

UNIVERSITÀ DI PISA



FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN TECNOLOGIE INFORMATICHE

TESI DI LAUREA SPECIALISTICA

Scheduling di pacchetti in reti WiMax

Candidato:

Donatella Ermini

Relatore:

Maurizio Bonuccelli

Controrelatore:

Gianluigi Ferrari

ANNO ACCADEMICO 2005/2006

*Alle persone più importanti della mia vita,
per aver creduto in me fino in fondo.
Grazie.*

Ringraziamenti

Desidero ringraziare sinceramente il Professor Maurizio Bonuccelli, per la disponibilità, l'esperienza, l'aiuto ed i consigli che a messo a mia disposizione nello sviluppo di questo lavoro di tesi e per la fiducia che ha dimostrato nei miei confronti.

Desidero ringraziare Antonio, per i preziosissimi consigli e suggerimenti sulla parte implementativa del codice e per il tempo che mi ha concesso.

Ringrazio profondamente i miei genitori, per la lungimiranza con cui hanno creduto nelle mie capacità.

Un grazie è rivolto ai miei amici "di sempre" e a quelli "nuovi", incontrati qui a Pisa, per avermi incoraggiato nei momenti di sconforto e per la simpatia che hanno dimostrato nei miei confronti.

Un pensiero speciale è dedicato ad una persona speciale, ringrazio Matteo dal più profondo del cuore, per essermi stato vicino in modo unico e prezioso.

Indice

Introduzione	9
1 La Tecnologia Wireless WiMax	15
1.1 Che cos'è il WiMax	15
1.2 L'evoluzione dello Standard IEEE 802.16	17
1.3 Vantaggi nell'impiego di WiMax	18
1.3.1 A chi serve?	20
1.3.2 Scenari applicativi di WiMax	22
1.4 Stato attuale della tecnologia	23
1.4.1 802.16d-2004 WiMax	24
1.4.2 802.16e-2005 Mobile Wimax	31
1.5 Tecnologie a confronto	33
1.5.1 802.16d WiMax vs WiFi	35
1.5.2 802.16e Mobile WiMax vs Mo-Fi	36
1.5.3 Mobile WiMax vs 3G	38
1.6 Possibili problemi ed ostacoli	38
1.7 Disponibilità dei prodotti WiMax	39
1.7.1 La tecnologia WiBro in Corea	42
1.7.2 La situazione in Italia	42
1.8 Il WiMax Forum	43
2 Lo Standard 802.16e Mobile WiMax	45
2.1 Le caratteristiche del Mobile WiMax	46
2.2 Il modello di riferimento del WiMax Forum	48
2.2.1 Il "WiMax Network Reference Model" (NRM)	49

2.3	Il modello di riferimento dello standard 802.16e	52
2.4	Il livello fisico (PHY)	53
2.4.1	OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access	53
2.4.2	TDD: Time Division Duplexing	55
2.4.3	Struttura dei frame OFDMA / TDD	55
2.4.4	Allocazione delle sottoportanti	58
2.4.5	Ranging	58
2.4.6	HARQ: Hybrid Automatic Repeat reQuest	59
2.4.7	Modulazione e Codifica Adattative	59
2.5	Il livello di Medium Access Control (MAC)	60
2.5.1	I sottolivelli del livello MAC	61
2.5.2	Le Service Data Unit (SDU)	62
2.5.3	Le Protocol Data Unit (PDU)	63
2.5.4	Indirizzamento e connessioni	66
2.5.5	Meccanismi per la richiesta di banda	67
2.5.6	Meccanismo di Accesso ed Inizializzazione della Rete	68
2.5.7	Supporto alla Qualità del Servizio (QoS)	71
3	Il MAC Scheduling nello Standard 802.16e	76
3.1	Le funzioni della QoS	77
3.1.1	UGS - Unsolicited Grant Services	80
3.1.2	rtPS - real time Polling Services	80
3.1.3	nrtPS - non real time Polling Services	80
3.1.4	BE - Best Effort Services	81
3.1.5	Il meccanismo di "Quality of Service" nel livello MAC	81
3.2	Le funzioni dello scheduling	82
3.3	Il "Management Reference Model" della rete 802.16e per la QoS	84
3.4	Il <i>MAC scheduling</i> dell'802.16 nella letteratura	85
3.5	Considerazioni sui meccanismi di QoS presenti in letteratura	90
4	Un Nuovo Algoritmo di MAC Scheduling	92
4.1	Perchè un nuovo algoritmo di <i>MAC Scheduling</i>	93
4.2	L'algoritmo EDF (<i>Earliest Deadline First</i>)	95
4.3	Modello di riferimento adottato dallo scheduling	97

4.4	Il nuovo algoritmo di scheduling per il livello MAC	98
4.4.1	Implementazione dell'algoritmo	100
4.4.2	Un esempio di funzionamento	104
4.5	L'algoritmo di MAC Scheduling per il confronto	110
4.5.1	Implementazione dell'algoritmo	111
5	L'Applicazione "WiMaxSimulator"	118
5.1	Architettura dell'Applicazione	119
5.1.1	Componente "WiMaxSimulator"	119
5.1.2	Componente "CommonScheduler"	122
5.2	"Modulo di Debugging" dell'Applicazione	125
6	Le Simulazioni	127
6.1	I parametri delle simulazioni	128
6.2	Le metriche di valutazione	130
6.3	La simulazione degli algoritmi di scheduling	131
6.4	Esecuzione delle simulazioni	131
6.4.1	Primo Gruppo di Simulazioni: 40 Richieste di Servizio . .	132
6.4.2	Secondo Gruppo di simulazioni: 80 Richieste di Servizio .	136
6.4.3	Terzo Gruppo di simulazioni: 120 Richieste di Servizio . .	138
6.4.4	Quarto Gruppo di simulazioni: 160 Richieste di Servizio .	140
	Conclusioni	143
A	Dati delle Simulazioni	145

Elenco delle figure

1.1	Standard IEEE per le reti wireless	16
1.2	Evoluzione dello Standard IEEE 802.16	18
1.3	Scenario applicativo di WiMax	19
1.4	Integrazione di WiMax con le tecnologie esistenti	20
1.5	Le applicazioni fornite dal WiMax	21
1.6	Cellular Backhaul	22
1.7	Wireless Service Provider Access Network	23
1.8	Tipologie di accesso delle reti WiMax	24
1.9	Migrazione dei sistemi WiMax dalla versione fissa a quella mobile	25
1.10	Base Station (BS) e Subscriber Station (SS)	26
1.11	Condizioni di Line of Sight e Non Line of Sight	26
1.12	Il ruolo di WiMax nel panorama delle tecnologie a banda larga .	34
1.13	Confronto fra le tecnologie WiFi e WiMax	35
1.14	Confronto fra le tecnologie MoFi e WiMax	37
1.15	Timetable per la certificazione e commercializzazione dei prodotti WiMax	40
2.1	WiMax Network Reference Model	49
2.2	WiMax Network IP-Based Architecture	50
2.3	Base Station e Subscriber Station	51
2.4	Modello di riferimento per una Subscriber Station	52
2.5	Modello di riferimento per una Base Station	53
2.6	Uplink in OFDM ed OFDMA	54
2.7	Modalità di duplexing TDD, FDD e H-FDD	55

2.8	Esempio di struttura di un frame OFDMA nella modalità di duplexing TDD	56
2.9	Struttura del frame OFDMA	57
2.10	Struttura delle sottoportanti OFDMA	58
2.11	Esempio di codifica adattativa	59
2.12	I livelli dello standard 802.16e	60
2.13	Struttura della MAC SDU	62
2.14	Classificazione dei SDU sui CID	63
2.15	Struttura delle MAC PDU	64
2.16	Esempio di concatenazione di una MAC PDU	65
2.17	Le fasi di inizializzazione ed accesso alla rete	69
2.18	Meccanismo di QoS per "multimedia services"	72
2.19	Supporto alla <i>Quality of Service</i>	74
3.1	Struttura dei subframe di downlink e di uplink	77
3.2	Le funzioni della QoS all'interno della BS e delle SS	78
3.3	QoS architecture dell'802.16	83
3.4	Architettura della QoS proposta da A.Ganz ed altri in [18]	86
3.5	Struttura gerarchica dell'allocazione di banda proposta da A.Ganz ed altri in [18]	87
3.6	Struttura gerarchica dell'allocazione di banda	90
4.1	Esempio di struttura di un frame OFDMA nella modalità di duplexing TDD	97
4.2	Esempio di Coda di Richieste ordinate per deadline	105
4.3	Esempio di allocazione dei frame in uplink	106
4.4	Esempio di allocazione dei frame in uplink	107
4.5	Risultati della schedulazione per il frame di uplink	110
5.1	Screen shot della Form di creazione dei servizi e di selezione degli scheduler	120
5.2	Screen shots delle "Code di Richieste" per gli scheduler EDF ed EDFWFQ	122
5.3	Screen shots delle "Code di Richieste" per gli scheduler EDF ed EDFWFQ	123

5.4	Screen shots delle "Code di Richieste" per gli scheduler EDF ed EDFWFQ	124
5.5	Screen shot della griglia di allocazione dei <i>time slot</i> e dei <i>sotto-canali</i> alle richieste degli utenti	125
6.1	Percentuale pacchetti real time persi per gli scheduler EDF e EDF_WFQ per un Numero Totale Richieste = 40	133
6.2	Ritardo medio dei servizi non real time per gli scheduler EDF e EDF_WFQ	135
6.3	Percentuale pacchetti real time persi per gli scheduler EDF e EDF_WFQ per un Numero Totale Richieste = 80	137
6.4	Ritardo medio dei servizi non real time per gli scheduler EDF e EDF_WFQ con Numero Totale Richieste = 80	137
6.5	Percentuale pacchetti real time persi per gli scheduler EDF e EDF_WFQ per un Numero Totale Richieste = 120	139
6.6	Ritardo medio dei servizi non real time per gli scheduler EDF e EDF_WFQ con Numero Totale Richieste = 120	140
6.7	Percentuale pacchetti real time persi per gli scheduler EDF e EDF_WFQ per un Numero Totale Richieste = 160	141
6.8	Ritardo medio dei servizi non real time per gli scheduler EDF e EDF_WFQ con Numero Totale Richieste = 160	142
A.1	Scenario del traffico per il primo gruppo di simulazioni con Numero Totale Richieste = 40	145
A.2	Scenario del traffico per il secondo gruppo di simulazioni con Numero Totale Richieste = 80	146
A.3	Scenario del traffico per il terzo gruppo di simulazioni con Numero Totale Richieste = 120	146
A.4	Scenario del traffico per il quarto gruppo di simulazioni con Numero Totale Richieste = 160	146
A.5	Percentuale di pacchetti real time persi per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 40	146
A.6	Ritardo medio di completamento dei servizi non real time per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 40	147

A.7	Percentuale di pacchetti real time persi per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 80	147
A.8	Ritardo medio di completamento dei servizi non real time per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 80 .	147
A.9	Percentuale di pacchetti real time persi per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 120	147
A.10	Ritardo medio di completamento dei servizi non real time per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 120 .	148
A.11	Percentuale di pacchetti real time persi per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 160	148
A.12	Ritardo medio di completamento dei servizi non real time per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 160 .	148

Introduzione

”Un tempo il pesce grosso mangiava quello piccolo, oggi il pesce veloce mangia prima di quello lento”.

La citazione è di Federico Faggin, uno dei padri del *Microprocessore*. In realtà, la considerazione può essere estesa a vario contesti, compreso quello delle ”comunicazioni su reti wireless”. Dall’ultimo decennio a questa parte infatti, stiamo assistendo ad un sempre maggiore interesse verso il mondo delle comunicazioni ”*senza fili*”, sia dal punto di vista dei fornitori dei sistemi di rete, continuamente alla ricerca di nuovi mercati da esplorare, sia dal punto di vista degli utenti, continuamente alla ricerca di servizi sempre migliori ed innovativi da utilizzare. Basti pensare ai nuovi servizi di ”*videofonia*”, ”*videoconferenza*”, ”*videosorveglianza*”, basati sulle tecnologie di trasmissione *real-time*, dove la ”*velocità di trasmissione dei dati*” rappresenta un parametro essenziale per mantenere una qualità video accettabile. Il panorama dei sistemi di comunicazione funzionanti ”*ad onde radio*” è molto vasto, popolato da varie tecnologie, ognuna con le sue caratteristiche peculiari e pronta a soddisfare ogni tipo di esigenza. Ad esempio, uno dei sistemi attualmente più collaudati ed utilizzati nel mondo delle WLAN (*Wireless Local Area Network*), è rappresentato dallo Standard 802.11, meglio conosciuto con il nome commerciale di WiFi (*Wireless Fidelity*), il cui grande successo è dovuto ad oggi principalmente, alla ”stabilità” di funzionamento raggiunta dopo quasi dieci anni di revisioni dello standard (il primo è stato rilasciato nel 1997). I maggiori punti di forza sono rappresentati dalla relativa economicità e rapidità di attivazione e dalle velocità di trasmissione dei dati (fino a 54 Mbps, su un canale di 20 MHz, ad una distanza massima di 300 metri). I maggiori punti di debolezza invece, sono rappresentati dal ”raggio

d'azione" limitato, fino a 300 metri e dalla necessità di richiedere una "linea diretta di vista" con il dispositivo utente.

Nel panorama delle PAN (*Personal Area Network*), si colloca sicuramente in posizione di primo piano, lo standard 802.15, meglio conosciuto con il nome di "Bluetooth". Tale tecnologia consente di creare delle reti di comunicazione wireless "private" a corto raggio (10 metri), ma anche la connessione a reti pubbliche (Internet), tra gruppi di dispositivi che comunicano ad onde radio, fino ad una velocità di 2.1 Mbps. Questo sistema, fornisce un metodo standard, economico e sicuro (ma a corto raggio) per scambiare informazioni tra dispositivi diversi utilizzando onde radio.

Nel mondo delle reti mobili, la maggiore attenzione è rivolta verso la comunicazione mobile di "terza generazione" (3G), meglio conosciuta con il nome di UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*). Essa nasce come standard di sistema multimediale mobile, che consente ai terminali di visualizzare immagini a colori, videochiamate, videoconferenze, VoD (*Video on Demand*), video *real-time*, televisione, Web Broasing, Internet. Grazie al trasferimento dei dati ad alta velocità, l'UMTS consente di arrivare fino a 2 Mbps per utenze a bassa mobilità e fino a 384 kbps per quelle a limitata mobilità.

In questo panorama denso di tecnologie, dove ogni esigenza sembra trovare sempre una soluzione, ha comunque trovato posto un nuovo "attore wireless". Si tratta del "WiMax", acronimo di "**Worldwide Interoperability for Microwave Access**", un marchio di certificazione per prodotti che superano i controlli di *conformità* ed *interoperabilità* per gli standard della famiglia IEEE 802.16. Si tratta di una nuova tecnologia ad estensione metropolitana, di tipo **WMAN** (*Wireless Metropolitan Area Network*), a "**banda larga**" e quindi, con un raggio d'azione ed una velocità di trasmissione, sicuramente molto più ampi rispetto alle soluzioni esistenti. Nasce come alternativa sia alle linee a banda larga fisse di classe xDSL (*Digital Subscriber Line*), nella versione fissa o nomadica **802.16d-2004**, che a quelle mobili come l'UMTS, nella versione mobile **802.16e-2005**. Si propone come soluzione al problema del "*Digital Divide*", servendo l'utenza anche in aree disagiate, non economicamente convenienti o non agevoli da raggiungere dai collegamenti cablati, e come soluzione al problema dell'"*Ultimo Miglio*". I maggiori punti di forza di questa nuova tecnologia sono molteplici:

ad esempio, riesce a coprire fino a 50 Km di raggio anche in assenza di visibilità diretta con il dispositivo utente; raggiunge velocità di trasmissione fino a 75 Mbps (in condizioni ottimali: 20 MHz di canale, LOS Line-Of-Sight, assenza di mobilità); consente la mobilità veicolare dell'utenza garantendo una velocità di trasmissione fino a 15 Mbps, su un canale a 5 MHz e fino ad una distanza di 3 Km; consente l'utilizzo dell'OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), come tecnica di allocazione delle frequenze, in base alla quale, in uno stesso "time slot", è possibile allocare sottocanali diversi ad utenti diversi (sfruttando il fatto che, utenti diversi possano sentire le stesse frequenze in modo diverso); fornisce un livello di MAC (*Medium Access Control*) che garantisce la QoS (*Quality Of Service*) differenziata per ogni tipologia di servizio: voce, video, dati, web, etc. A questo proposito, il livello MAC previsto dallo standard 802.16, consente di organizzare le varie richieste degli utenti in "Classi di Servizio", ognuna con una sua priorità nell'essere servita. Per questo motivo, lo standard prevede la possibilità, per gli sviluppatori ed i fornitori di servizi di rete WiMax, di implementare degli "Schedulatori del Traffico", che consentano di stabilire un ordine nella soddisfazione delle varie richieste da parte degli utenti. Il problema infatti, è particolarmente sentito per la "schedulazione in uplink", cioè riguardo alle richieste di trasmissione delle informazioni, da un utente ad un altro. A tal proposito, lo standard 802.16, prevede l'esistenza di un'entità centralizzata del sistema, una "Base Station" (BS), la quale ha il compito di allocare le molteplici richieste di trasmissione dei dati degli utenti, sul canale di comunicazione, nei tempi e sulle frequenze stabiliti dall'"algoritmo di scheduling" utilizzato. L'"algoritmo di scheduling" eseguito sulla BS, è un elemento strategico per l'efficienza dell'intero sistema WiMax, in quanto decide sulle modalità e sui tempi di utilizzo del canale di comunicazione da parte delle varie richieste di servizio degli utenti. Fin'ora in letteratura, sono stati proposti algoritmi di scheduling che utilizzano la priorità delle classi di servizio, stabilita dallo standard, come ordine di schedulazione delle richieste. Vale a dire, che tale politica, prima soddisfa tutte le richieste di servizio della classe a maggiore priorità, poi tutte quelle a priorità minore, e così via, finchè c'è ancora banda disponibile da allocare. Il maggiore svantaggio di tale tecnica, è rappresentato dal fatto che i servizi a priorità minore, come quelli non real time (generalmente,

il traffico di rete non pagante), rischiano di non essere mai schedulati, soprattutto in condizioni di elevato traffico real time (generalmente, il traffico pagante). L'obiettivo di questa tesi, è proprio quello di implementare un "nuovo algoritmo di scheduling", non ancora proposto in letteratura, che permetta di allocare in modo "equo", sul canale di comunicazione, le varie richieste di trasmissione in uplink da parte degli utenti. Un algoritmo che tenga conto di un parametro molto importante, rappresentato dalla "deadline", cioè dal tempo massimo entro il quale il servizio deve essere schedulato, altrimenti diventa inutilizzabile. Secondo questa politica, tutti i servizi, quando raggiungono la propria deadline, hanno il diritto di essere schedulati. Tale algoritmo, verrà poi confrontato con la politica di scheduling descritta in precedenza, anch'essa implementata in questa tesi. Infine, verranno eseguite delle simulazioni, in diverse configurazioni di traffico, per testare e confrontare i comportamenti dei due algoritmi. Per eseguire le simulazioni, è stata implementata, sempre in questa tesi, l'applicazione "WiMax Simulator", la quale si propone come "piattaforma generica" per testare nuovi algoritmi di scheduling che si volessero aggiungere anche in futuro.

