2.3.5 Altri elementi.....	35
2.4 Descrizione delle diverse classi di servizi	35
2.4.1 Parametri di caratterizzazione generale per IS.....	35

2.5	Il servizio Controlled-Load	37
2.5.1	Introduzione al Servizio Controlled-Load	37
2.5.2	Set up di un flusso Controlled-Load	38
2.5.3	Politiche del servizio Controlled-Load	39
2.6	Il Guaranteed Service	39
2.6.1	Presentazione del Guaranteed Service	39
2.6.2	Parametri che caratterizzano un flusso GS	40
2.6.3	Politiche del Guaranteed Service	41
2.7	Il protocollo RSVP	42
2.7.1	Descrizione del protocollo	43
2.8	Il protocollo MRSVP	46
2.8.1	Descrizione del protocollo	48
2.8.1.1	Protocollo proxy-discovery: Discovering Proxy Agents	48
2.8.1.2	Reservation routes: flusso multicast	50
2.8.1.3	Reservation routes: flusso unicast	51
2.8.1.3.1	Unicast routes per flussi unicast	51
2.8.1.3.2	Multicast routes per flussi unicast	52
2.8.1.3.3	Setup delle prenotazioni	52
2.8.1.3.4	Messaggi Path	53
2.8.1.3.5	RSVP encapsulation	53
2.8.1.3.6	Messaggi Resv	54
2.8.1.3.7	Merging delle prenotazioni attive e passive	55
2.8.1.3.8	Switching tra prenotazione attiva e prenotazione passiva	56
2.8.1.3.9	Soft state	56
2.8.1.3.10	Teardown	57
2.8.1.3.11	Conferma	57
2.8.1.3.12	Messaggi di errore	57
Capitolo 3 - Le reti neurali		58
3.1	Introduzione	58
3.2	Cenni storici	58
3.3	Reti neurali biologiche	60
3.4	Neuroni artificiali	62
3.5	Reti neurali artificiali	65
3.5.1	Reti di Hopfield	65
3.5.2	Reti feed-forward multistrato	66
3.5.3	Reti ricorrenti	68
3.5.4	Reti competitive	69
3.6	Apprendimento	70
3.6.1	Apprendimento supervisionato	71
3.6.1.1	Backpropagation	73
3.6.1.2	Hybrid learning	76
3.6.1.3	Reinforcement learning	77
3.6.2	Apprendimento non supervisionato	77
3.7	Problemi di scelta e configurazione del modello RSVP	78

Capitolo 4 - Wireless Information Learning for Dynamic reservation Setup (WILDS)	81
4.1 Introduzione.....	81
4.2 Metodo proposto per la previsione del percorso	82
4.3 Struttura della rete cellulare.....	83
4.3.1 Coordinate.....	87
4.3.2 Direzione	88
4.3.3 Percorso.....	88
4.4 Progettazione delle reti neurali	89
4.4.1 Rete 1	90
4.4.1.1 Dati in input	90
4.4.1.2 Struttura	90
4.4.2 Rete 2	91
4.4.2.1 Dati in input	91
4.4.2.2 Struttura	92
4.4.3 Dati in output.....	93
4.5 Addestramento.....	94
4.5.1 Dati per l'addestramento	95
4.5.2 Smooth Random Mobility Model.....	96
4.6 Correzione dinamica del percorso.....	100
Capitolo 5 - Il simulatore	104
5.1 Introduzione.....	103
5.2 Cenni implementativi.....	103
5.2.1 Framework (NNFW)	104
5.2.1.1 La classe BaseNeuralNet	105
5.2.1.2 La classe Cluster.....	106
5.2.1.3 La classe Linker.....	107
5.2.2 Struttura delle classi.....	108
5.2.2.1 La classe Cella	108
5.2.2.2 La classe Rete	108
5.2.2.3 La classe MovementPrediction.....	109
5.2.2.4 La classe Previsione.....	109
5.2.3 Codice	109
5.3 Metriche di valutazione.....	111
5.3.1 Definizione d'errore	111
5.3.2 Definizione di spreco	111
5.3.3 Indice di bontà.....	112
5.4 Parametri del simulatore	112
5.5 Simulazioni	114
Conclusioni	128
Bibliografia	

Introduzione

L'obiettivo di questa tesi è studiare un modo per garantire una maggior qualità del servizio (*Quality of Service* o *QoS*) fornita da una rete cellulare ad un utente in movimento che fa richiesta di un servizio. Il problema nasce dal fatto che, nello spostarsi, l'utente cambia cella di copertura, e, nel caso di insufficienza di risorse, potrebbe perdere il segnale per la fruizione del servizio.