Il documento di tesi è composto dall'Introduzione, da sei Capitoli, dalle Conclusioni, da un'appendice e da una bibliografia. In particolare, i sei Capitoli sono articolati nel seguente modo:

- Il primo Capitolo conterrà un'introduzione generale alla tecnologia WiMax;
- Il secondo Capitolo conterrà un'analisi più approfondita della tecnologia WiMax, con maggiore enfasi alla versione mobile dello standard, Mobile WiMax;
- Il terzo Capitolo esporrà una rassegna degli algoritmi di scheduling di pacchetti per reti WiMax, presenti in letteratura;
- Nel quarto Capitolo verranno presentate le implementazioni del nuovo algoritmo di scheduling proposto in questa tesi e quello utilizzato per il confronto proposto in letteratura;
- Il quinto Capitolo fornirà una spiegazione sull'architettura dell'applicazione "WiMax Simulator", implementata per testare e confrontare gli algoritmi di scheduling;

- Il sesto Capitolo esporrà le modalità di esecuzione delle simulazioni e le metriche di valutazione utilizzate per dare un giudizio sulla bontà del nuovo algoritmo di scheduling;

Il documento di tesi terminerà con le Conclusioni, che riassumeranno tutto il lavoro svolto in questa tesi e gli eventuali sviluppi futuri sull'argomento, l'Appendice, che conterrà i dati ed i risultati ottenuti dalle simulazioni degli algoritmi di scheduling e con la bibliografia.

Capitolo 1

La Tecnologia Wireless

WiMax

WiMax, acronimo di "*Worldwide Interoperability for Microwave Access*", rappresenta un marchio di certificazione per prodotti che superano i controlli di *conformità* ed *interoperabilità* per gli standard della famiglia **IEEE 802.16** [30]. L'IEEE 802.16 è il gruppo di lavoro numero 16 dell'IEEE 802, specializzato nell'accesso senza fili a banda larga del genere punto-multipunto.

Mentre il termine 802.16 definisce la *tecnologia standardizzata*, il termine *WiMax*, definisce il nome commerciale, il modo comune con cui riferirsi alla *tecnologia certificata*. Infatti, un dispositivo può rispettare lo standard 802.16, ma non essere considerato un prodotto "*WiMax Forum Certified*", in quanto non rispondente ai requisiti di conformità ed interoperabilità stabiliti dal "*WiMax Forum*" nei cosiddetti "*profili*".

1.1 Che cos'è il WiMax

Si tratta di una nuova tecnologia di rete a banda larga con estensione metropolitana (MAN: *Metropolitan Area Network*) che si colloca nel panorama delle reti wireless (Figura1.1), presentandosi come alternativa, sia alle linee a banda larga fisse di classe xDSL (*Digital Subscriber Line*), nella versione fissa

o nomadica **802.16-2004**, che a quelle mobili come l'UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), nella versione mobile **802.16e-2005**.

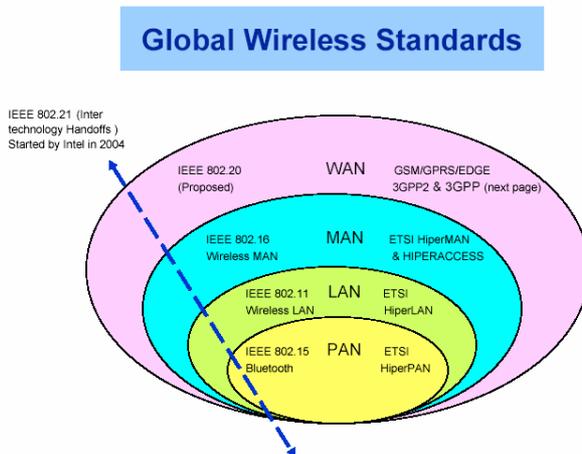


Figura 1.1: Standard IEEE per le reti wireless

I maggiori punti di forza su cui si basa questa nuova tecnologia sono molteplici:

- Coprire una vasta area di servizio: il "WiMax Forum" prevede dei "profili" per le apparecchiature "WiMax Certified", secondo cui una tipica Base Station riuscirà a servire un'area da 3 a 10 Km di raggio in una cella, senza la necessità della visibilità diretta con le Stazioni Utente;
- Raggiungere velocità di trasmissione dei dati fino a 40 Mbps per canale;
- Fornire un'alternativa ai collegamenti cablati (*xDSL*) per risolvere il problema dell'*ultimo miglio*;
- Servire utenti anche in aree disagiate, non economicamente convenienti o non facilmente raggiungibili dai collegamenti cablati, risolvendo, in modo veloce ed economico, il problema del *Digital Divide*;
- Consentire la trasmissione anche in assenza di visibilità diretta (NLOS: *Non Line Of Sight*);
- Supportare simultaneamente, con migliori risultati, decine di connessioni

"business" di tipo 1.5 Mbps e centinaia di connessioni "residenziali" di tipo 256 Kbps;

- Consentire la mobilità veicolare dell'utenza garantendo *bitrate* fino a 15 Mbps per una distanza fino a 3 Km;
- Garantire una QoS (*Quality-of-Service*) differenziata ed adeguata ad ogni tipologia di servizio: voce, dati, video (*triple play*), real-time, browsing, streaming, ftp, etc;

Comunque, è necessario specificare, che la rete WiMax è una nuova tecnologia in piena fase di sperimentazione, i cui buoni propositi sull'eccellenza delle prestazioni, sostenuti dal "*WiMax Forum*", sono a tutt'oggi sul banco di prova. In questa Tesi si farà riferimento alle caratteristiche tecniche ed alle loro applicazioni, così come sono state specificate dallo Standard IEEE 802.16 e dai vari Report pubblicati dalle Aziende e Centri di Ricerca afferenti al "*WiMax Forum*". A questo proposito, allo scopo di promuovere la diffusione commerciale di WiMax è stato costituito il "*WiMax Forum*", un consorzio industriale formato da oltre un centinaio di membri tra operatori di telecomunicazioni, aziende manifatturiere ed enti di ricerca, che si occupa in particolare di sviluppare i profili di apparati, che rispondono alle specifiche WiMax, ed i test di interoperabilità, che un dispositivo deve superare per essere "*WiMax Forum Certified*". A conferma dell'interesse sulla tecnologia, basta citare alcuni nomi degli oltre 100 aderenti riuniti nel "WiMax Forum", come ad esempio: Intel, Motorola, Nokia, Siemens, Alcatel, Alvarion ed alcuni operatori come France Telecom, British Telecom e Qwest.

1.2 L'evoluzione dello Standard IEEE 802.16

WiMax deriva dalla convergenza di due standard, l'**802.16** sviluppato dall'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e l'**HiperMan** sviluppato dall'ETSI (*European Telecommunication Standards Institute*), sebbene si sia radicato l'uso di indicarlo semplicemente come IEEE 802.16 [7].

Storicamente le attività per la messa a punto dello standard sono cominciate nell'agosto del 1998, ma risale al luglio del 1999 la creazione del *Working*

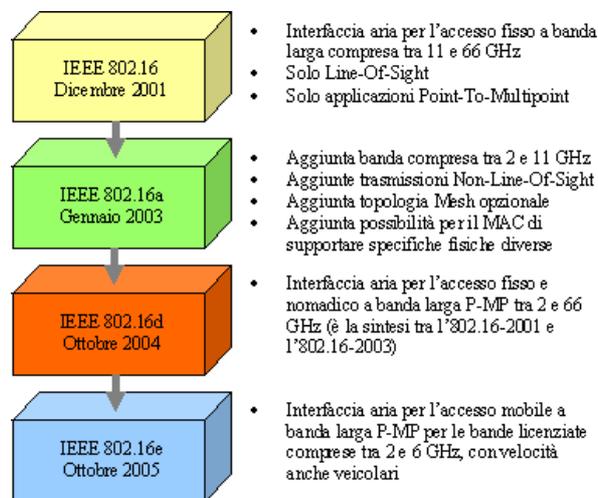


Figura 1.2: Evoluzione dello Standard IEEE 802.16

Group per la sua definizione ufficiale. Nel corso degli anni seguenti si sono avuti vari rilasci ed estensioni, fino all'ultima di ottobre 2004, nota come **802.16d** o **802.16-2004**, che riguarda solo i sistemi fissi e nomadici. Poi, nell'ottobre del 2005 è stato approvato l'emendamento **802.16e-2005**, noto con il nome di "**Mobile WiMax**" che aggiunge anche componenti per la mobilità. Lo standard 802.16 specifica l'interfaccia aria tra la Stazione Base (BS: *Base Station*) e la Stazione Utente (SS: *Subscriber Station*) per il sistema di accesso wireless a banda larga punto-multipunto con estensione metropolitana (WMAN). L'802.16 va ad occupare lo strato fisico (*PHY*), che rappresenta il "livello 1" della pila ISO/OSI, ed il sottostrato MAC (*Media Access Control*), che rappresenta, insieme al LLC (*Logical Link Control*), "il livello 2". Pertanto, l'evoluzione dello standard nel tempo (Figura 1.2), è data dal susseguirsi dei miglioramenti tecnici apportati a questi due livelli.

1.3 Vantaggi nell'impiego di WiMax

Uno dei maggiori punti di forza di WiMax è rappresentato dal fatto che è una tecnologia wireless capace di garantire coperture di ampie aree senza i costi delle infrastrutture tipici degli accessi cablati e con la possibilità di gestire anche l'utenza mobile. In particolare, il WiMax consentirà di servire aree

non raggiungibili in altro modo dal collegamento cablato (rame o fibra ottica) o economicamente non convenienti, consentendo di ridurre anche il problema del *digital divide*. Si sa infatti, che il mercato delle tecnologie attuali è prevalentemente concentrato nei centri urbani, dove la richiesta assume dei valori economicamente vantaggiosi per le aziende; in questo scenario, le zone rurali o depresse sono quasi completamente tagliate fuori a causa del non adeguato ritorno economico dovuto alla percentuale bassissima di utenti che accederebbe al servizio. Adottando la tecnologia WiMax, invece di stendere cavi in fibra per arrivare in piccoli paesini di montagna o in zone rurali, è sufficiente realizzare un collegamento radio tra la dorsale cablata, già presente sul territorio e dei punti di accesso a banda larga per l'utente, pubblici e privati (Figura 1.3).

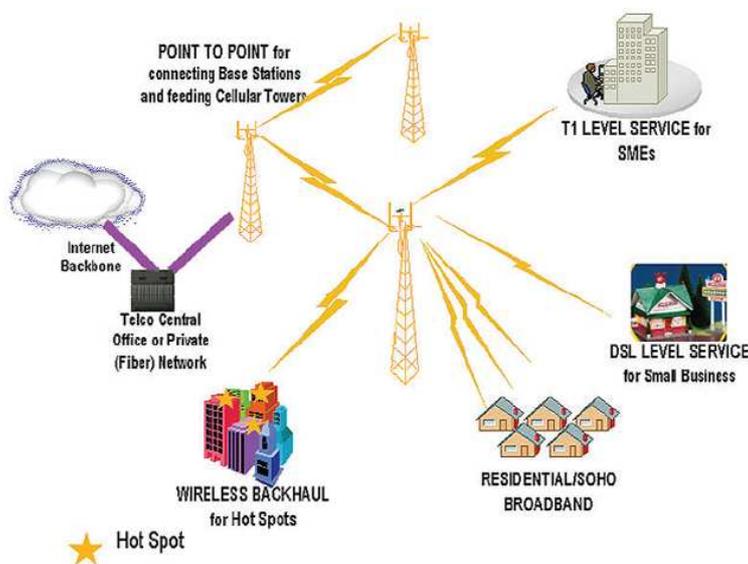


Figura 1.3: Scenario applicativo di WiMax

In questo modo, si può quindi garantire una copertura a banda larga capillare in grado di raggiungere pressoché la totalità della popolazione; ma, poiché non viene steso alcun cavo, l'installazione risulterà più veloce, più semplice da realizzare e soprattutto molto più economica. WiMax permetterà di connettere ad Internet gli *hotspot* IEEE 802.11 (WiFi: *Wireless Fidelity*) e fornirà un'estensione wireless alle connessioni a cavo DSL per l'accesso a banda larga dell'*ultimo miglio*. Bisogna subito specificare quindi, che WiMax non si pone in conflitto con

WiFi ma piuttosto ne costituisce il complemento. Infatti, le reti IEEE 802.16 utilizzano lo stesso protocollo LLC (*Logical Link Control*, standardizzato come IEEE 802.2) delle altre LAN e WAN e pertanto, possono essere collegate ad esse e servire come incanalatori comuni verso ad esempio, la connessione Internet. Quindi, le considerazioni sulla complementarietà a WiFi, si possono estendere anche a tutte le modalità di Ethernet su cablaggio fisico (IEEE 802.3), alle token ring (IEEE 802.5) e agli standard non-IEEE che però utilizzano lo stesso LLC, come FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*) e Cable Modem (DOCSIS: *Data Over Cable Service Interface Specification*, HDTV: *High Definition Television*). Pertanto, WiMax oltre che sostituirsi alle connessioni cablate, riesce anche ad integrarsi con le tecnologie preesistenti, portando l'accesso wireless a banda larga pressochè ovunque (Figura 1.4).

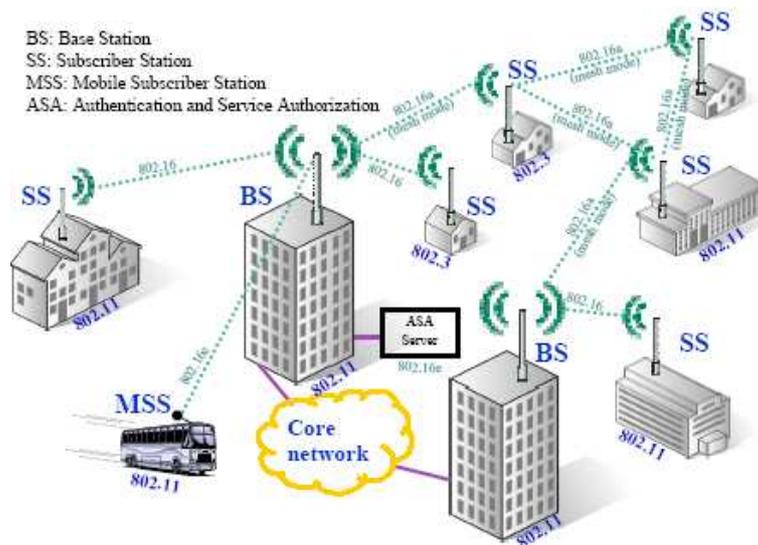


Figura 1.4: Integrazione di WiMax con le tecnologie esistenti

1.3.1 A chi serve?

Le potenzialità di una tecnologia wireless a banda larga della portata di WiMax sono molteplici e di conseguenza anche il mercato risulta essere molto di-

versificato. Il *WiMax Forum* ha previsto un vastissimo impiego della tecnologia WiMax in moltissimi campi di interesse [4]:

- per le aziende e la pubblica amministrazione, che spesso si ritrovano ad avere più sedi nella stessa area urbana, il WiMax sarà la soluzione più efficiente, flessibile ed economica per dotarsi di una rete privata metropolitana;
- i WISP (*Wireless Internet Service Provider*) tramite il WiMax potranno passare dagli attuali *hotspot* alle *hot zone*, cioè servire intere aree urbane, lasciando al WiFi il compito di servire aree circoscritte a più alta concentrazione di traffico;
- per gli operatori di rete fissa il WiMax sarà complementare all'xDSL nella copertura delle aree rurali, mentre per gli operatori alternativi rappresenterà un modo per dotarsi a costi relativamente bassi di una propria infrastruttura di rete a larga banda;

Class Description	Real Time?	Application Type	Bandwidth
Interactive Gaming	Yes	Interactive Gaming	50 - 85 kbps
VoIP, Video Conference	Yes	VoIP	4 - 64 kbps
		Video Phone	32 - 384 kbps
Streaming Media	Yes	Music/Speech	5 - 128 kbps
		Video Clips	20 - 384 kbps
		Movies Streaming	> 2 Mbps
Information Technology	No	Instant Messaging	< 250 byte messages
		Web Browsing	> 500 kbps
		Email (with attachments)	> 500 kbps
Media Content Download (Store and Forward)	No	Bulk Data, Movie Download	> 1 Mbps
		Peer-to-Peer	> 500 kbps

Figura 1.5: Le applicazioni fornite dal WiMax

- gli operatori di rete mobile utilizzeranno il WiMax in un primo momento soprattutto per realizzare una rete di backhaul per riligare le Stazioni Radio Base a costi molto più bassi rispetto all'affitto di linee, ponti radio e soluzioni in WLL (*Wireless Local Loop*), fin'ora utilizzate. In seguito,

forniranno ai loro utenti la possibilità di rimanere collegati ad Internet (*Portable Internet*) e di trasmettere a larga banda, anche in condizioni di mobilità attraverso la rete.

1.3.2 Scenari applicativi di WiMax

Lo standard WiMax è stato sviluppato per rivolgersi ad un'ampia gamma di applicazioni (Figura1.5) e per supportare un elevato numero di scenari applicativi:

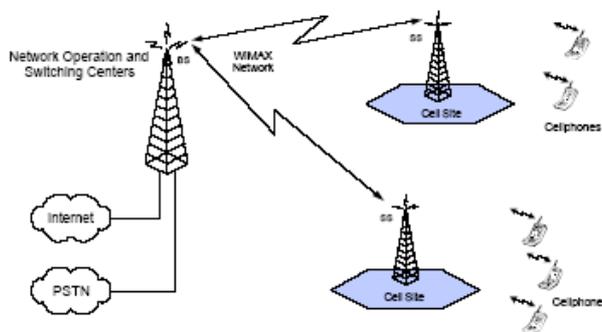


Figura 1.6: Cellular Backhaul

Reti Private

Le reti private sono utilizzate da Organizzazioni, Istituzioni ed Aziende che offrono linee di comunicazione dedicate per il trasferimento sicuro ed affidabile di voce, dati e video.

La velocità e semplicità di sviluppo, sono generalmente le maggiori priorità e le configurazioni sono tipicamente *Point to Point* o *Point to Multi-Point*. Alcuni esempi, sono le "Cellular Backhaul" (Figura1.6), i "Wireless Service Provider Backhaul", le "Banking Networks", le "Educational and Campus Connectivity Networks", le "Public Safety Networks", i "Theme Park Networks".

Reti Pubbliche

Nelle reti pubbliche le risorse sono accessibili e condivise da diversi utenti, incluse le attività aziendali e commerciali e gli utilizzatori singoli privati.

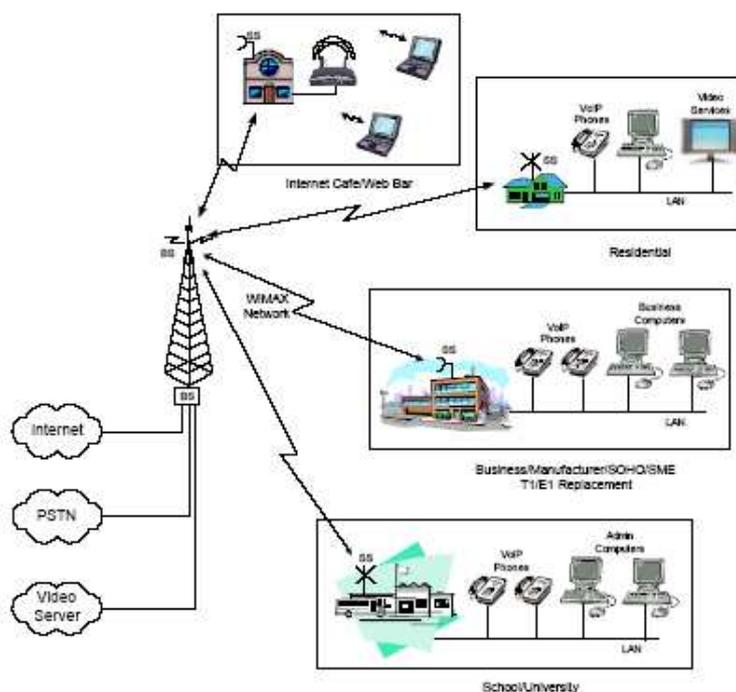


Figura 1.7: Wireless Service Provider Access Network

Generalmente, lo sviluppo di una rete pubblica, richiede investimenti piuttosto elevati, per cui una sua implementazione con tecnologie di tipo "wireline", finisce inevitabilmente per tagliare fuori quella parte di utenza che risiede in zone rurali e difficilmente raggiungibili dai cavi. Una rete wireless come il WiMax invece, semplice ed economica da installare, riuscirebbe a dare connettività anche a quell'utenza non economicamente vantaggiosa da raggiungere. Alcuni esempi, sono le "Wireless Service Provider Access Network" (Figura1.7) e le "Rural Connectivity Networks".

1.4 Stato attuale della tecnologia

Allo stato attuale (prima metà del 2006), all'orizzonte delle comunicazioni wireless a banda larga, si presentano due standard per le reti WiMax, per venire incontro alle diverse tipologie di accesso, supportati ed incentivati dal *WiMax Forum*: uno è l'**802.16-2004** che riguarda i sistemi fissi e nomadici, l'altro è

Definition	Devices	Locations/ Speed	Handoffs	802.16-2004	802.16e
Fixed access	Outdoor and indoor CPEs	Single/ Stationary	No	Yes	Yes
Nomadic access	Indoor CPEs, PCMCIA cards	Multiple/ Stationary	No	Yes	Yes
Portability	Laptop PCMCIA or mini cards	Multiple/ Walking speed	Hard handoffs	No	Yes
Simple mobility	Laptop PCMCIA or mini cards, PDAs or smartphones	Multiple/ Low vehicular speed	Hard handoffs	No	Yes
Full mobility	Laptop PCMCIA or mini cards, PDAs or smartphones	Multiple/ High vehicular speed	Soft handoffs	No	Yes

Figura 1.8: Tipologie di accesso delle reti WiMax

l'**802.16e-2005** che riguarda i sistemi mobili e portatili fino a velocità veicolari. La Figura 1.8 mostra alcune caratteristiche delle reti WiMax, ordinate secondo il livello di mobilità. In realtà, il *WiMax Forum* ha previsto che entro la fine del 2008 i sistemi WiMax migreranno completamente dalla versione fissa e nomadica verso la versione mobile che quindi, consentirà entrambi i tipi di accesso (Figura1.9).

1.4.1 802.16d-2004 WiMax

Nell'ottobre del 2004 è stata pubblicata dall'IEEE la "**Revisione d**" dello standard 802.16, anche nota come 802.16-2004, con le seguenti caratteristiche principali:

- L'architettura di rete "minima" consiste nella presenza di due tipi di dispositivi fissi (non mobili): una "*Base Station*" (BS) ed almeno una "*Subscriber Station*" (SS) (Figura 1.10). La BS regola tutte le comunicazioni della rete, poiché non ci sono comunicazioni dirette tra le SS: ogni SS può instaurare vari tipi di servizio (voce, video, dati) con ogni altra SS, facendoli transitare per la BS, il cui livello MAC (*Medium Access Control*) stabilisce

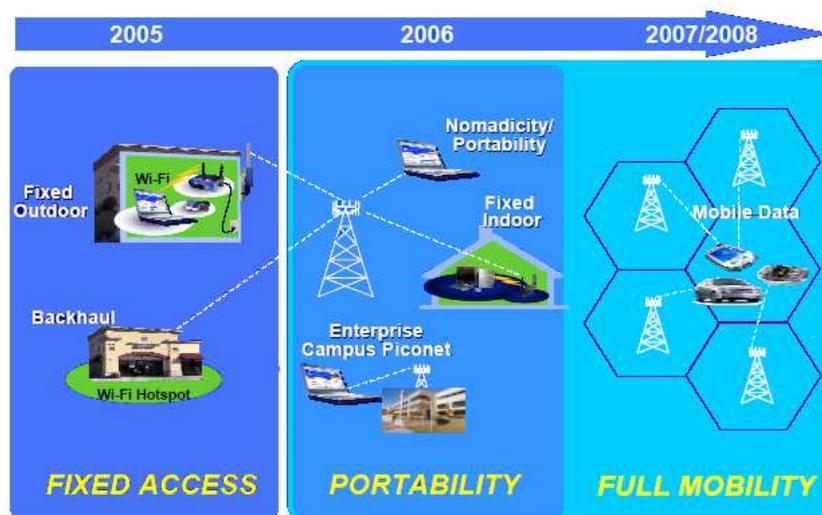


Figura 1.9: Migrazione dei sistemi WiMax dalla versione fissa a quella mobile

un ordine di trasmissione dei pacchetti e garantisce il rispetto dei loro parametri di QoS (*Quality of Service*). Le comunicazioni tra le SS e la BS hanno due direzioni: in *downlink*, dalla BS alle SS, ed in *uplink*, dalle SS alla BS. Il canale di *downlink*, definito come la direzione del flusso dei dati dalla BS verso le SS, è un canale di *broadcast*, sul quale trasmette soltanto la BS, mentre quello di *uplink* è un canale condiviso da tutte le SS, che devono competere per accedervi. Lo standard ammette due modalità di *duplexing*: il FDD (*Frequency Division Duplexing*), secondo cui le trasmissioni in *downlink* ed *uplink* possono avvenire contemporaneamente su bande di frequenza differenti, ed il TDD (*Time Division Duplexing*), secondo cui le trasmissioni in *downlink* ed *uplink* avvengono su tutta la banda di frequenza disponibile ma in tempi diversi.

- Le frequenze radio utilizzate coprono le bande di frequenza (licenziate e non) che vanno da 2 a 66 GHz. In particolare, quelle al di sotto degli 11 GHz sono molto adatte alle trasmissioni NLOS (*Non Line Of Sight*), che si hanno in tutti quei casi in cui si frappone un ostacolo fisico tra la Base Station e la Subscriber Station. Queste frequenze hanno una lunghezza d'onda piuttosto lunga che riesce a superare in parte gli ostacoli, come muri, alberi, ma subisce anche gli effetti del "fading" e del

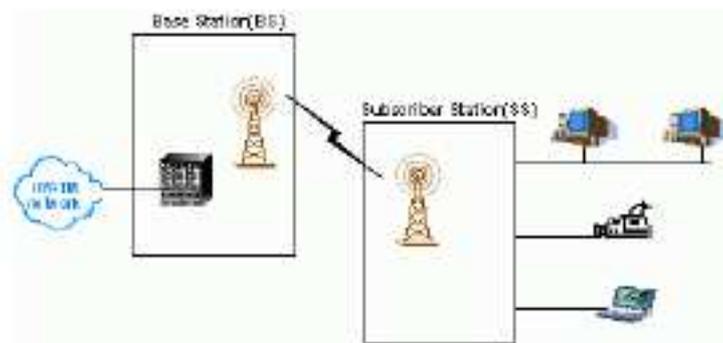


Figura 1.10: Base Station (BS) e Subscriber Station (SS)

"*multipath*". Infatti, le onde radio trasmesse perdono velocemente potenza ed il loro contenuto informativo tende a degradarsi a causa dell'aggiungersi del "*rumore*" (fading) e dei vari rimbalzi e diffrazioni sugli ostacoli (*multipath*). Le sperimentazioni di questo standard sono state condotte fin'ora utilizzando la banda di frequenza sui 3.5 GHz.



Figura 1.11: Condizioni di Line of Sight e Non Line of Sight

- Supporto all'accesso fisso e nomadico in ambienti LOS (*Line of Sight*) e NLOS (*Non Line of Sight*) (Figura1.11) per lo sviluppo di CPE (*Customer*

Premises Equipment) indoor ed outdoor. Sistemi di rete con modalità di connessione PMP (*Point to Multi-Point*), in cui le SS comunicano solo attraverso la BS e *mesh*, in cui esiste la BS, ma le SS possono comunicare anche tra di loro, ed una rete mesh può essere distribuita (maglia) o centralizzata (albero). Il supporto per le basse frequenze (al di sotto degli 11 GHz) è stato aggiunto proprio per consentire gli accessi non in linea di vista con la Stazione Base. Operare in condizioni di NLOS comporta molteplici vantaggi:

- possibilità per le CPE (*Customer Premises Equipment*), cioè i dispositivi utente, di utilizzare antenne indoor, evitando o riducendo i costi di installazione di antenne esterne;
- riduzione delle interferenze generate a causa della più bassa posizione delle antenne della BS;
- maggiore facilità nel reperire siti su cui posizionare la BS;
- minor numero di BS necessarie per coprire la stessa area.

Le complicazioni del NLOS sono legate al fatto che il segnale in ricezione risulta formato da molteplici componenti, generate da riflessioni, scattering e diffrazioni, ognuna con un ritardo, un'attenuazione ed una polarizzazione in generale, differenti rispetto a quelle del segnale trasmesso.

Il recupero del segnale originario, anche nelle difficili condizioni di NLOS, è affidato principalmente, ad uno schema di trasmissione a 256 portanti di tipo OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). La suddivisione del canale in molteplici sottocanali a banda stretta ed ortogonali tra loro, tipica dell'OFDM, consente di confinare i danni provocati dal *fading selettivo* ad un numero ridotto di sottocanali e di poter impiegare un'equalizzazione più semplice rispetto a quella di tipo adattativa richiesta da un unico canale.

Per far fronte alle diverse condizioni di rapporto segnale rumore del collegamento radio, l'802.16 utilizza un sistema di *modulazione adattiva* che dinamicamente seleziona tra sette tipi di modulazione (BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, etc) quello più idoneo alle condizioni di fading del canale radio.

Sono previsti anche degli algoritmi di controllo della potenza, per fare in modo che le CPE, su indicazione della BS, varino dinamicamente la potenza di trasmissione in base alle condizioni di fading del canale trasmissivo, riducendo in tal modo sia i consumi di potenza, sia i livelli di interferenza prodotta.

- Estensione del raggio di copertura lineare fino a 50 Km (limite teorico) di raggio, in condizioni di visibilità diretta della Base Station. Normalmente, le restrizioni regolamentari e la necessità di avere CPE poco costose fanno sì che il raggio di copertura dell'intero sistema sia limitato dalla CPE, cioè in direzione *uplink*. Lo standard prevede l'opzione del *subchanneling*, attraverso il quale si riesce a concentrare la potenza di trasmissione della CPE solo su alcune sottoportanti OFDM, quelle che l'utente riesce a "sentire" meglio, riuscendo così, anche ad estendere il raggio di copertura.
- Velocità di trasmissione dei dati condivisi fino a 70 Mbps (limite teorico) nella modalità LOS e con un'ampiezza di banda intorno ai 20 MHz.
- Lo standard non prevede canali di ampiezza prefissata, poiché ogni Paese presenta una propria regolamentazione nell'uso delle frequenze. Pertanto, ogni canale può avere una banda variabile, consentendo così di utilizzare al meglio le risorse radio. I vincoli da rispettare sono i seguenti:
 - l'ampiezza di un canale deve essere un multiplo intero di 1.25 MHz, 1.5 MHz o 1.75 MHz;
 - l'ampiezza massima di un canale è di 20 MHz.

Pertanto, un operatore che ha a disposizione per esempio, 14 MHz di banda, può scegliere di organizzarla in vari modi: con un unico canale da 14 MHz, con 2 canali da 7 MHz, 4 da 3.5 MHz oppure 8 da 1.75 MHz.

Quindi, l'*IEEE 802.16 Air Interface Specification*, per garantire l'interoperabilità tra i prodotti WiMax dei diversi Paesi, fornisce la possibilità di supportare un certo numero di livelli fisici diversi, che lavorano a diverse bande di frequenza e sotto le varie regolamentazioni dei vari Paesi.

- Lo strato MAC (*Medium Access Control*) è in grado di supportare specifiche multiple dello strato fisico (PHY) e questo aspetto è cruciale per i

produttori di apparecchiature per l'utente finale, che possono così differenziare le loro offerte.

Il MAC Layer prevede la presenza di speciali sottolivelli di convergenza, che hanno il compito di ricondurre ad un unico formato, quello degli SDU (*Service Data Unit*), le connessioni dei livelli di trasporto superiori, sia ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), sia a pacchetto (IPv4, IPv6 o Ethernet), preservando o attivando garanzie di QoS (*Quality of Service*) e di allocazione di banda. Una delle principali funzioni del livello MAC, consiste nel gestire gli accessi multipli alla risorsa radio condivisa applicando una politica di scheduling e di assegnazione della potenza, che garantiscano il rispetto della Qualità del Servizio per le varie tipologie di traffico. Il protocollo MAC è *Connection Oriented*, per cui ogni servizio o applicazione necessita di essere mappato in *una connessione*, indicata con un CID (*Connection Identifier*). Ogni connessione viene identificata dal livello MAC e poi, assegnata alla specifica classe di servizio a cui appartiene e che definisce le sue qualità, come ad esempio, le necessità di scadenze temporali o di una banda di trasmissione minima, etc. L'implementazione delle varie politiche di schedulazione del traffico e di assegnazione delle bande di frequenza alle varie connessioni che ne fanno richiesta, sono completo appannaggio dei fornitori di servizi che le implementano sulle loro Base Station, rispettando comunque, la QoS imposta dallo Standard. Lo standard consente di gestire diverse classi di servizio, che supportano varie tipologie di traffico:

- ***Unsolicited Grant Services (UGS)***: supportano il traffico in real-time composto da pacchetti di dati di dimensione fissa che vengono trasmessi ad intervalli di tempo periodici, come ad esempio il VoIP (*Voice over IP*);
- ***Real Time Polling Services (rtPS)***: supportano il traffico in real-time composto da pacchetti di dati di dimensione variabile che sono trasmessi ad intervalli di tempo periodici, come ad esempio la videoconferenza;
- ***Non Real Time Polling Services (nrtPS)***: supportano il traffico delay-tolerant composto da pacchetti di dati di dimensione variabile

per i quali è richiesto un minimo di *data rate*, come ad esempio, l'FTP (*File Transfer Protocol*) ed il video on-demand;

- **Best Effort (BE) Services:** supportano quel tipo di traffico per il quale non è richiesto alcun livello minimo di servizio e che può essere gestito per così dire, "nei ritagli di tempo".

Il protocollo prevede tecniche di correzione per il recupero dei frame affetti da errore, del tipo ad esempio, *Reed-Solomon FEC*, agevolate dall'uso di codifiche di convoluzione ed algoritmi di interleaving. I frame che non possono essere corretti sono ritrasmessi con il meccanismo dell'ARQ (*Automatic Repeat Request*) o dell'HARQ (*Hybrid ARQ*).

La combinazione di queste tecniche consente di raggiungere livelli di BER pari a 10^{-9} .

- Le specifiche per l'interfaccia aerea includono tecniche di modulazione sia *single-carrier* che *multi-carrier*. In particolare, le tecniche di modulazione multi-carrier sono l'OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) a 256 portanti e l'OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) [31] a 2048 portanti.
- Lo standard prevede tecniche di duplexing sia TDD (*Time Division Duplexing*), che consente di trasmettere e ricevere sullo stesso canale ma in tempi diversi, che FDD (*Frequency Division Duplexing*), che richiede due canali separati da 50-100 MHz per la trasmissione e la ricezione, cioè per l'utilizzo dei canali *downlink* (dalla Base Station alla Subscriber Station) ed *uplink* (dalla SS alla BS). Siccome le reti wireless a banda larga includono vari tipi di servizio, come il WWW (*World Wide Web*), la voce, il video e i dati, il traffico di rete è diventato molto dinamico e sbilanciato tra i canali di *downlink* ed *uplink*. Per questo motivo, la tecnica TDD viene preferita a quella FDD, in quanto offre maggiore flessibilità nell'assegnamento dell'ampiezza di banda all'uno o all'altro flusso, a seconda delle condizioni del traffico. L'utilizzo di una tale tecnica però, richiede anche una sincronizzazione periodica tra chi trasmette e chi riceve, per essere sicuri di ascoltare le comunicazioni corrette. Il *WiMax Forum* si sta indirizzando verso l'utilizzo delle tecniche TDD/OFDM nella modalità fissa

e nomadica, perchè molto più semplici ed efficienti da implementare nei CPE.