L'idea per garantire una maggior qualità del servizio è di andare a prenotare alla richiesta del servizio le risorse su ogni cella che l'utente utilizzerà durante tutto il suo percorso. Ma come si fa a conoscere quale percorso l'utente farà, quindi le celle su cui riservare risorse? Attraverso diverse tecniche è possibile prevedere il percorso dell'utente. In particolar modo, utilizzeremo delle particolari strutture, le reti neurali, per predire il percorso dell'utente.

Le comunicazioni wireless rappresentano una tecnologia in rapida espansione che consente all'utente un accesso a reti e servizi senza necessità di cablaggi.

Il concetto di telefonia cellulare indica come il territorio venga diviso in tante celle dotate di stazioni radio che trasmettono su un determinato numero di canali. La copertura delle zone del territorio dipende dalla propagazione del segnale radio.

Si usano due termini tecnici per analizzare la suddivisione del territorio in celle: l'handover e l'interferenza cocanale. L'handover analizza il concetto di "passaggio da una cella ad una contigua"; questa operazione di passaggio è necessaria per evitare le cadute della comunicazione quando si telefona in movimento. L'interferenza cocanale è l'interferenza che si verifica tra celle che utilizzano la stessa banda di frequenza.

La prima generazione di sistemi radiomobili aveva la caratteristica di utilizzare la modulazione di frequenza (FM), per la trasmissione vocale, e la modulazione FSK (*Frequency Shift Keying*) per la segnalazione. La tecnica di accesso radio utilizzata è chiamata FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), con cui lo spettro è suddiviso in tante porzioni, corrispondenti a frequenze portanti differenti. Uno dei difetti della prima generazione è che il numero di canali disponibili era limitato; per giunta se,

durante un collegamento, l'utente mobile usciva dall'area di copertura di una stazione radio base ed entrava in una nuova cella, subiva dapprima una degradazione seguita da un'interruzione del servizio.

Successivamente si decise di passare ad uno standard utilizzando comunicazioni del tipo digitale; si passò così alla seconda generazione di sistemi radiomobili, segnata dall'introduzione del GSM (*Global System for Mobile communications*). La principale differenza di questi sistemi, rispetto a quelli analogici, è che non solo i dati relativi alla segnalazione sono trasmessi in forma digitale, ma anche la voce. I vantaggi principali dei sistemi digitali cellulari, rispetto a quelli analogici, sono molteplici, ma in particolare si ha il supporto di nuovi servizi e maggiore flessibilità per le comunicazioni miste di dati e voce; un potenziale aumento delle capacità e maggiore sicurezza della privacy degli utenti grazie alla capacità di crittografare la comunicazione.

Le richieste emergenti di servizi dati ad elevata velocità ed una migliore efficienza spettrale sono le linee guida dei sistemi radiomobili di terza generazione.

Una Wireless LAN (*Wireless Local Area Network*) è un sistema flessibile di comunicazione da inquadrare come estensione di una LAN cablata. Le *reti locali wireless (wireless LAN)* presentano diversi vantaggi rispetto alle reti wired in quanto, oltre a consentire all'utente di spostarsi senza rinunciare ai servizi di rete, sono notevolmente convenienti dal punto di vista economico, specialmente nei vecchi edifici, dove è difficile installare nuove reti cablate.

Il Bluetooth è una specifica industriale per reti personali senza fili (WPAN: *Wireless Personal Area Network*). Fornisce un metodo standard, economico e sicuro per scambiare informazioni tra dispositivi diversi attraverso una frequenza radiosicura a corto raggio.

Il WiMAX (acronimo di *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) è una tecnologia che consente l'accesso a reti di telecomunicazioni a banda larga e senza fili.

Ha la possibilità, al pari di altre tecnologie wireless, di essere utilizzato su molti tipi di territorio (si possono utilizzare sistemi WiMAX in ambienti dall'urbano al rurale).

Il protocollo internet ha dimostrato la sua capacità di comportarsi in maniera efficiente in compiti molto differenti come consegna di posta (e-mail), trasferimento di file (FTP) o emulazione di terminale (telnet). Tuttavia, le applicazioni real-time non

possono fornire buoni risultati. Con il termine di applicazioni real-time intendiamo applicazioni per le quali il ritardo di consegna dei pacchetti è molto importante. Il protocollo fornisce all'utente quello che viene chiamato un servizio “best-effort”: ogni pacchetto è trattato indipendentemente da ogni nodo e viene semplicemente messo in coda, in attesa di essere inviato a destinazione, senza garanzia di consegna: a maggior ragione non si ha alcuna garanzia riguardo al tempo di consegna dei pacchetti. Sorge perciò la necessità di estendere questo servizio per consentire alle nuove applicazioni real-time di funzionare in maniera ottimale.

I Servizi Integrati (IS) di Internet rappresentano una soluzione al problema della consegna real-time. Offrendo nuove classi di servizio, il modello di Servizi Integrati può fornire all'utente la garanzia che il pacchetto sarà consegnato in tempo. Il servizio best-effort continuerà ad esistere nel modello IS, e all'utente sarà proposto di scegliere tra differenti Qualità di Servizio (QoS), definite da vari parametri come la richiesta di banda per un utente, e un ritardo massimo di trasmissione. Tutti gli utenti devono comunque continuare a beneficiare dell'esistente servizio best-effort.

Il modello dei Servizi Integrati non definisce un nuovo stack IP, ma è una estensione dell'esistente servizio base. È progettato per lavorare in maniera ottimale sia con indirizzamento unicast sia con quello multicast.

Il modello IS assume che la larghezza di banda sia limitata. Una conseguenza di ciò è il fatto che il numero di flussi real-time che un link può sopportare è limitato. In più, si assume che le applicazioni real-time necessitino di un limite superiore al tempo di consegna dei pacchetti.

Esistono differenti tipi di applicazioni, che richiedono differenti QoS dalla rete e fondamentalmente classificabili in: applicazioni “real-time” e applicazioni “elastiche”. Le applicazioni real-time sono spesso applicazioni “di riproduzione”, in cui una sorgente prende un segnale, lo impacchetta e lo trasmette sulla rete. I ricevitori raccolgono i dati e riproducono il segnale. Il segnale è riprodotto con un ritardo fissato dal tempo originale di partenza. Perciò i dati che arrivano dopo il punto di riproduzione sono inutili.

I meccanismi di QoS lavorano assegnando le risorse in modo preferenziale per certi traffici rispetto ad altri; per fare ciò è necessario identificare i diversi tipi di traffico. Il traffico che arriva ai dispositivi della rete è suddiviso, tramite il processo di

classificazione dei pacchetti (packet classification), in flussi distinti. Il traffico di ogni flusso è accodato, adeguatamente, nell'interfaccia di uscita di un nodo della rete, per consentire il corretto proseguimento. Le code sono gestite grazie ad algoritmi che permettono di stabilire a quale velocità il traffico deve proseguire e quante risorse devono essere assegnate ad ogni coda.

RSVP è un protocollo di segnalazione che può essere usato dagli hosts per richiedere una prenotazione delle risorse in una rete. RSVP, può essere considerato come un meccanismo per configurare i dispositivi di indirizzamento del traffico nei nodi della rete. Il protocollo non si occupa di trasportare dati tra le applicazioni, ma solo i parametri necessari alla prenotazione delle risorse: in ogni nodo questi sono passati ad un processo RSVP che provvede a gestire la richiesta di QoS.

Mobile-RSVP è uno schema che propone un'estensione dell'RSVP, in grado di supportare la mobilità degli hosts.

Le reti neurali artificiali sono modelli matematici ispirati alle reti neurali biologiche. Fin dalla prima metà del 1800, le ricerche sulla neurofisiologia hanno evidenziato come il cervello sia composto da un gran numero di cellule nervose (o neuroni) interconnesse, ciascuna delle quali esegue una elaborazione molto semplice. Il comportamento intelligente emerge dal gran numero di elementi e di connessioni tra le cellule.

Una delle caratteristiche principali di un soggetto che definiamo "intelligente" è sicuramente la sua capacità di apprendere. Questa caratteristica esiste anche nei modelli neurali artificiali, i quali sono in grado di configurare i propri parametri interni di funzionamento per adeguarsi agli stimoli esterni, fino a imparare il comportamento desiderato da un numero sufficiente di esempi significativi.

Il *neurone artificiale* è un modello matematico che calcola una funzione, detta *funzione di attivazione*. Gli *ingressi* di tale funzione modellano gli stimoli che il neurone biologico riceve dagli altri neuroni, mentre il risultato calcolato (*uscita*) descrive il segnale trasmesso dal neurone lungo l'assone. Quindi, la funzione di attivazione del neurone artificiale trasforma i valori dell'insieme degli ingressi (*spazio degli ingressi*) in corrispondenti valori nell'insieme delle uscite (*spazio delle uscite*). Il primo modello formale (matematico) di neurone è stato proposto da McCulloch e Pitts nel 1943, ben

prima che i calcolatori digitali si diffondessero. Il modello proposto è basato su diverse semplificazioni del neurone biologico.