- Il problema della sicurezza delle comunicazioni, fortemente trascurato dal WiFi, viene risolto dal WiMax attraverso misure di:
 - autenticazione dei terminali;
 - autenticazione dell'utente tramite EAP (*Extensible Authentication Protocol*);
 - crittografia dei dati tramite DES (*Data Encryption Standard*) o AES (*Advanced Encryption Standard*).
- Lo Standard prevede anche delle tecniche opzionali in grado di migliorare le performance del sistema in termini di *contenimento del rumore*, ad esempio:
 - utilizzo lato BS di antenne intelligenti (AAS - *Adaptive Antenna System*) che conformano la propria area di copertura alla posizione delle CPE, riducendo così al minimo le interferenze;
 - tecniche di trasmissione e ricezione in diversità di polarizzazione.

1.4.2 802.16e-2005 Mobile Wimax

Nell'ottobre del 2005 è stato ufficialmente approvato l'emendamento *802.16e*, noto anche con il nome di "*Mobile WiMax*", che aggiunge alla soluzione fissa e nomadica elementi per la mobilità. Questo vuol dire, che il *Mobile WiMax* possiede tutte le funzionalità della versione fissa e nomadica ed in più, aggiunge quelle per la mobilità.

Le caratteristiche principali del documento approvato dall'IEEE sono le seguenti:

- Le frequenze radio previste coprono le bande dei 2.3, 2.5, 3.3, 3.5 e 5.8 GHz, particolarmente adatte alle connessioni in mobilità non in linea di vista tra la Stazione Base ed i terminali mobili.
- Supporto all'utilizzo della modalità di multiplazione SOFDMA (*Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) che suddivide lo spazio

delle frequenze disponibili in diversi gruppi di portanti in numero variabile, con sottocanali assegnabili a più utenti nello stesso slot temporale. L'allocazione delle portanti nell'OFDMA è stata progettata per minimizzare gli effetti delle interferenze sui dispositivi degli utenti dotati di antenne omnidirezionali.

- Scalabilità nell'occupazione dei canali, da 1.25 a 20 MHz, sulla base della disponibilità di banda. Il profilo della Release-1 *Mobile Wimax* avanzato dal *Wimax Forum* impiegherà canali da 5, 7, 8.75 MHz allocati nelle bande di frequenza licenziate 2.3, 2.5 e 3.5 GHz.
- Supporto all'utilizzo dell'"*Adaptive Antenna Systems*" (AAS) che consente la focalizzazione in ricezione e trasmissione "formando" il fascio radio con mezzi non meccanici ma elettronici.
Supporto all'utilizzo delle antenne MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).
- Miglioramento nella gestione del *soft* ed *hard handoff*, ossia del passaggio di un terminale mobile da una Stazione Base ad un'altra senza perdita di connessione e mantenendo la QoS (*Quality of Service*) ed il SLA (*Service Level Agreement*).
- Gestione del *roaming*, ossia la possibilità per un abbonato di un gestore di connettersi tramite un altro gestore. In realtà, il *WiMax Forum* non prevede di includere il roaming in alcun "profilo" dello standard, visto che è una caratteristica che si colloca ad un livello più alto, rispetto al MAC e al PHY su cui si focalizza lo standard 802.16
- Supporto per il *risparmio energetico* e la modalità di *sleep*, che estendono il tempo di vita della batteria dei terminali mobili
- Tutto quello che è stato detto fin'ora, dovrebbe consentire ad un terminale su veicolo in movimento di rimanere collegato (trasferendo dati) fino ad una velocità di circa 120 Km/h, limite dettato dalle caratteristiche del protocollo di handoff.

Le maggiori differenze tra gli standard **802.16d** e **802.16e** riguardano principalmente le bande di frequenza utilizzate e di conseguenza, i maggiori vantaggi

che ne derivano per le trasmissioni in banda larga a velocità veicolari. Infatti, l'utilizzo di frequenze più basse da parte della versione mobile, intorno ai 2.3 GHz, oltre che agevolare la mobilità dell'utenza senza visibilità diretta con la BS (*Base Station*) ed operare in condizioni di diffrazione (*multipath*), consente anche una maggiore salvaguardia dalle interferenze dovute alla mobilità. Infatti, trattandosi di bande licenziate, ogni operatore acquirente le può utilizzare in esclusiva per la sua utenza, la quale non subirà interferenze da parte degli altri. Un'altra differenza essenziale tra i due sistemi WiMax riguarda l'utilizzo, da parte della versione mobile, della tecnica di modulazione OFDMA, rispetto a quella OFDM, utilizzata dalla versione fissa. In particolare, la tecnica OFDMA fornisce la possibilità di soddisfare contemporaneamente le richieste di più utenti. Questo rappresenta un importante vantaggio in un ambiente con un'elevata mobilità, dove l'utenza in movimento percepisce le condizioni del canale trasmissivo in modo sempre diverso. Infatti, se in una situazione del genere si utilizzasse uno schema TDD/OFDM, alcune frequenze, particolarmente sfavorevoli ad un utente, rimarrebbero inutilizzate all'interno di uno stesso time slot. Invece, utilizzando la tecnica TDD/OFDMA, queste frequenze, sfavorevoli per alcuni, potrebbero essere assegnate con successo ad altri, nello stesso time slot. Inoltre, con l'aggiunta della "Scalability" (SOFDMA) si riesce a variare il numero delle portanti (128, 512, 1024, 2048 FFT) che modulano il segnale e ad assegnarle in modo adeguato all'utente, a seconda di come percepisce le "condizioni" del canale trasmissivo.

1.5 Tecnologie a confronto

Come si è già accennato, WiMax è una tecnologia "interoperabile" e questa caratteristica non si riferisce soltanto alla possibilità per i dispositivi certificati WiMax dei vari produttori, di essere compatibili tra loro, ma si riferisce anche alla possibilità della rete WiMax di poter cooperare con le tecnologie di rete preesistenti, come ad esempio, il WiFi, le reti cellulari di terza (3G) e quarta generazione (4G), le reti di telefonia fissa, le reti cablate del tipo Ethernet, etc. Quindi, per alcuni WiMax rappresenta un "valore aggiunto", grazie al quale poter incrementare le capacità di una rete esistente, mentre per altri può rap-

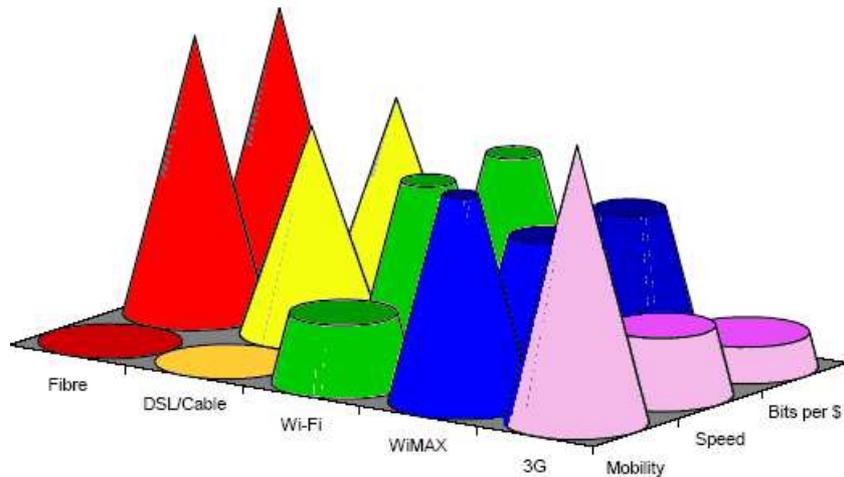


Figura 1.12: Il ruolo di WiMax nel panorama delle tecnologie a banda larga

presentare una tecnologia di "disturbo", che entra in competizione con altre nel mercato dell'accesso a larga banda. Ad esempio, il WiMax fisso può entrare in competizione con le connessioni DSL, a cavo e fibra ottica per l'accesso nelle zone rurali e per la copertura dell'"ultimo miglio", mentre il "WiMax mobile" può entrare in competizione con le reti 3G per offrire una maggiore velocità di trasmissione dei dati per l'utenza in movimento. C'è da dire però, che gli operatori delle reti mobili di terza generazione, vedono più di buon occhio l'aggiornamento veloce di una rete che già utilizzano (e che già hanno pagato a caro prezzo), piuttosto che il dispiegamento di una nuova rete WiMax parallela. La Figura 1.12 mostra il confronto tra le varie architetture a banda larga, tenendo conto dei fattori di *Mobilità*, *Velocità* ed *Economicità*. In particolare, si può notare che la rete WiMax consente una mobilità piuttosto elevata all'utenza, grazie all'inserimento dello standard 802.16e, rispetto ad esempio, alle reti cablate in fibra o al doppino; ma permette velocità di trasmissione un po' più basse rispetto alle stesse, anche se i servizi che offre sono meno costosi per l'utenza. Le reti di telefonia mobile 3G invece, consentono un'elevatissima mobilità all'utenza, ma pur non garantendo velocità di trasmissione particolarmente elevate, richiedono dei costi di fornitura dei servizi piuttosto elevati.

	802.11	802.16d
Raggio	Ottimizzato fino a 100 metri; Topologia Point-to-Point; Progettato per applicazioni indoor che tollerano ritardi fino ad 0.8 ms;	Ottimizzato fino a 50 Km; Topologia Point-to-Multipoint; Progettato per applicazioni che tollerano ritardi fino a 10 ms;
Copertura	Ottimizzato per usi indoor; Supporto per Mesh non previsto dallo standard; Supporto per "Smart Antenna System" proprietario;	Ottimizzato per usi outdoor NLOS; Supporto per Mesh previsto dallo standard; Supporto per "Smart antenna System" avanzato;
Scalabilità	Ampiezza di banda del canale richiesta: 20 MHz; Il livello MAC supporta decine di utenti;	L'ampiezza di banda del canale può essere scelta dagli operatori: scalabile da 1.5 MHz fino a 20 MHz; Il livello MAC supporta centinaia di utenti;
Performance	Massimo "data rate": 54 Mbps in 20 MHz di canale; Massimo 2.7 bps/Hz;	Massimo "data rate": 100 Mbps in 20 MHz di canale; Massimo 5.0 bps/Hz;
Qualità del Servizio	MAC basato sulle contese, non ci sono garanzie di QoS; Lo standard non garantisce contro la latenza per voce e video; Non sono supportati livelli di servizio differenziati per ogni utente; Solo TDD asimmetrico; Lo standard 802.11e propone una QoS basata solo sulla priorità.	MAC basato sull'assegnazione dei "diritti" alle SS di fare richieste di connessioni e di banda; Progettato per supportare voce e video fin dall'inizio; Supporto per livelli di servizio differenziati per ogni utente: ad esempio: T1 per il business, best effort per i consumer; TDD/FDD/HFDD – simmetrico o asimmetrico; Applicazione centralizzata della QoS.

Figura 1.13: Confronto fra le tecnologie WiFi e WiMax

1.5.1 802.16d WiMax vs WiFi

Come si è già accennato, WiMax non si pone necessariamente in competizione con WiFi, anzi, offrendosi come "*WiFi backhaul*", ne può costituire il naturale complemento, estendendo e trasportando il suo traffico, dai 300 metri di distanza (limite massimo per il WiFi), fino ai 50 Km (limite massimo per il WiMax). Pertanto, si verrà a delineare uno scenario in cui si avrà una *Wireless Metropolitan Area Network* (WMAN), che gestirà il traffico di rete sulle lunghe distanze, al cui interno poi, le *Wireless Local Area Network* (WLAN) di tipo WiFi, si specializzeranno sempre di più verso la fornitura di servizi broadband a corto raggio. La figura 1.13 mostra le caratteristiche delle due tecnologie, mettendo a confronto alcuni aspetti importanti nell'implementazione di una rete di comunicazione come l'area di copertura, la velocità di trasmissione, l'ampiezza di banda, etc.

Le differenze importanti tra questi due standard sono date dal livello fisico (PHY) e da quello di controllo di accesso al mezzo (MAC) [2]. In particolare,

a livello fisico, esistono grandi differenze: per esempio, lo standard del WiMax specifica che le dimensioni del canale possono essere comprese tra 1.75 MHz e 20 MHz, mentre i prodotti basati sul WiFi richiedono almeno 20 MHz di ampiezza di banda per canale (22 MHz nella banda di frequenza 2.5 GHz per lo standard 802.11b) e sono specificati soltanto per le bande di frequenza non licenziate ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) e UNII *Unlicensed National Information Infrastructure*. Anche a livello MAC esistono delle differenze rilevanti: ad esempio, il WiFi non ha un meccanismo di QoS, perchè utilizza una tecnica di accesso al mezzo trasmissivo chiamata CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*). Questa tecnica, consente l'accesso multiplo al canale trasmissivo con rilevamento della portante e con la possibilità di evitare le collisioni, ma non fa alcuna distinzione sulla tipologia del servizio che vuole accedere al canale. Il livello MAC di WiMax invece, utilizza la tecnica TDM (*Time Division Multiplexing*) per il canale di *downlink* e la tecnica TDMA (*Time Division Multiple Access*) per il canale di *uplink*, consentendo allo standard di supportare servizi "sensibili al ritardo" come la voce ed il video. Inoltre, il livello MAC di WiMax è dotato di uno *scheduler*, il quale individua e classifica i vari tipi di servizio in connessioni, attribuendo loro una priorità nell'accesso al canale trasmissivo.

In realtà, è importante sottolineare, che i due standard sono stati concepiti per scenari applicativi diversi. Il WiFi è stato pensato principalmente per applicazioni "indoor" e trasmissioni a brevi distanze, per fornire accesso ad Internet a gruppi di computer all'interno di case ed uffici più o meno grandi. Il WiMax invece, è stato ideato principalmente, per fornire elevate velocità di trasmissione sulle lunghe distanze e per risolvere i problemi del "digital divide" e "dell'ultimo miglio".

1.5.2 802.16e Mobile WiMax vs Mo-Fi

Una tecnologia molto interessante in fase di sviluppo è quella proposta dal *Working Group IEEE 802.20* l'11 dicembre del 2002, conosciuta anche con il nome di "*Mobile Fidelity*" o "*Mo-Fi*" [24]. L'IEEE 802.20 è il gruppo di lavoro numero 20 dell'IEEE 802, specializzato nell'accesso senza fili a banda larga in mobilità. L'obiettivo principale del gruppo di lavoro 802.20 è quello di

Description	802.16e	802.20
Vehicular mobility	20-100 km/h	Up to 250 km/h
Mobility Features	Local/Regional Mobility hand-off and roaming support	Global Mobility hand-off and roaming support
Peak data rate DL	70Mbps (14Mhz channel)	16Mbps(5Mhz channel)
Peak data rate UL	70Mbps (14Mhz channel)	3.2Mbps(1.25Mhz channel)
Spectrum	Licensed bands: 2-6 Ghz	Licensed bands up to 3.5 Ghz

Figura 1.14: Confronto fra le tecnologie MoFi e WiMax

sviluppare "da zero" una tecnologia completamente rivolta alla mobilità, che funzioni anche ad elevate velocità, senza doversi preoccupare di raccogliere l'eredità lasciata dalle versioni "non mobili" dello stesso standard, come accade per esempio, tra l'802.16e e l'802.16d. Finora, il gruppo ha sviluppato un insieme di requisiti tecnici per lo standard, ma non ha ancora considerato alcuna proposta tecnica specifica. Tra i sostenitori di questa tecnologia troviamo "Alvarion" ed "ArrayComm", che tra l'altro ha implementato una sua versione commerciale della tecnologia *Mo-Fi*, impiegandola in Australia e nel Sud Africa, ma alcuni analisti, la considerano soltanto come una tecnologia "*di transito*" prima dell'avvento del WiMax.

Entrambi, "*Mobile WiMax*" e "*Mo-Fi*", specificano interfacce radio mobili per l'accesso senza fili a banda larga. Quindi, in apparenza, i due standard sembrano molto simili, ma in realtà, presentano delle differenze sostanziali: infatti, il "*Mobile WiMax*" lavora su frequenze comprese tra 2-6 GHz, mentre il "*Mo-Fi*" sotto i 3.5 GHz; il "*Mobile WiMax*" supporta una mobilità fino a 120-150 Km/h, mentre il "*Mo-Fi*" arriva fino ai 250 Km/h; il "*Mobile WiMax*" rappresenta l'estensione verso la mobilità della versione fissa dello standard, mentre il "*Mo-Fi*" è partito "da zero", non basandosi su proposte precedenti.

1.5.3 Mobile WiMax vs 3G

Alcuni ritengono che il "Mobile WiMax" e le reti cellulari di terza generazione (3G) possano coesistere, senza troppe competizioni, anche se il lento e costoso sviluppo dei servizi 3G in alcuni Paesi, renderebbe il "Mobile WiMax" il competitore ideale. Tuttavia, sebbene abbiano punti di forza e di debolezza differenti, interessi economici e politici suggeriscono che i due potrebbero entrare in conflitto. In particolare, il "Mobile WiMax" potrebbe consentire, sia agli WISPs fissi (*Wireless Internet Service Providers*) che a quelli di telefonia mobile di "seconda categoria", cioè quelli che non hanno acquistato le costose licenze 3G, di sfidare i "più grandi" WISPs ed intaccare così il loro adeguato ritorno economico per i costosi investimenti sostenuti. Infatti, l'acquisto delle bande di frequenza per il "Mobile WiMax", costerà ai "fornitori emergenti" molto meno, rispetto a quello che hanno pagato i "grandi" per l'acquisto delle licenze UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*). Questo fatto, si è già tradotto nella vendita di 721 licenze WiMax, contro le 106 del 3G. Il Nord America, è stato da sempre il Paese leader per quanto riguarda il numero di licenze WiMax possedute: 394 contro le 186 in Europa, le 97 in Asia e le 49 nella regione del CALA (Caribbean and Latin America).

1.6 Possibili problemi ed ostacoli

Il WiMax è uno degli stadi più avanzati delle tecnologie broadband wireless, un'ovvia evoluzione rispetto al passato, ma che rischia di essere ostacolato dall'impiego di frequenze non adeguate alle sue caratteristiche e questo pertanto, ne limiterà le prestazioni. Si tratta di un problema politico: infatti, in Europa il WiMax si sta attestando su frequenze 3.4 - 3.6 GHz o 3.4 - 3.8 GHz, che sono bande residue, che permetteranno al WiMax soltanto prestazioni limitate. La penetrazione del segnale su queste frequenze, potrebbe dimostrarsi un problema, ancora tutto da verificare. Negli Stati Uniti verranno assegnate al WiMax le frequenze dell'UHF (*Ultra High Frequency*), usate dalla televisione via cavo (ormai soppiantata dal digitale). In Italia invece, le frequenze UHF secondo la legge Gasparri, resteranno in mano agli attuali assegnatari che le utilizzeranno, insieme al digitale terrestre, per moltiplicare i canali. Sarebbero

invece, l'ideale per il WiMax. Inoltre, per quanto riguarda le frequenze stabilite per la sperimentazione, 3.5 GHz, il *Piano Nazionale di Ripartizione delle Frequenze* (PNRF) le aveva già assegnate al "Ministero della Difesa". Per ora, ed almeno fino al 2007, la frequenza 3.5 GHz è stata momentaneamente rilasciata dal "Ministero della Difesa" per consentire anche all'Italia di sperimentare il WiMax, in varie zone del Paese, come ad esempio, in Valle D'Aosta, in Sicilia, in Toscana, etc.

Comunque, bisogna aggiungere, tra l'altro, che le frequenze 3.4 - 3.6 GHz potrebbero andare bene per il WiMax da postazione fissa (802.16-2004), mentre per il "Mobile WiMax" (802.16e), bisognerebbe operare non sopra i 2.5 GHz, per dare larga banda in mobilità, dato che questo tipo di accesso è favorito dall'uso di frequenze basse (si pensi ai cellulari TACS che a volte "prendeivano" meglio dei più moderni GSM). Ma anche qui c'è un problema, rappresentato dal fatto che gli operatori di telefonia mobile hanno già pagato a caro prezzo tali frequenze, che stanno utilizzando per le reti UTMS, e quindi avrebbero in realtà, maggiori interessi nell'incrementare le prestazioni di una rete già implementata e funzionante, piuttosto che installarne una completamente nuova. Quindi, già si partirebbe con il fatto che il "Mobile WiMax" farebbe uso soltanto di frequenze licenziate.

1.7 Disponibilità dei prodotti WiMax

La Figura 1.15 mostra la "tabella cronologica" per la certificazione e la disponibilità commerciale dei prodotti WiMax, redatta dal "WiMax Forum". Il processo di certificazione include test di interoperabilità tra prodotti di diversi fornitori e di conformità ai "profili" definiti dal Forum. Già nel 2004 alcuni grandi città come Los Angeles, New York, Boston, Providence nel Rhode Island, Seattle negli USA, Città del Messico, Dalian e Chengdu in Cina hanno cominciato ad implementare reti "pre-WiMax" che dovrebbero trasformarsi in WiMax nel momento in cui cominceranno le prove per la certificazione dello standard. L'installazione in Città del Messico, partita alla fine del 2003, ha portato nella sua fase finale all'adozione delle prime applicazioni mobili e alla sperimentazione di soluzioni *pre-WiMax* in mobilità.

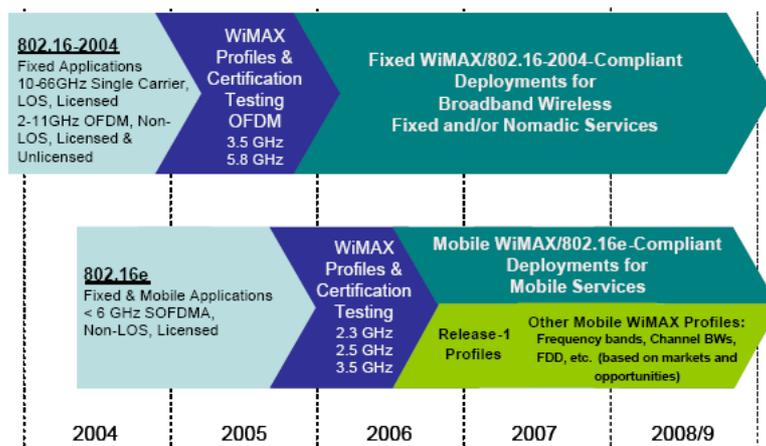


Figura 1.15: Timetable per la certificazione e commercializzazione dei prodotti WiMax

Oltre alle installazioni metropolitane, WiMax, come WiFi, può essere impiantato da piccoli gruppi di persone. Molti produttori già nel 2004 hanno cominciato ad offrire qualche prodotto, di solito ad uno stadio di compatibilità "pre-standard" tale da non poter garantire l'interoperabilità tra i sistemi di diversi fornitori in un intero settore di rete. Numerose compagnie hanno lavorato nel 2005 alla presentazione di chipsets aderenti allo standard e di dispositivi elettronici digitali in forma compressa e miniaturizzata. Insieme a questa riduzione delle dimensioni fisiche, ci si possono ragionevolmente aspettare anche delle riduzioni nel prezzo, l'avvio di economie di scala e l'ammortizzazione dei costi per l'ingegnerizzazione ad-hoc dei dispositivi.

Il "WiMax Forum" prevede dei "profili" per le apparecchiature appartenenti alla famiglia dell'802.16, a cui dovranno attenersi gli sviluppatori dei dispositivi per ottenere la certificazione "WiMax Forum Certified". Uno di questi profili ad esempio, prevede la suddivisione di una "cella" in 6 settori, ciascuno in grado di raggiungere una velocità di trasmissione fino a 48 Mbps e di servire un massimo di 2048 connessioni fisse. Per quanto riguarda il "Mobile WiMax" lo stesso Forum prevede di raggiungere una banda condivisa fino a 15 Mbps all'interno di una cella di circa 3 Km di raggio, ad una velocità veicolare massima di 120 Km/h. Altre istituzioni invece, sostengono che i vantaggi del WiMax sono sovrastimati e le previsioni troppo ottimistiche. In una relazione redatta

per il "CDMA Development Group", il "Signals Research Group" sostiene che lo standard 802.16-2004 dovrebbe essere in grado di raggiungere throughput di 11 Mbps, assumendo l'utilizzo di un'antenna esterna e l'allocazione di 3.5 MHz di canale, nello spettro di frequenza dei 3.5 GHz. Inoltre, sostengono che in condizioni di *Non Light-of-Sight*, il throughput del sistema, si abbassa fino ad 8 Mbps, all'interno di celle il cui raggio d'azione arriva a 100 metri in dense aree urbane e pochi chilometri in zone rurali.

Va comunque specificato che, ad oggi, non esistono dei risultati che possano essere considerati attendibili ed "imparziali", nell'uno o nell'altro senso, visto che la maggior parte di quelli ottenuti, provengono da aziende produttrici di dispositivi. Inoltre, anche i fornitori di servizi per reti WiMax devono fare delle valutazioni: ad esempio, devono decidere se è più conveniente investire solo sulle apparecchiature della versione fissa e nomadica, le prime ad essere lanciate sul mercato, o se è il caso invece, di investire su dispositivi "*dual-mode*", che potranno passare dalla modalità fissa a quella mobile quando quest'ultima sarà attivata, ma che per il momento, rimarrebbero inutilizzati. A questo proposito, risulta difficile fare una previsione sui costi delle apparecchiature WiMax prima che la tecnologia venga introdotta sul mercato, ma alcune informazioni sono disponibili. Le attrezzature "*pre-WiMax*" saranno piuttosto economiche, come ad esempio, le Subscriber Station della Motorola che saranno vendute a meno di 300 dollari. L'"In-Stat" (uno dei maggiori istituti nel campo delle ricerche di mercato nel settore delle telecomunicazioni negli Stati Uniti) stima che il costo per la messa in opera di una rete WiMax negli Stati Uniti è di circa 3 miliardi di dollari. Anche l'investimento per l'utilizzo dello spettro di frequenza gioca un ruolo importante sul costo totale della rete. Per certi operatori che agiscono su zone rurali e remote, può essere significativo utilizzare frequenze libere, per limitare i costi; mentre, per altri che le hanno già comprate per altri scopi, il maggiore vantaggio potrebbe essere quello di continuare ad usarle anche per il WiMax. In alcuni Paesi comunque, l'acquisto delle frequenze da parte degli operatori pubblici di reti di comunicazione è piuttosto economico, come in Austria, dove la "WiMax Telecom" ha pagato circa 160 mila euro per poter utilizzare la frequenza a 3.5 GHz, aggiudicandosela ad un'asta pubblica.

1.7.1 La tecnologia WiBro in Corea

La tecnologia "WiBro", (*Wireless Broadband*) sviluppata nella Corea del Sud, rappresenta un'applicazione commerciale dello standard IEEE 802.16e (*Mobile WiMax*). Il WiBro è un sistema basato sulla tecnica TDD (*Time Division Duplexing*) che opera con canali radio da 9 MHz alla frequenza di 2.3 GHz, con tecnologia di accesso OFDMA. WiBro supporta utenti mobili che viaggiano a velocità fino a 120 Km/h e data rate fino a 3 Mbps in *downlink* (1 Mbps in *uplink*). In aree altamente popolate però, la media del data rate è di circa 512 Kbps, in una cella di raggio limitato ad 1 Km.

1.7.2 La situazione in Italia

Ad ottobre del 2005 anche l'Italia ha dato il via alla sperimentazione della tecnologia WiMax, sulla frequenza dei 3.5 GHz, rilasciata per l'occasione dal "Ministero della Difesa" a cui era stata assegnata dal "Piano Nazionale di Ripartizione delle Frequenze" (PNRF). Ma i tempi necessari per vedere le prime vere e proprie offerte sono ancora un'incognita, visto che l'effettiva conclusione di tutti i test è stata già prorogata, dalla fine del 2006, alla fine del 2007. Sul "banco di prova" si trovano principalmente, l'efficienza del WiMax quando l'utente e la Stazione Base non sono in linea di vista, il numero degli utenti che possono essere collocati in una cella, la reale velocità di trasmissione di vari tipi di dati (ad esempio, voce, video streaming e real-time, browsing, videoconferenza, videochiamate, etc.), l'effettiva interoperabilità tra gli apparati dei vari fornitori.

La sperimentazione in Italia ha interessato diverse Regioni e coinvolto Enti di Ricerca pubblici e privati ed Aziende che fanno capo alla Fondazione "Ugo Bordonini" supervisionata dal "Ministero delle Telecomunicazioni".

La prima sperimentazione è partita a "Cassina de' Pecchi" dove la Siemens ha i propri laboratori nazionali e secondo l'azienda, sarebbero già riusciti a dare connettività WiMax a tutti gli uffici di Milano.

Più estese invece, sono quelle in Valle D'Aosta: Fastweb, Siemens e Rai stanno sperimentando in località montane, a Champoluc e dintorni. L'obiettivo è quello di dare accesso a banda larga a case ed alberghi di zone turistiche come la Valle D'Ayas, dove partiranno i primi servizi VoIP (*Voice Over IP*) ed accesso

ad Internet, a qualche decina di utenti selezionati. L'infrastruttura è costata appena qualche centinaia di migliaia di euro a Fastweb e Siemens, segno di quanto economico sia sviluppare reti WiMax. Secondo *Siemens Italia*, occorrerebbero soltanto 400 milioni di euro per coprire l'Italia con WiMax e risolvere il problema del "digital divide" grazie a 3.500 antenne. Ma l'Italia su questo fronte è in ritardo, anche perchè c'è ancora molta confusione sulle frequenze da assegnare a WiMax. Fin'ora infatti, la sperimentazione si sta conducendo sulla frequenza dei 3.5 GHz, che va bene per la versione fissa della rete, ma bisogna notare, che piano, piano si sta affiancando anche la versione mobile del WiMax, che funziona decisamente meglio a frequenze più basse, al di sotto dei 3 GHz. Il problema è che in Italia parte di queste frequenze, sono dedicate alle trasmissioni televisive e possono essere liberate solo quando si passerà al digitale terrestre, ma le regole attuali in Italia non vanno in questa direzione. In definitiva quindi, la proroga delle sperimentazioni, consentirà all'Italia di chiarirsi le idee, soprattutto su una tecnologia che non ha ancora una certificazione internazionale, ma che utilizza apparati detti "pre-WiMax".

1.8 Il WiMax Forum

Il *WiMax Forum* è un'organizzazione senza fini di lucro costituita con la finalità di promuovere e certificare la compatibilità e l'interoperabilità dei prodotti BWA (*Broadband Wireless Access*) che utilizzano le specifiche dello standard *IEEE 802.16*. L'obiettivo principale del Forum è quello di accelerare l'introduzione di questi sistemi nel mercato dell'accesso wireless a banda larga. I prodotti "WiMax Forum Certified" saranno completamente interoperabili e supporteranno perfettamente sia applicazioni broadband fisse che mobili. L'organizzazione è impegnata a facilitare l'installazione di reti wireless a banda larga, basate sul suddetto standard, contribuendo ad assicurare la compatibilità e soprattutto l'interoperabilità delle apparecchiature prodotte da diversi fornitori. Questo significa, che un'apparecchiatura "WiMax Forum Certified", prodotta da un fornitore, deve poter funzionare con qualsiasi altra apparecchiatura, sempre certificata, prodotta da un qualsiasi altro fornitore. E da questo punto di vista, il WiMax Forum è riuscito, per la prima volta, a mettere insieme i maggiori

leaders nel campo delle comunicazioni e delle tecnologie informatiche, con l'obiettivo di realizzare una piattaforma comune per lo sviluppo globale di servizi wireless basati sull'IP. L'interesse mondiale per il WiMax sembra crescere di mese in mese, così come il numero dei membri del WiMax Forum che, ad oggi, conta circa 230 afferenti.

Poichè il WiMax è una tecnologia ad ampio respiro, all'interno del Forum si trovano aziende di vari settori: produttori di semiconduttori, come Intel, di hardware, di telefoni cellulari come Siemens, Alcatel e Motorola, operatori di telefonia come British Telecom, France Telecom, Deutsche Telekom, AT&T e fornitori di prodotti WiFi interessati all'evoluzione della nuova tecnologia.

Obiettivo primario del Forum è garantire l'interoperabilità tra i prodotti che saranno certificati WiMax: soltanto a tale condizione si potrà infatti pensare ad un reale abbattimento dei costi degli apparati e dei servizi offerti. Scegliendo apparecchiature interoperabili e basate su standard, gli operatori wireless e i carrier potranno ottenere concreti vantaggi, di cui a cascata beneficeranno anche gli utenti finali.

Nel tentativo di creare un ambiente normativo favorevole alla diffusione dei sistemi WiMax certificati, il *WiMax Forum* ha istituito il "*Regulatory Working Group*" (RWG) che avrà il compito di assicurare la disponibilità e l'armonizzazione di uno spettro di frequenze "WiMax friendly" a livello globale. Questo è un altro aspetto fondamentale, sia per l'abbattimento dei costi degli apparati, sia per lo sviluppo e la diffusione della tecnologia WiMax. Se infatti, si perverrà ad una frequenza di utilizzo armonizzata, cioè comune, in tutta Europa, allora si potranno costruire dispositivi universali che funzioneranno in qualsiasi nazione europea ci si trovi, senza fare costose diversificazioni produttive per ogni Paese. Quindi, anche l'Italia, come il resto dell'Europa, dovrà dare inizio alle procedure di revisione del "*Piano Nazionale di Ripartizione delle Frequenze*" per liberare le frequenze più basse a vantaggio del WiMax, se non vuole, ovviamente, rimanere tagliata fuori dal mercato della nuova tecnologia.

Capitolo 2

Lo Standard 802.16e Mobile

WiMax

Lo standard 802.16 specifica l'interfaccia aerea tra la Stazione Base (BS: *Base Station*) e la Stazione Utente (SS: *Subscriber Station*), per i sistemi di accesso wireless a banda larga punto-multipunto, con estensione metropolitana (WMAN), che offrono servizi multipli, come il trasferimento di voce, di dati ad alta velocità per usi real-time, di videoconferenza, videotelefonia, video-on-demand (VOD), giochi, etc. Lo standard è incentrato principalmente sugli ultimi due livelli della pila protocollare ISO/OSI: il livello di controllo di accesso al mezzo (MAC: *Medium Access Control*) ed il livello fisico (PHY). In particolare, il livello MAC è strutturato in modo da sostenere specifiche di livello fisico multiple, ognuna delle quali si adatta ad un particolare ambiente operativo.

Lo standard 802.16-2004 (versione fissa e nomadica), prevede l'utilizzo delle bande di frequenza comprese tra i 2 e i 60 GHz, ma la necessità pratica del "Non Light-Of-Sight", cioè della non visibilità diretta tra la BS e la SS, richiede l'utilizzo delle frequenze più basse, quelle al di sotto degli 11 GHz. Infatti, data la maggiore lunghezza d'onda delle basse frequenze, non è necessaria la condizione di LOS (*Line-Of-Sight*), anche se poi, si potrebbe presentare il problema del *multipath*, cioè del fatto che le onde radio appartenenti ad uno stesso contenuto informativo, rimbalzando sugli ostacoli, possano arrivare al destinatario anche

in tempi diversi. Comunque, questo effetto può essere limitato con l'utilizzo delle tecniche di moltiplicazione OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e delle antenne adattative (*Adaptive Antenna System*) [1]. La tecnica OFDM applica il principio della "multiuser diversity", un elemento chiave di gestione delle risorse radio per ottenere la massimizzazione del *throughput*. Secondo questo principio, siccome gli utenti possono percepire il canale trasmissivo in modo diverso, è possibile assegnare loro solo quelle bande di frequenza che "sentono" meglio. Se si applicasse solo questo principio però, non si riuscirebbero a garantire gli altri fattori di QoS (*Quality of Service*), come ad esempio, la *priorità* del servizio o il tempo massimo entro cui deve essere soddisfatto, per cui il livello MAC prevede la possibilità di utilizzare degli algoritmi di allocazione della banda che tengano conto anche della priorità del traffico.

Lo standard 802.16e (*Mobile WiMax*) [8] è molto simile ad una rete wireless mobile, in quanto aggiunge la mobilità alla versione fissa, richiedendo però un'accorgimento in più, quello di utilizzare le frequenze più basse, al di sotto dei 3 GHz. In Corea, ad esempio, la rete cellulare "WiBro" (*Wireless Broadband*), che è un'estensione del "Mobile WiMax", utilizza la frequenza 2.3 GHz. Questo standard prevede anche l'utilizzo della tecnica di moltiplicazione SOFDMA (*Scalability Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), particolarmente adatta per la mobilità, in quanto aggiunge flessibilità nell'assegnazione delle frequenze alla multiutenza, la quale percepisce il canale trasmissivo in modo variabile nel tempo a causa degli spostamenti nello spazio.

In questa tesi si è scelto di prendere in considerazione lo Standard **802.16e Mobile WiMax**, poiché racchiude in sé la robustezza e solidità della versione fissa (802.16-2004), insieme alla flessibilità ed innovazione della versione mobile.