Le *reti neurali artificiali* sono ottenute connettendo tra loro i neuroni artificiali. Il comportamento esibito da tali reti mima alcuni comportamenti peculiari del nostro cervello, tra cui le capacità di memorizzare un oggetto, richiamare dalla memoria tale oggetto partendo da una descrizione parziale (come ricordarsi una canzone partendo dalla melodia), generalizzare a partire da esempi e raggruppare oggetti in base alle somiglianze tra essi.

Sebbene tali comportamenti possano essere realizzati collegando i neuroni secondo un qualsiasi schema, l'utilizzo di schemi semplici e ordinati consente lo studio delle proprietà di tali modelli computazionali. Lo schema dei collegamenti è infatti spesso il fattore più caratterizzante dei modelli di rete neurale. Gli schemi più utilizzati sono le *reti di Hopfield*, le *reti feed-forward*, le *reti ricorrenti* e le *reti competitive*.

Le *reti di Hopfield* sono reti completamente connesse: ogni neurone è connesso a ogni altro neurone della rete.

Le *reti feed-forward multistrato* sono così chiamate perché il flusso di informazioni tra i neuroni procede in modo unidirezionale. Si tratta quindi di reti parzialmente connesse, nelle quali i neuroni sono organizzati in sottoinsiemi, detti *strati (layer)*. Gli strati sono ordinati e solo i neuroni di due strati consecutivi sono direttamente connessi. Il primo strato (quello che riceve gli stimoli dall'esterno) viene detto *strato di ingresso*, mentre l'ultimo strato (quello che fornisce la risposta della rete) viene detto *strato di uscita*. Gli strati intermedi vengono detti *strati nascosti (hidden layer)*.

Le *reti ricorrenti* sono reti multistrato parzialmente connesse in cui le risposte di uno o più strati possono essere conservate e fornite come ingresso negli istanti successivi. Il comportamento di queste reti è quindi dinamico: l'uscita fornita da una rete a un certo istante non dipende solo dallo stimolo fornito in ingresso all'istante considerato, ma anche dalla storia passata. La conservazione delle informazioni degli istanti precedenti è affidata a connessioni con ritardo temporale (*retroazione*).

Le *reti competitive* sono modelli neurali che si auto-organizzano in modo da essere in grado di individuare gli aspetti che caratterizzano o differenziano gli esempi di un dato insieme. Esse strutturano i propri neuroni in modo che ciascuno rappresenti un sottoinsieme degli esempi presentati alla rete in apprendimento. Ogni neurone della

rete è quindi in competizione con gli altri per rappresentare il maggior numero possibile di esempi simili.

Il comportamento effettivo di una rete neurale, cioè la funzione esibita all'esterno, dipende dalla configurazione dei suoi parametri. Tramite un opportuno algoritmo, detto di *apprendimento (learning)* o *addestramento (training)*, la scelta dei valori dei parametri della rete può essere effettuata a partire da un insieme di esempi del comportamento desiderato. Al termine dell'apprendimento, la rete neurale deve essere in grado di *generalizzare* il comportamento descritto dagli esempi presentati durante la fase di configurazione, cioè deve essere capace di produrre una risposta significativa anche se sollecitata da un ingresso mai utilizzato in apprendimento.

Si possono individuare due categorie di algoritmi di apprendimento: l'*apprendimento supervisionato* e l'*apprendimento non supervisionato*. Nell'*apprendimento supervisionato*, sono fornite alla rete neurale le coppie composte dall'insieme degli esempi da applicare agli ingressi della rete stessa e dai corrispondenti valori che si desidera siano prodotti in uscita. Nell'*apprendimento non supervisionato*, è fornito solo l'insieme degli esempi da applicare agli ingressi ed è la rete neurale che autonomamente organizza la propria configurazione.

Tra i vari algoritmi di apprendimento supervisionato sono qui presentati alcuni particolarmente significativi: l'algoritmo di *retropropagazione (backpropagation)*, l'*apprendimento ibrido (hybrid learning)*, e l'*apprendimento per rinforzo (reinforcement learning)*.