2.1 Le caratteristiche del Mobile WiMax

Il "Mobile Technical Group", all'interno del "WiMax Forum", sta sviluppando dei *profili* per i prodotti *Mobile WiMax*, chiamati "Mobile WiMax System Profiles", i quali permetteranno ai dispositivi di essere sviluppati rispettando linee guida valide per tutti, in modo da assicurare l'interoperabilità tra i vari

prodotti. Il profilo "Release-1 Mobile WiMax", recentemente sviluppato dal Forum, consentirà ampiezze di banda del canale da 5, 7, 8.75 e 10 MHz, allocati negli spettri di frequenza licenziati dei 2.3 GHz, 2.5 GHz e 3.5 GHz. Alcune delle più importanti caratteristiche del "Mobile WiMax" messe in luce dal Forum sono:

- **Modalità di Accesso:** lo standard specifica due modalità di accesso al canale trasmissivo wireless, quella "Point-to-Multipoint" (PMP) e quella "Mesh" (opzionale). Con la modalità PMP, la BS serve in broadcast un insieme di SS all'interno dello stesso settore con un'unica antenna, con tutte le SS che ricevono la stessa trasmissione dalla BS. Poiché le trasmissioni sono in broadcast, tutte le SS ascoltano i dati trasmessi dalla BS, ma ogni SS preleva soltanto le informazioni destinate a sé stessa o a tutti. Le trasmissioni delle SS verso l'unica BS, sono dirette e coordinate in modo centralizzato dalla BS. La modalità operativa PMP si adatta bene ad un tipico scenario di reti wireless mobili, dove una moltitudine di utenti che richiede dei servizi, viene servita da un "service provider" centralizzato, grazie al quale può accedere a reti esterne, come *Internet*, o a servizi, come il DVB (*Digital Video Broadcasting*). Con la modalità *Mesh*, il traffico di rete può essere instradato attraverso varie SS, dal mittente al destinatario e la coordinazione degli accessi è distribuita fra le SS.
- **Elevato "Data Rate":** grazie all'utilizzo delle antenne MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) [?], degli schemi di *sub-channelization* e dell'*Advanced Coding and Modulation*, la tecnologia *Mobile WiMax* permette di raggiungere un picco massimo di velocità di trasferimento dati fino a 63 Mbps per settore in *downlink* (DL) e fino a 28 Mbps per settore in *uplink* (UL), in un canale a 10 MHz.
- **Quality of Service (QoS):** la premessa fondamentale del protocollo *IEEE 802.16e MAC* è quella di poter garantire la QoS, schedulando i vari flussi di servizio a seconda della loro priorità. Inoltre, gli schemi di *sub-channelization* e di *signaling* basato su MAP (*Mobile Access Protocol*), offrono un meccanismo flessibile, di tipo *frame-by-frame* per una schedu-

lazione ottimale delle risorse spazio, frequenza e tempo, sull'interfaccia aerea.

- **Scalabilità:** nonostante la crescente globalizzazione economica, l'allocazione delle bande di frequenza per le comunicazioni wireless a banda larga è ancora delle più disparate. Perciò, la tecnologia *Mobile WiMax*, è stata progettata per funzionare con ampiezze di banda che vanno da 1.25 MHz a 20 MHz. Questa possibilità, permette ai diversi utilizzatori di questa tecnologia, di poterla adattare alle necessità dei vari contesti geografici, come ad esempio, fornire l'accesso ad Internet nelle zone rurali o estendere la capacità degli accessi mobili a banda larga fino alle aree suburbane.
- **Sicurezza:** le caratteristiche di sicurezza offerte dal *Mobile WiMax*, riguardano l'autenticazione basata su EAP (*Extensible Authentication Protocol*), la crittografia basata su AES-CCM (*Advanced Encryption Standard*) e gli schemi di protezione del controllo dei messaggi basati su CMAC ed HMAC. Esistono anche supporti per diverse tipologie di credenziali-utente, come ad esempio, le SIM/USIM cards, le Smart Cards, i Digital Certificates e gli schemi Username/Password basati sul metodo EAP più appropriato a seconda del tipo di credenziali.
- **Mobilità:** il *Mobile WiMax* permette schemi ottimizzati di *handover*, con una latenza inferiore ai 50 millisecondi, per garantire le applicazioni real-time, come ad esempio, il VoIP (*Voice over Internet Protocol*), senza degradare le prestazioni del servizio. La flessibilità negli schemi di gestione, garantisce che la sicurezza venga mantenuta anche durante l'esecuzione dell'*handover*.

2.2 Il modello di riferimento del WiMax Forum

Mentre l'IEEE ha definito solo i livelli MAC e PHY dello standard 802.16, il "WiMax Forum Network Working Group" (NWG) sta lavorando alla stesura delle specifiche per la definizione di un'architettura di rete ad alto livello dei sistemi WiMax fissi, nomadici, portatili e mobili, che garantisca l'interoper-

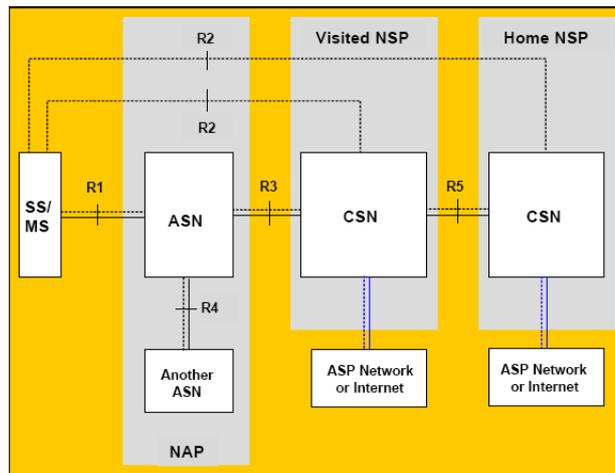


Figura 2.1: WiMax Network Reference Model

abilità non soltanto al livello dell'interfaccia aria, ma anche ai livelli superiori dell'*handover* e dell'accesso alla rete. L'architettura di rete "*Mobile WiMax*" è orientata alla "*commutazione di pacchetto*" e pertanto, completamente basata su una piattaforma *Internet Protocol*.

2.2.1 Il "WiMax Network Reference Model" (NRM)

Il "*WiMax Forum*" ha identificato un "*Modello di Riferimento*" per la rete WiMax (NRM - *Network Reference Model*), che è la rappresentazione logica dell'architettura di rete. Il NRM identifica le entità funzionali ed i punti di interoperabilità tra queste entità. L'architettura è stata sviluppata con l'obiettivo di fornire un supporto comune a quelle funzionalità necessarie allo sviluppo di un modello di rete e dei suoi scenari applicativi. La Figura 2.1 mostra le entità logiche (MS, ASN e CNS) contenute nel NRM ed i loro punti di interconnessione. Ciascuna funzionalità può essere realizzata in un singolo dispositivo fisico o può essere distribuita fra più dispositivi. Il raggruppamento o la distribuzione delle funzionalità nei dispositivi fisici è una scelta di implementazione da parte dei produttori della tecnologia WiMax, anche per esigenze di interoperabilità. L'obiettivo del NRM è di permettere l'implementazione di opzioni multiple per le entità funzionali, ma che garantiscano anche l'interoperabilità tra le diverse

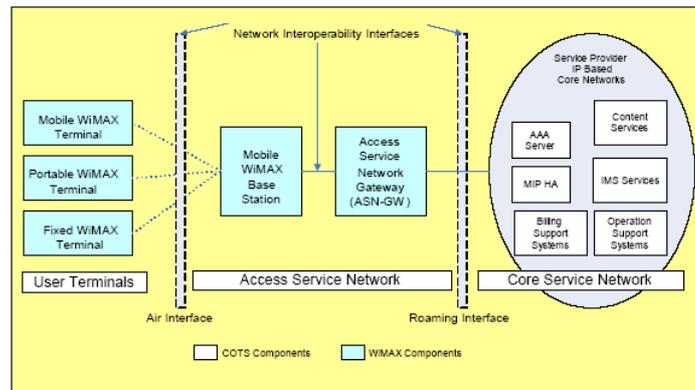


Figura 2.2: WiMax Network IP-Based Architecture

realizzazioni. L'interoperabilità è basata sulla definizione dei protocolli di comunicazione e di trattamento dei dati tra le entità funzionali per raggiungere una gestione globale comune di servizi come la sicurezza e la mobilità.

L' *Access Service Network* (ASN) definisce la linea di confine e rappresenta un modo conveniente di descrivere l'aggregazione di entità funzionali ed i corrispondenti flussi di messaggi associati ai servizi di accesso. L'ASN rappresenta il punto di confine per l'interoperabilità funzionale tra gli utenti, i servizi di connessione e le funzionalità raggruppate dai diversi fornitori.

Il *Connectivity or Core Service Network* (CSN) è definito come un insieme di funzionalità di rete che forniscono servizi di connessione IP agli utenti WiMax. Il CSN può comprendere elementi di rete come routers, AAA (*Authentication, Authorization and Accounting*) proxy/server, user databases e Interworking gateway. Il CSN può essere sviluppato come parte aggiuntiva di un " *WiMax Network Service Provider*" (NSP) esistente o come componente essenziale di un nuovo WiMax NSP.

La Figura 2.2 mostra in maggior dettaglio le funzionalità raggruppate nelle entità logiche ASN e CSN. In particolare, si può notare la presenza di due tipologie di dispositivi:

- la **Base Station (BS)**: questi apparati sono distribuiti in modo strategi-

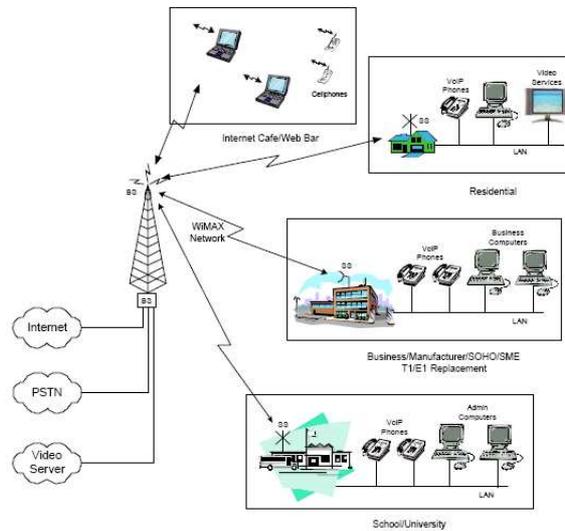


Figura 2.3: Base Station e Subscriber Station

co nell'ambiente, per fornire servizi di vario genere (trasmissione di voce, dati, video) alle **Subscriber Station o Mobile Terminal (SS o MT)** contenuti nella loro cella, di qualche decina di chilometri di raggio. Queste stazioni si connettono via radio, da un lato con la *backbone* fissa o con un'altra BS e dall'altro con le SS della loro cella, raggiungendo velocità di trasmissione dati fino a 75 Mbps, in linea di vista. In aree con un'elevata densità di popolazione, le prestazioni del sistema saranno limitate dall'inevitabile elevata suddivisione della banda disponibile (in tempo o in frequenza) tra i vari utenti.

- le **Subscriber Station o Mobile Terminal (SS o MT)**: questi apparati possono comunicare, via onde radio, con la BS che sovrintende alla cella in cui si trovano. In particolare, una SS può raggruppare più terminali mobili in una particolare tipologia di rete (WiFi, Ethernet, etc.) e poi consentire loro di instaurare comunicazioni WiMax con la BS. Quindi, si ha uno scenario in cui i terminali mobili possono comunicare direttamente con la BS, oppure passando attraverso una rete instaurata con una SS (Figura 2.3). Inoltre, questi dispositivi si possono muovere all'interno della cella a cui appartengono o migrare in altre celle, appartenenti allo stesso operatore o a terzi (*handoff ed handover*).

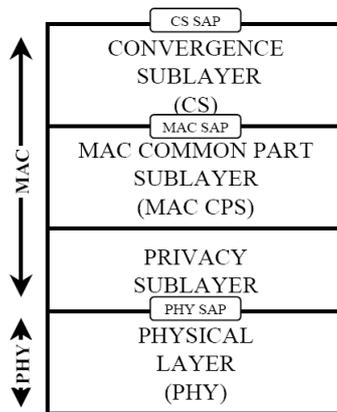


Figura 2.4: Modello di riferimento per una Subscriber Station

2.3 Il modello di riferimento dello standard 802.16e

Lo standard 802.16e va ad occupare i livelli **MAC** e **PHY** della pila protocollare ISO/OSI definendo l'interfaccia aerea tra la *Base Station* e la *Subscriber Station*:

- **Subscriber Station:** il modello di riferimento di una SS definito dallo standard 802.16e è illustrato nella Figura 2.4, la quale mette in evidenza la presenza di "sottolivelli" per il livello MAC.
- **Base Station:** il modello di riferimento di una BS definito dallo standard 802.16e è illustrato nella Figura 2.5. In particolare, l'immagine più a destra evidenzia alcune delle funzionalità più importanti svolte dai livelli MAC e PHY.

In particolare, il modello di riferimento della BS possiede un componente adibito alla mobilità, collocato nel livello rete della pila protocollare ISO/OSI, che gestisce l'handoff, l'handover ed il roaming.

In questa Tesi l'attenzione viene focalizzata sul comportamento della BS ed in particolare, sull'aspetto dello scheduling del traffico.

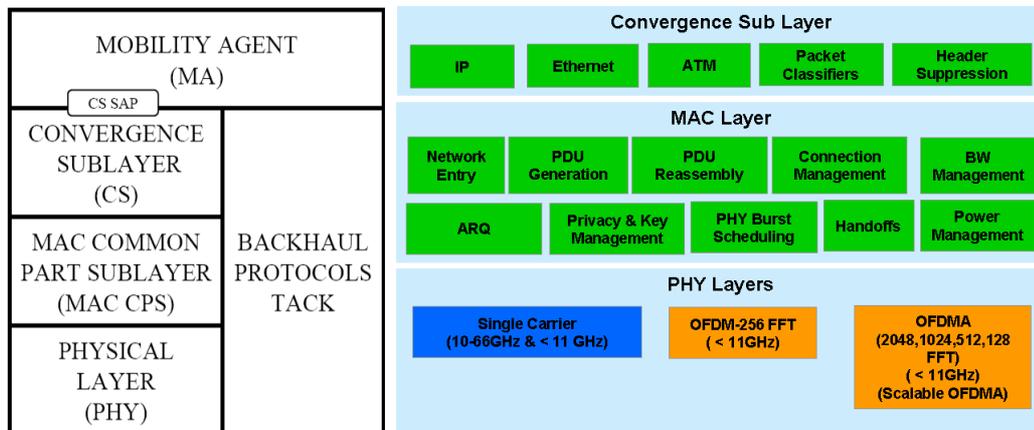


Figura 2.5: Modello di riferimento per una Base Station

2.4 Il livello fisico (PHY)

Lo standard 802.16e prevede tre tipologie di livello fisico nel "Mobile WiMax": SC (*Single Carrier*), OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) [?]. Il "WiMax Forum Mobile Task Group" sta sviluppando un profilo "Mobile WiMax" basato solo sul livello fisico OFDMA. Nello stesso momento, il "WiMax Forum Evolution Task Group" sta sviluppando specifiche tecniche per l'evoluzione di reti basate su OFDM per connessioni fisse e nomadiche. Perciò, il livello fisico OFDMA rappresenta la "linea guida" per il "Mobile WiMax".

2.4.1 OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access

La tecnica di moltiplicazione OFDMA deriva da quella OFDM, ma con la possibilità per il sistema di assegnare diverse sottoportanti ad utenti differenti nello stesso *time slot* (Figura 2.6). L'OFDMA, come l'OFDM, suddivide la banda di frequenza in un certo numero di sottoportanti ortogonali tra loro e poi modula simultaneamente i flussi di dati dei vari utenti su ciascuna sottoportante. Un sistema OFDMA, invece di trasmettere lo stream dati su tutta la banda di frequenza disponibile, modulandolo su un'unica portante, lo ripartisce in un certo numero di sub-stream paralleli, di data rate minore (ma con un sim-

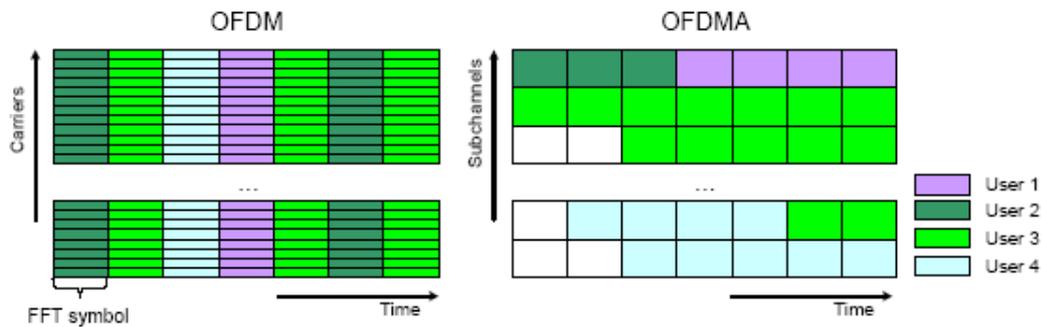


Figura 2.6: Uplink in OFDM ed OFDMA

bolo OFDMA di durata maggiore) che poi modula e trasmette su sottoportanti separate ed ortogonali. Pertanto, l'aumento della durata del simbolo serve per compensare il data rate minore: vengono inviati meno dati, ma sulle frequenze "migliori" e soprattutto ortogonali, per un tempo maggiore.

L'OFDMA sfrutta il fatto che alcuni range di frequenze possono essere "ascoltati" meglio di altri e che attraverso l'ortogonalità, è possibile eliminare le interferenze. La modulazione OFDMA può essere realizzata in modo efficiente con l'"Inverse Fast Fourier Transform" (IFFT), che riesce a gestire, con bassa complessità, fino a 2048 sottoportanti. In un sistema OFDMA, le risorse sono disponibili nel dominio del tempo per mezzo dei simboli OFDMA e nel dominio delle frequenze per mezzo delle sottoportanti. Le risorse frequenze possono essere organizzate in "sottocanali" da assegnare contemporaneamente ai singoli utenti. Ad esempio, le sottoportanti 1, 3 e 7 possono essere assegnate all'utente 1 e le sottoportanti 2, 5 e 9 all'utente 2: ciascun gruppo di queste sottoportanti viene chiamato "sottocanale".

Nei sistemi OFDMA, le sottoportanti quindi, possono essere raggruppate, dal punto di vista logico, in sottocanali: un sottocanale è formato da sottoportanti sparse sulla banda del canale ed assegnare ad un utente un insieme di sottocanali adiacenti non significa dargli necessariamente sottoportanti adiacenti, è una rappresentazione logica. In *downlink*, poichè è la BS che invia informazioni alle SS, un sottocanale può essere ascoltato da più utenti e la BS può comunicare contemporaneamente con più utenti. In *uplink* uno o più sottocanali possono essere assegnati ad un singolo utente e soprattutto, più utenti possono comunicare contemporaneamente. Uno "slot" rappresenta la minima quantità

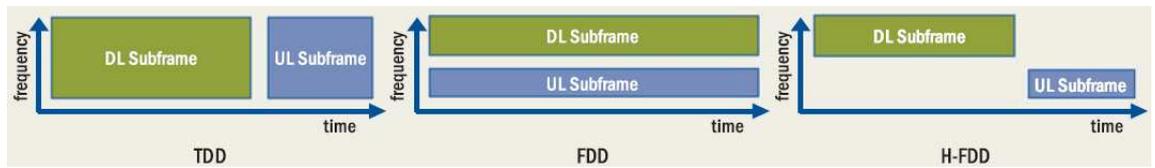


Figura 2.7: Modalità di duplexing TDD, FDD e H-FDD

allocabile di risorse frequenze-temporali ed è composto da un sottocanale, di 48 sottoportanti del tipo *dati*, che rappresenta il range minimo di frequenze allocabili, ed un simbolo OFDMA, che rappresenta il minimo tempo allocabile.

2.4.2 TDD: Time Division Duplexing

Le tre differenti modalità di duplexing previste dai sistemi "Mobile WiMax" OFDMA, sono TDD (*Time Division Duplexing*), FDD (*Frequency Division Duplexing*) e H-FDD (*Half - Frequency Division Duplexing*) (Figura 2.7). Il sistema TDD utilizza l'intera banda di frequenza sia per le trasmissioni in DL (*downlink*) che per quelle in UL (*uplink*), ed il *frame* viene suddiviso in "DL subframe" ed "UL subframe", nel dominio del tempo. I sistemi FDD utilizzano invece, diverse bande di frequenza e le trasmissioni in DL ed UL avvengono contemporaneamente su frequenze diverse, quindi, il sistema può ricevere e trasmettere contemporaneamente. I sistemi H-FDD, anche se utilizzano diverse bande di frequenza per le trasmissioni in DL ed UL, non prevedono la possibilità di trasmettere e ricevere contemporaneamente.

La flessibilità nella determinazione del "punto di guardia", che separa temporalmente la trasmissione del DL subframe da quella dell'UL subframe, rende il TDD la modalità di duplexing favorita dai sistemi "Mobile WiMax".

2.4.3 Struttura dei frame OFDMA / TDD

La Figura 2.8 mostra un esempio di struttura di frame OFDMA per la modalità di duplexing TDD. Ogni frame è diviso in DL subframe ed UL subframe attraverso il "Transmit/Receive Transition Gaps" (TTGs) ed al termine dell'UL subframe per separarlo dal DL subframe, si trova il "Receive/Transmit Transition Gaps" (RTGs), per evitare le collisioni tra i due subframe. All'in-

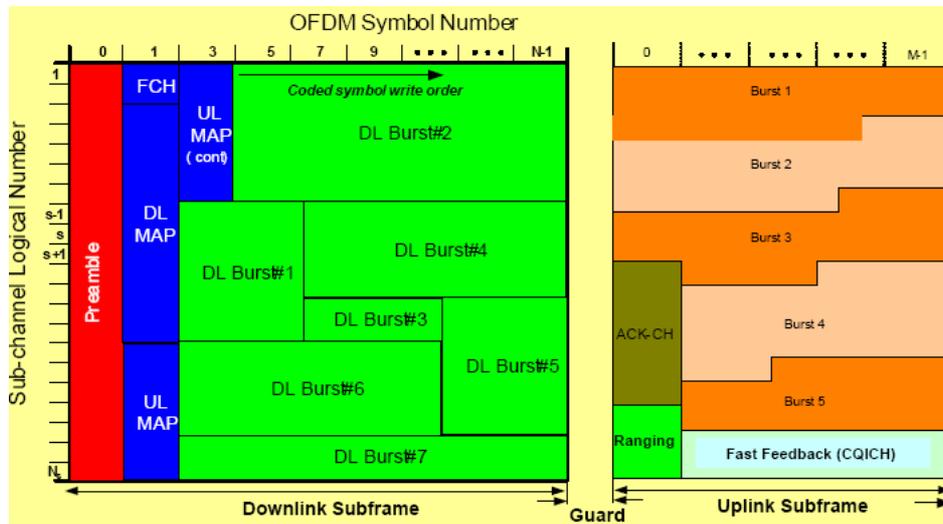


Figura 2.8: Esempio di struttura di un frame OFDMA nella modalità di duplexing TDD

terno del frame vengono utilizzate delle informazioni di controllo per assicurare l'ottimalità delle operazioni del sistema:

- **Preamble:** è il primo simbolo OFDM del frame e viene utilizzato per funzioni di sincronizzazione e di stima del canale.
- **Frame Control Header (FCH):** segue il preambolo e fornisce le informazioni di configurazione del frame, come la lunghezza del messaggio di MAP (*Mobile Application Part*), i profili dei burst successivi destinati agli utenti, lo schema di codifica ed i sottocanali utilizzabili.
- **DL-MAP ed UL-MAP:** forniscono informazioni in broadcast sull'allocatione dei sottocanali ed altre informazioni di controllo dei rispettivi subframe. I DL-MAP ed UL-MAP descrivono completamente il contenuto dei rispettivi subframe. Essi specificano: i terminali mobili che stanno ricevendo o che dovranno trasmettere nei burst del rispettivo subframe; i sottocanali in cui ciascun terminale mobile sta trasmettendo (in UL); la codifica e la modulazione utilizzate in ciascun burst ed in ogni sottocanale. In particolare, la parte DL-MAP contiene l'elenco dei puntatori che puntano, all'interno del frame, allo slot destinato ad ogni terminale mobile.

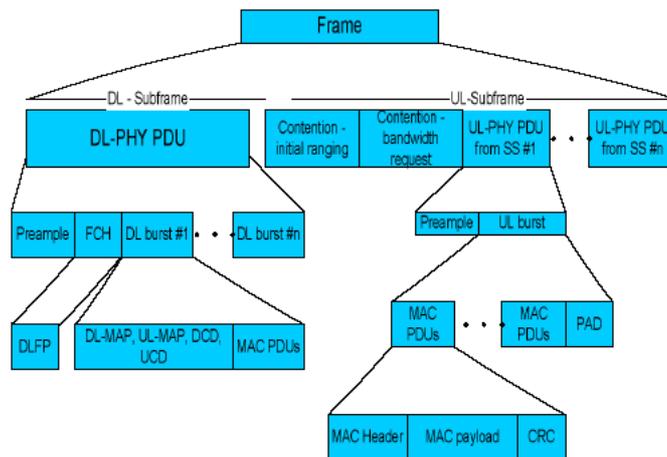


Figura 2.9: Struttura del frame OFDMA

- **DL Burst:** rappresentano i "data burst", cioè le informazioni destinate ai terminali mobili, composti da un certo numero intero di simboli OFDMA. Vengono definiti dei "burst profile" che specificano l'algoritmo di codifica, il tasso di codifica ed il livello di modulazione che deve essere utilizzato per i dati trasmessi nel burst.
- **UL Ranging:** rappresenta un intervallo di contesa in cui i terminali mobili entrano in conflitto per eseguire ad esempio, la procedura di ingresso nella rete, le richieste di banda, di variazione della potenza, tenendo conto anche della QoS.
- **UL Fast Feedback CQICH:** viene utilizzato dai terminali mobili per riportare alla BS informazioni sullo stato del canale.
- **UL ACK:** viene utilizzato dai terminali mobili per riportare l'*acknowledgement* nel caso sia avvenuto un "DL HARQ" (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*).
- **UL Burst:** esistono tre tipologie di burst che possono essere trasmessi dalle SS:
 - i burst trasmessi nei time slot in modalità di contesa riservati per l'"initial ranging";
 - i burst trasmessi nei time slot in modalità di contesa o in unicast riservati per la richiesta di banda;

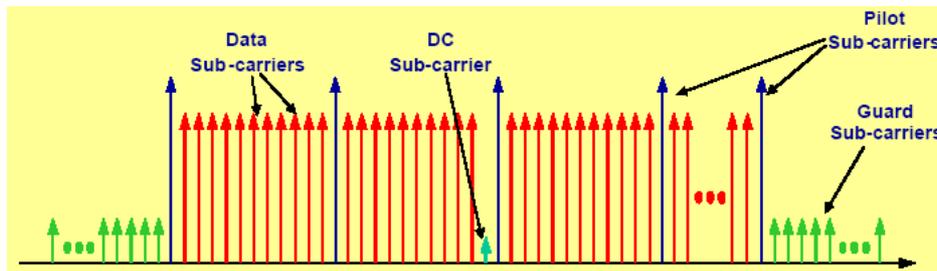


Figura 2.10: Struttura delle sottoportanti OFDMA

- i *burst* trasmessi nei *time slot* in modalità *unicast* specificamente allocati alle singole SS per la trasmissione dei dati in *uplink*.

La Figura 2.9 illustra la struttura del frame OFDMA nel dettaglio. In particolare, il FCH (*Frame Control Header*) contiene il DLFP (*DownLink Frame Profile*); all'inizio del primo *burst* vengono inviati dei messaggi di broadcast che descrivono il contenuto del frame, come il DL-MAP, l'UL-MAP, il DCD (*Downlink Channel Descriptor*) e l'UCD (*Uplink Channel Descriptor*). Il resto del *DL subframe* è destinato ai *data burst* delle singole SS.

2.4.4 Allocazione delle sottoportanti

Esistono tre tipi di sottoportanti: *data*, *pilot* e *null* (Figura 2.10). Le sottoportanti *data* sono utilizzate per la trasmissione dei dati, quelle *pilot* per la stima del canale e la sincronizzazione e quelle *null* come bande di guardia prive di trasmissioni. Le sottoportanti *data* possono essere raggruppate dal punto di vista logico in sottocanali ed un sottocanale è formato da 48 sottoportanti *data*. Ci sono due tecniche fondamentali di allocazione delle sottoportanti: "Distributed SubCarrier Allocation" (DSCA) ed "Adjacent SubCarrier Allocation" (ASCA). In generale, l'allocazione distribuita funziona molto bene per le applicazioni mobili, mentre quella adiacente, viene più propriamente usata per gli ambienti fissi, nomadici o comunque, a bassa mobilità.

2.4.5 Ranging

Il "Mobile WiMax" fornisce dei canali di *ranging* con una tecnica di *segnalazione* molto simile a quella utilizzata nel CDMA (*Code Division Multiple*

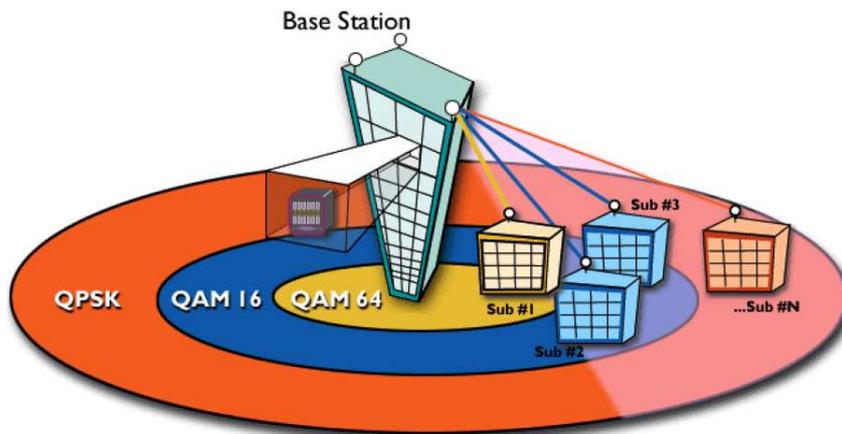


Figura 2.11: Esempio di codifica adattativa

Access). Questi canali vengono appositamente utilizzati per le operazioni di ingresso nella rete, di manutenzione delle connessioni, di richiesta di banda, di gestione efficiente dell'*handoff* (HO), etc. Un massimo di 256 insiemi di 144 bit di codici, vengono generati e divisi in quattro gruppi: *initial*, *periodic*, *bandwidth request* ed HO ranging.

2.4.6 HARQ: Hybrid Automatic Repeat reQuest

La più grande differenza tra l'ARQ tradizionale e l'ARQ ibrido è che il primo scarta sempre i pacchetti corrotti, sostituendoli con quelli ritrasmessi, mentre il secondo non li scarta, ma li combina con quelli ritrasmessi, sfruttando le diversità derivanti dai tempi di trasmissione differenti.

2.4.7 Modulazione e Codifica Adattative

La modulazione adattativa permette ai sistemi WiMax di regolare lo schema di modulazione del canale, in accordo con il SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), cioè il rapporto *segnale-rumore* del canale radio. Lo standard definisce fino a sette combinazioni di modulazione e codifica (BPSK - *Binary Phase Shift Keying*, QPSK - *Quadrature Phase Shift Keying*, 16-QAM e 64-QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*), così da poter scegliere la più adatta in base all'interferenza del canale. Se si ottiene un buon SNR, il sistema sceglie la modulazione che consente di ottenere il throughput migliore (64QAM).

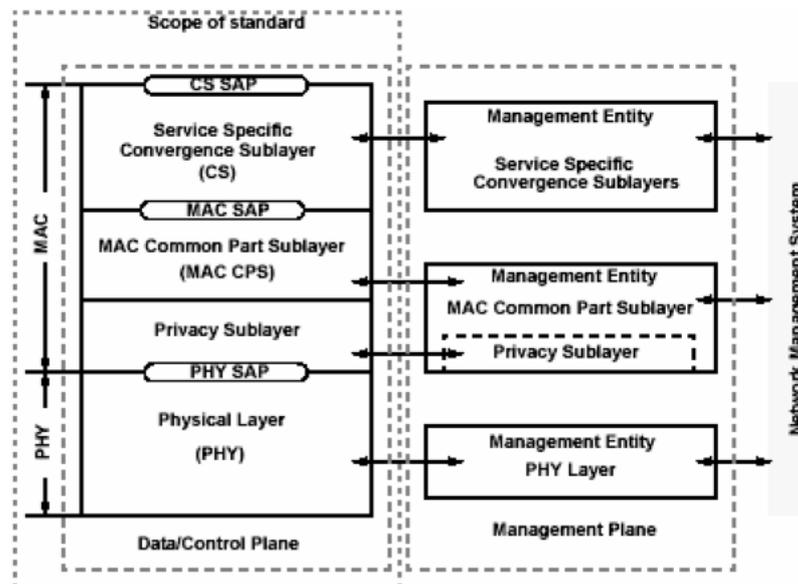


Figura 2.12: I livelli dello standard 802.16e

2.5 Il livello di Medium Access Control (MAC)

Il livello di controllo di accesso al mezzo fisico di comunicazione del "Mobile WiMax" [15] è stato sviluppato per fornire un'interfaccia indipendente dai tre livelli fisici ammessi dallo standard (*Single Carrier, OFDM, OFDMA*) e per garantire un'efficiente gestione delle risorse radio. Il livello MAC supporta le connessioni *Point-to-Point* (PP), *Point-to-Multipoint* (PMP) e *Mesh*.

Le risorse allocate ad un terminale mobile dal *MAC scheduler* possono variare da un singolo time slot all'intero frame, cosicchè ad ogni utente può essere fornito, in ogni momento, un range dinamico di throughput. Inoltre, poichè le informazioni di allocazione delle risorse sono raccolte nei messaggi di MAP all'inizio di ogni frame, lo scheduler è in grado di cambiare effettivamente l'allocazione delle risorse *frame-per-frame*, a seconda della natura altalenante del traffico di rete. Il livello MAC è *connection-oriented*, per cui, tutte le comunicazioni di dati, trasporto e controllo, sono organizzate in connessioni, anche i flussi prodotti da protocolli *connectionless*, come l'IP (*Internet Protocol*). Il livello MAC quindi, schedula le trasmissioni dei dati in base alle connessioni. Ciascun terminale mobile crea una o più connessioni avendo varie classi di servizio:

- *Unsolicited Grant Service* (UGS): si tratta di servizi che producono pacchetti di dati di lunghezza fissa ad intervalli di tempo periodici, come ad esempio, il traffico *Voce*;
- *real-time Polling Service* (rtPS): si tratta di servizi che producono pacchetti di dati di lunghezza variabile ad intervalli di tempo periodici, come ad esempio, il traffico *Video*;
- *non-real-time Polling Service* (nrtPS): si tratta di servizi che richiedono il trasferimento di grandi quantità di dati ma senza una scadenza rigida, come ad esempio, il *File Transfer Protocol*;
- *Best Effort* (BE): si tratta di servizi a bassa priorità, come ad esempio, il *Data Transfer* o il *Web Browsing*.

Il livello MAC è stato concepito per la gestione efficiente delle risorse radio in modo da: supportare la QoS (*Quality of Service*) per ciascuna connessione; mantenere le performance dei link utilizzando l'AMC (*Adaptive Modulation and Coding*), l'HARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*) ed altri metodi; massimizzare il throughput. Il livello MAC gestisce l'ingresso nella rete dei terminali mobili e crea i MAC "Protocol Data Unit" (PDU) [6]. Infine, definisce due specifiche essenziali di "Convergence Sublayer" (CS), che sono l'*Asynchronous Transfer Model* (ATM) CS ed il *packet* (IP, Ethernet) CS (Figura 2.5).

2.5.1 I sottolivelli del livello MAC

La Figura 2.12 mostra la stratificazione in tre *sottolivelli* del livello MAC :

- ***Service Specific Convergence Sublayer (SSCS)***: stabilisce tutte le trasformazioni o le mappature dei dati ricevuti attraverso il CS SAP (*Convergence Sublayer Service Access Point*) nelle relative MAC PDU (*Protocol Data Unit*) inviate al MAC CPS (*Common Part Sublayer*) attraverso il MAC SAP e viceversa. Il CS è preposto alla classificazione delle SDU (*Service Data Unit*) ricevute ed alla loro successiva associazione al corretto flusso di servizio MAC ed all'identificatore di connessione (CID):

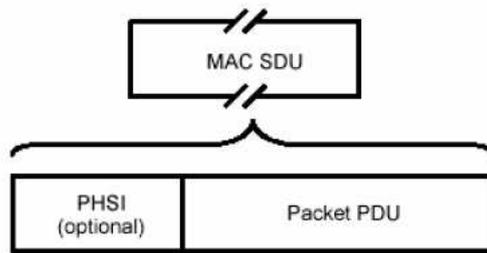


Figura 2.13: Struttura della MAC SDU

Connection Identifier). Può includere anche alcune funzioni come la soppressione del *payload header*. Sono previste specifiche di CS multiple per l'interfacciamento con i vari protocolli ed ognuna di esse ha la propria configurazione interna del CS *payload*.