L'algoritmo detto *retropropagazione (backpropagation)* è quello più utilizzato per l'apprendimento supervisionato. Questa tecnica si basa sulla valutazione dell'errore commesso dalla rete neurale in funzione dei parametri della rete stessa e sulla sua diminuzione tramite una modifica dei parametri operata nella direzione del gradiente della funzione errore. Per via della necessità di calcolare il gradiente della funzione calcolata dalla rete neurale, tale tecnica può essere utilizzata solo se la funzione di attivazione dei neuroni è derivabile rispetto ai parametri da configurare.

L'apprendimento non supervisionato è utilizzato per reti neurali che devono scoprire regolarità (*pattern*) nell'insieme degli esempi utilizzati per l'apprendimento, in modo che emergano le regolarità che caratterizzano questi esempi. L'apprendimento non supervisionato è quindi possibile solo quando gli esempi contengono qualche tipo di ridondanza.

Per utilizzare le reti neurali in un problema reale è necessario scegliere la topologia della rete, il modello di neurone, il numero di neuroni, e l'algoritmo di apprendimento da adottare.

Il problema da risolvere fornisce una prima indicazione per la scelta del modello, in base all'esperienza accumulata in letteratura. La scelta del modello di neurone da impiegare è legata all'algoritmo di addestramento ed al tipo di uscite che si desiderano. Il numero di neuroni determina il numero di parametri da configurare. La scelta di tale valore è spesso ottenuta bilanciando vincoli contrastanti: un numero elevato di neuroni consente, potenzialmente, una maggiore accuratezza nella rappresentazione della funzione che approssima l'insieme degli esempi, ma richiede anche un elevato tempo di addestramento. Inoltre, il numero di neuroni è anche legato al numero di esempi disponibili.

Per problemi semplici la valutazione della capacità di generalizzazione di una rete neurale può essere di tipo qualitativo, ma problemi di reale interesse applicativo richiedono una valutazione quantitativa della soluzione ottenuta: una volta terminato l'addestramento, si deve essere in grado di fornire una misura delle prestazioni di una rete neurale.

I problemi che tipicamente si devono affrontare nell'apprendimento sono di due tipi, apparentemente di carattere opposto: la rete neurale non riesce ad apprendere gli esempi oppure li apprende fin troppo bene.

In un sistema wireless mobile, un utente deve avere l'accesso mentre transita da un luogo ad un altro. Questo problema è chiamato gestione della mobilità.

Se la rete potesse prevedere dove l'utente si trova, allora una considerevole quantità di banda potrebbe essere salvata e le risorse potrebbero essere ottimizzate nella gestione della mobilità.

La previsione è considerata come una delle dirette applicazioni dei sistemi di intelligenza artificiale. Di solito si ha una grande quantità di dati che deve essere interpretata in modo da estrarre conoscenza da questa informazione. Tale conoscenza può essere estremamente utile per ottimizzare le risorse e fornire servizi intelligenti. La previsione tenta di formare i modelli che le consentono di predire i successivi eventi a partire dai dati disponibili.

L'obiettivo è prevedere il movimento di un utente in una rete wireless. In altre parole, vogliamo predire qual è la prossima posizione che l'utente probabilmente raggiungerà, conoscendo i suoi movimenti passati.

La predizione dei movimenti permetterà alla rete di allocare le risorse in modo efficiente, di migliorare le procedure dell'aggiornamento di posizione e di facilitare le tecniche di ricerca di posizione.

Se si è in grado di predire correttamente dove l'utente andrà si può ridurre il numero di aggiornamenti di posizione espliciti. In altre parole, se il sistema riesce a predire efficientemente il percorso dell'utente, l'utente non dovrà comunicare continuamente alla rete la sua posizione (location update), e la rete non dovrà cercare dove l'utente è (location paging). Riducendo così il numero di messaggi di aggiornamenti che occupano una banda considerevole delle rete.

Oltre a questo risparmio di banda, la rete può pianificare efficientemente le risorse da allocare, cioè può allocare preventivamente le risorse in modo da evitare un'eventuale interruzione del servizio dovuto a scarsità di banda. Consentendo, naturalmente, un aumento della qualità del servizio fornita dalla rete.

Il metodo proposto per la predizione del percorso è basato sull'utilizzo di reti neurali. In particolare si vogliono utilizzare due metodi differenti, sempre mediante l'utilizzo di reti neurali.

Col primo metodo si vuole prevedere il prossimo passo del percorso a partire dalle coordinate della cella corrente, ovvero da dove parte la chiamata, e dalla direzione di spostamento corrente dell'utente. Questo metodo è molto utile nella previsione dello spostamento conoscendo solo la posizione dell'utente, cioè alla richiesta del servizio dove non si hanno informazioni sui precedenti movimenti.

Nel secondo metodo si utilizza, invece, la storia degli spostamenti dell'utente per poter definire il prossimo passo. Questo metodo si utilizza se si conoscono le posizioni precedenti alla corrente. Questa scelta si basa sul fatto che l'utente compie azioni abitudinali, ad esempio percorre ogni giorno la strada da casa a lavoro, e quindi conoscendo la traiettoria iniziale del percorso è semplice predire con correttezza la destinazione dell'utente.

Per garantire una previsione più corretta, cioè per evitare che un utente si sposti in un a posizione non prevista, invece di valutare un singolo movimento da una cella

coperta ad un'altra, andremo a valutare la probabilità che l'utente si sposti in ognuna delle direzioni, andando poi a prenotare su quelle che hanno una probabilità elevata. Con questo approccio, si va a diminuire l'errore di predizione, ma si va incontro ad uno spreco di risorse, che non verranno mai utilizzate. Ovviamente va trovato un buon compromesso tra errore di predizione e spreco.

Per predire un percorso completo si richiama ricorsivamente la rete neurale fornendogli i risultati della previsione precedente, andando prima a costruire gli ingressi corretti per la rete a partire dalle probabilità.

Nel calcolo della previsione completa, nel caso in cui ad un passo ci fosse un errore, esso si ripercuoterà su tutto il resto della previsione, portando ad una previsione errata a partire dall'errore commesso. Per evitare ciò la rete cellulare si preoccuperà di correggere l'errore e avviare una nuova previsione con i dati corretti.

Il simulatore implementato consiste in poche semplici classi che permettono di riprodurre le azioni di una rete cellulare al momento della richiesta di un ipotetico utente. Esso fornisce solo una previsione del percorso dell'utente, andando a tralasciare la gestione della banda e la gestione delle richieste simultanee che, nel nostro caso, non sono importanti ai fini della previsione.

Come già accennato una previsione ha alcuni parametri che la caratterizzano: errore e spreco.

Per errore si intende quando un utente va ad usufruire di un servizio in una cella che non era stata prenotata in anticipo dalla rete cellulare. Quindi l'errore di previsione è il numero di celle su cui l'utente va durante la sua chiamata, ma che non trova banda riservata per esso.

Per spreco si intende quando la rete prenota in anticipo la banda di una cella per un certo utente, ma l'utente non utilizzerà mai questa banda. Quindi lo spreco per una previsione è il numero di celle che vengono prenotate in più rispetto a quelle realmente sufficienti per coprire l'intero percorso.

Per stabilire la bontà della previsione mettiamo in relazione queste due grandezze con un indice che deve rappresentare la qualità della previsione in relazione all'errore della predizione e allo spreco totale.

Il simulatore è stato sviluppato in modo da avere un insieme dei parametri che intervengono direttamente sulla struttura e sull'addestramento delle reti neurali e dei

parametri che modificano il comportamento della previsione. Come ad esempio la soglia di prenotazione della cella che definisce una probabilità minima che uno spostamento deve avere per essere incluso nella previsione del percorso; o il numero di celle massime da prenotare ad ogni passo che serve per limitare che la previsione con soglia bassa, vada a prenotare tutte le celle nell'intorno della cella corrente, limitando il numero di prenotazioni per ogni passo e quindi lo spreco.

Dopo accurate simulazioni si nota che la soglia che garantisce una soluzione migliore (cioè un valore basso dell'indice di bontà) varia dal 15% al 25%. Mentre il numero di celle massime da prenotare per la soluzione ottimale varia da 2 a 3 celle.

Con questi parametri si arriva ad un'accuratezza che va dal 69% al 84% andando però a generare uno spreco di risorse che va dal 10% al 25% delle celle totali della rete cellulare.

I risultati ottenuti dimostrano che è possibile prevedere il percorso di un utente, quindi prenotare in anticipo le risorse destinate ad esso, con errori minimi. Così si migliorano i risultati ottenuti da previsioni effettuate con tecniche "tradizionali" o risultati ottenuti con altre tecniche basate sull'utilizzo di reti neurali.

Minimizzando l'errore si va ad introdurre uno spreco di risorse: Esso è dovuto alla prenotazione di risorse su celle valutate come possibili celle facenti parte del percorso dell'utente, ma effettivamente mai utilizzate dall'utente.