- **MAC Common Part Sublayer (MAC CPS):** provvede alle funzionalità MAC centrali dell'accesso di un sistema, come l'allocazione della larghezza di banda, l'instaurazione ed il mantenimento del collegamento. Riceve i dati dai vari CS, attraverso il MAC SAP, riservato per particolari collegamenti di MAC. Inoltre, sono previsti dei meccanismi per differenziare la QoS a seconda delle differenti necessità delle diverse applicazioni. Per esempio, voce e video richiedono ritardi piccoli ma tollerano un po' di errore; al contrario, applicazioni dati generiche non possono tollerare errori, ma possono accettare un po' di ritardo.
- **Privacy Sublayer:** provvede all'autenticazione, al cambio ed alla cifratura della chiave di sicurezza.

2.5.2 Le Service Data Unit (SDU)

I pacchetti del livello superiore saranno incapsulati nella struttura delle **MAC SDU** (*Service Data Unit*), come illustrato nella Figura 2.13. Il PHSI (*Payload Header Suppression Index*), della lunghezza di 8 bit, rappresenta l'indice di soppressione del *payload header* ed un valore pari a zero specifica che non è stata applicata alcuna operazione di soppressione dell'header alla PDU; viceversa, un valore diverso da zero identifica la regola utilizzata per portare a termine tale operazione.

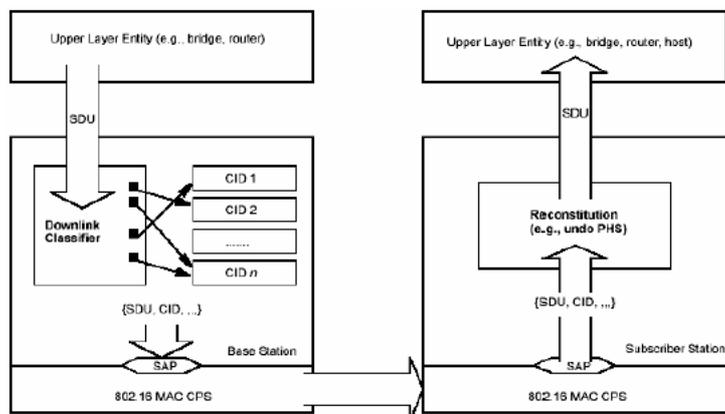


Figura 2.14: Classificazione dei SDU sui CID

Il processo di Classificazione

La *Classificazione* è il processo mediante il quale una MAC PDU è associata ad una particolare connessione per la trasmissione tra strati MAC di due entità distinte (Figura 2.14). Questo processo crea inoltre un'associazione con le caratteristiche del flusso di servizio di quella specifica connessione, facilitando la consegna delle MAC SDU con la QoS desiderata. Un classificatore, cioè l'entità che si occupa del processo di classificazione, è costituito da:

- un insieme di criteri di confronto, applicati ad ogni pacchetto che transita in una rete IEEE 802.16;
- una priorità;
- un riferimento ad un CID (*Connection Identifier*).

Se un pacchetto soddisfa i criteri di confronto di uno specifico classificatore, allora esso è spedito, attraverso la il SAP (*Service Access Point*), alla connessione specificata dal CID.

2.5.3 Le Protocol Data Unit (PDU)

La struttura delle MAC PDU è riportata nella Figura 2.15. I primi byte sono dedicati al *MAC Header*, di lunghezza fissa, seguito (se presente) dal *payload*, il quale sarà formato, a sua volta, da più sottoheader e da MAC SDU raggruppate

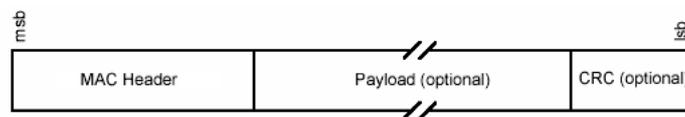


Figura 2.15: Struttura delle MAC PDU

o frammentate. Le MAC PDU possono avere una lunghezza in bit variabile, dato che è la lunghezza del payload ad essere variabile. L'uso del CRC (*Cyclic Redundancy Check*) è opzionale e viene utilizzato per il rilevamento degli errori. La lunghezza massima della MAC PDU è di 2048 bytes, inclusi l'*header*, il *payload* ed il *CRC*.

Formato del MAC Header

Lo standard definisce due configurazioni del MAC Header. Il primo, è il "Generic MAC Header" che inizia ogni MAC PDU e contiene sia messaggi di gestione MAC, sia dati del sottolivello *Convergence Sublayer*. Il secondo, è l'"Header di Richiesta di Banda" che è usato dalle SS per richiedere banda addizionale in UL. Il campo HT (*Header Type*), costituito da un singolo bit, permette di distinguere i due tipi di header: zero per il *Generic Header* ed uno per l'altro. L'*Header di Richiesta di Banda* viene usato in speciali PDU che hanno il solo scopo di richiedere banda addizionale e, dato che queste non trasportano dati, non è necessaria la presenza del payload.

Formato del payload

All'interno del *payload* delle MAC PDU, possono essere presenti tre tipi di sottoheader:

- **FHS (*Fragmentation Subheader*)**: è utilizzato quando le MAC SDU sono frammentate.
- **GM (*Grant Management Subheader*)**: è usato dalla SS per comunicare alla BS lo stato di allocazione della banda e la necessità di gestirla.
- **Packing Subheader**: viene utilizzato quando il MAC inserisce SDU multiple in una singola MAC PDU. Quando le SDU sono di lunghezza vari-

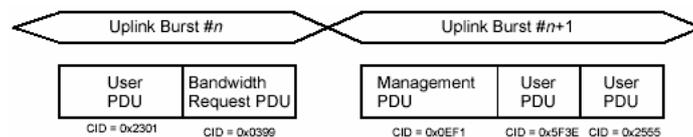


Figura 2.16: Esempio di concatenazione di una MAC PDU

abile ognuna di queste è preceduta da questo sottoheader. I sottoheader di Compressione e di Frammentazione sono mutuamente esclusivi.

I sottoheader di *Fragmentation* e *Packing* esposti sopra, sono utilizzati per ottenere un'allocatione efficiente della banda. Ad esempio, le MAC SDU piccole possono essere raggruppate insieme, in modo da "riempire" tutto il sottocanale allocato e le MAC SDU grandi possono essere frammentate quando non rientrano tutte nel sottocanale allocato. Le MAC PDU aventi la stessa modulazione e codifica, possono essere concatenate in un "*profilo di burst*". Nel *payload* delle MAC PDU sono trasportati una serie di messaggi di gestione MAC. Essi sono costituiti da una prima parte che indica il tipo di messaggio di gestione e da una seconda che consiste nel payload vero e proprio.

Costruzione e trasmissione delle MAC PDU

La trasmissione delle MAC PDU avviene in modo ordinato, cioè viene inviato prima il byte più significativo e poi, all'interno del byte, viene inviato prima il bit più significativo. Esistono tre tecniche di trasmissione:

- **Tecnica di Concatenazione:** permette di concatenare MAC PDU multiple in una singola trasmissione sia in *uplink* che in *downlink* (Figura 2.16). Ad esempio, le tre tipologie di PDU, ovvero quelle di gestione MAC, quelle per il normale trasporto dati e quelle di richiesta di banda, possono essere concatenate nella stessa trasmissione.
- **Tecnica di Frammentazione:** permette di suddividere una MAC SDU in più MAC PDU. Questa tecnica può essere avviata dalla BS per una connessione in *downlink*, oppure da una SS per una connessione in *uplink*. La dimensione dei frammenti può essere negoziata durante o dopo lo stabilirsi della connessione. Mediante il numero di sequenza, la SS è in grado

di ricreare il payload originale ed eventualmente di individuare la perdita di alcuni pacchetti intermedi.

- **Tecnica di Compressione:** permette di comprimere più MAC SDU in una singola MAC PDU. La costruzione delle MAC PDU, quando viene impiegata la tecnica di compressione, cambia in base all'utilizzo o meno del meccanismo di ARQ (*Automatic Repeat reQuest*). Quando il meccanismo di ARQ è disabilitato, si possono distinguere due tecniche di compressione:
 - **Compressione di MAC SDU di lunghezza fissa:** il MAC mittente comunica mediante un messaggio, inviato al momento dell'instaurazione della connessione, la dimensione delle SDU compresse. Il campo *Lunghezza* del *MAC header* indica implicitamente il numero di MAC SDU compresse in una singola MAC PDU.
 - **Compressione di MAC SDU di lunghezza variabile:** in questo caso, è necessario indicare dove una MAC SDU finisce e dove inizia la successiva. Per questo motivo, in testa ad ogni SDU, viene inserito un sottoheader di compressione.

Considerando la tecnica di compressione quando viene utilizzato il meccanismo di ARQ, il *Fragment Sequence Number* del sottoheader di compressione sarà usato dal protocollo ARQ per identificare e ritrasmettere i frammenti perduti.

2.5.4 Indirizzamento e connessioni

Ogni terminale mobile è dotato di un indirizzo MAC universale di 48 bit che lo identifica in modo univoco tra tutti i possibili dispositivi di tutti i possibili costruttori. Esso è fondamentale per i processi di *Ranging* e di *Autenticazione*. Ogni connessione è identificata da un CID (*Connection Identifier*), della lunghezza di 16 bit. Il terminale mobile, durante l'inizializzazione, stabilisce con la BS, tre tipi di connessioni di gestione in UL e DL. Ciascuna connessione viene associata al proprio CID attraverso i messaggi di *Ranging Request* e *Ranging Response*. Esistono tre tipi di connessione tra la BS ed i terminali mobili:

- **Connessione di base:** è usata per scambiare comunicazioni di gestione MAC di breve durata ed urgenti.
- **Connessione di gestione primaria:** è usata per scambiare comunicazioni di gestione MAC più lunghe e molto tolleranti al ritardo.
- **Connessione di gestione secondaria:** è usata per trasferire comunicazioni di gestione standard e tolleranti al ritardo, come DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*), TFTP (*Trivial File Transfer Protocol*), SNMP (*Simple Network Management Protocol*), etc. Queste comunicazioni sono trasportate in pacchetti IP che saranno assegnati alla connessione di gestione secondaria, utilizzando l'indirizzo IP completo del mittente in UL ed l'indirizzo IP completo del destinatario in DL. Utilizzando un CID a 16 bit, si rende possibile l'uso di 64K connessioni all'interno di ogni canale in DL ed UL rispettivamente.

2.5.5 Meccanismi per la richiesta di banda

Per qualsiasi servizio, esclusi quelli UGS (*Unsolicited Grant Services*) con bit rate costante ed incompressibile, la quantità di banda necessaria, tra l'instaurazione e la chiusura della connessione, può variare nel tempo. Può accadere, che si renda necessario incrementare o decrementare i requisiti di banda, espressi in termini di numero di byte. Le richieste possono essere di due tipi:

- **Stand-Alone:** viene inviato un messaggio con l'obiettivo specifico di richiedere banda.
- **Piggy Back:** la richiesta di banda viaggia in un pacchetto che contiene anche altri dati.

I meccanismi per la richiesta di banda possono essere:

- **Meccanismo di Grant:** la BS indirizza le concessioni di banda al CID della SS.
- **Unicast Polling:** la BS alloca una minima porzione di banda alla SS, per concedergli la possibilità di fare una richiesta di banda. Le SS operanti in modalità *Grant*, che hanno una connessione UGS con banda sufficiente,

non sono coinvolte nel processo di *Polling*, a meno che non abbiano settato il *Poll Me* bit nell'header.

- ***Polling multicast e broadcast***: il polling non è diretto esplicitamente verso un CID di una SS, ma verso un CID multicast o broadcast ed una SS appartenente al gruppo, può richiedere banda durante ogni intervallo di richiesta allocato per quel CID. Per diminuire la probabilità di collisioni, solo le SS che necessitano di banda possono rispondere. Esse applicheranno l'algoritmo di risoluzione delle contese per selezionare lo slot nel quale trasmettere la richiesta di banda.

2.5.6 Meccanismo di Accesso ed Inizializzazione della Rete

Per poter comunicare sulla rete, ogni SS deve completare con successo il procedimento di ingresso nella rete con la BS desiderata. La Figura 2.17 mostra le fasi della procedura per l'inizializzazione di una SS al momento dell'ingresso nella rete.

La casa produttrice, al momento dell'introduzione sul mercato, equipaggia ogni SS con le seguenti informazioni:

- un indirizzo MAC di 48 bit;
- le informazioni di sicurezza per autenticare la SS.

I passi più importanti di questo procedimento sono:

- ***Scansione del canale di downlink e sincronizzazione con la BS***: Durante l'inizializzazione o dopo la perdita del segnale, la SS deve acquisire un canale in *downlink*. Se la SS non riesce più a riacquisire il canale perso, allora analizzerà in modo continuo i possibili canali della banda di frequenza in *downlink* finché non ne troverà uno valido. Se la SS trova un canale di DL valido ed è in grado di sincronizzarsi a livello PHY con la BS (rileva periodicamente il preambolo del subframe), allora il livello MAC cerca il DCD (*DL Channel Descriptor*) e l'UCD (*UL Channel Descriptor*) per ricavare informazioni sulla modulazione ed altri parametri per l'UL ed il DL. La SS rimarrà sincronizzata con la BS finché continuerà a ricevere sia messaggi di DL-MAP sia quelli DCD (*Downlink Channel Descriptor*),

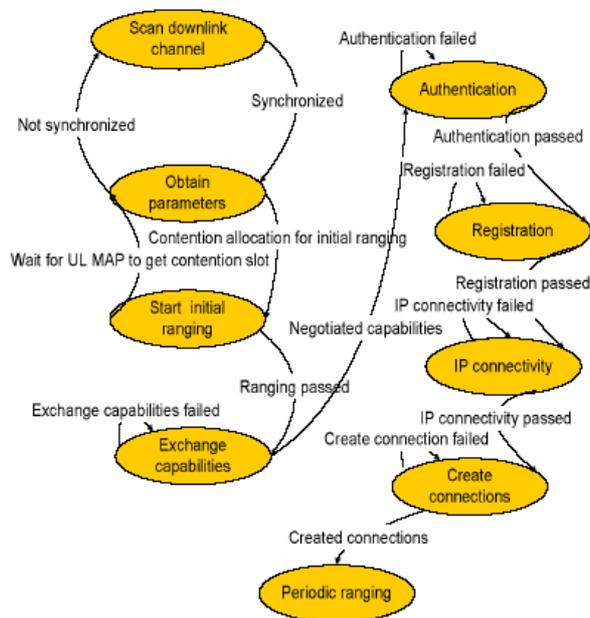


Figura 2.17: Le fasi di inizializzazione ed accesso alla rete

che hanno il compito di descrivere le caratteristiche del canale in DL. Se la SS non riceve più questi messaggi, allora tenterà di ristabilire la sincronizzazione con la BS.

- **Recupero dei parametri di trasmissione in uplink:** dopo la sincronizzazione, la SS rimarrà in attesa di un messaggio UCD (*Uplink Channel Descriptor*) proveniente dalla BS, attraverso il quale potrà ottenere i parametri di trasmissione relativi ad un possibile canale in uplink. Una volta ricevuti i parametri descrittivi del canale, la SS deciderà se è il caso di usarlo o meno.
- **Processo di Initial Ranging:** consente che le trasmissioni delle SS siano allineate al simbolo che marca l'inizio dello slot temporale. Dopo che la SS ha ricevuto i parametri del canale in uplink ed ha scansionato il messaggio UL-MAP, allora invia un messaggio di RNG-REQ alla BS, nel quale indica la connessione a cui si riferisce e richiede eventuali correzioni da apportare all'offset di tempo, frequenza e livello di potenza. La BS allora, risponde con un messaggio di RNG-RSP alla SS con ulteriori correzioni per migliorare la sintonizzazione. Il procedimento continua finché

la SS non riceve un messaggio di *Ranging Successful* ed allora, la SS potrà accedere al normale traffico di dati in uplink.

- **Negoziazione delle caratteristiche fisiche di base:** al termine del processo di *Ranging*, la SS informerà la BS riguardo alle proprie caratteristiche fisiche di base, inviando un messaggio di SBC-REQ (*SS Basic Capability Request*), nel quale saranno impostate ad "on" le caratteristiche possedute. La BS ne prende atto.
- **Autenticazione:** dopo la negoziazione dei parametri fisici, la BS procede all'autenticazione della SS e fornisce tutto il materiale necessario per consentire la cifratura dei dati. La SS invia alla BS, il certificato "X.509" della sua ditta produttrice ed una descrizione degli algoritmi di crittografia supportati. La BS convalida l'identità della SS, determina l'algoritmo di cifratura e il protocollo che dovrebbe essere usato, ed invia una risposta di "avvenuta autenticazione" alla SS. La risposta contiene il materiale chiave che sarà utilizzato dalla SS.
- **Processo di Registrazione:** avviene immediatamente dopo la procedura di autorizzazione, attraverso la quale avviene uno scambio di chiavi di cifratura tra la SS e la BS. Il processo di registrazione ha lo scopo di fornire alla SS il CID associato alla connessione di gestione secondaria. Per registrarsi alla BS, la SS invierà un messaggio di REG-REQ alla BS, la quale risponderà con un messaggio di REG-RSP contenente il CID, che fornirà alla SS l'autorizzazione a trasmettere traffico sulla rete.
- **Procedura di instaurazione di una connessione IP:** per prima cosa, la SS dovrà includere nel messaggio di REG-REQ il parametro di *IP Version* per indicare la versione del protocollo IP supportata dalla connessione di gestione secondaria. Se il parametro nella richiesta non è presente, allora per default sarà supportato esclusivamente IPv4. A questo punto, la SS avvierà i meccanismi del DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) per ottenere un indirizzo IP e tutti gli altri parametri necessari per stabilire la connettività a livello IP. La risposta DHCP conterrà il nome di un archivio che includerà gli ulteriori parametri di configurazione. L'instau-

razione della connettività IP sarà compiuta sulla connessione di gestione secondaria della SS.

- **Procedura per concordare il tempo odierno:** questo processo ha il compito di fornire dalla BS e alle SS la stessa data e lo stesso timing, in modo da renderle totalmente sincronizzate. La richiesta e la risposta sono trasferite tramite il protocollo UDP.
- **Trasferimento dei parametri operativi ed avvio delle connessioni:** dopo che la procedura DHCP è terminata con successo, la SS scaricherà il proprio file di configurazione tramite il protocollo TFTP sulla connessione di gestione secondaria. Infine, dopo aver terminato il trasferimento dei parametri operativi, la BS invierà dei messaggi di DSA-REQ (*Dynamic Service Add*) alla SS per preparare le connessioni per i flussi di servizio che appartengono alla SS stessa; quest'ultima risponderà con un messaggio DSA-RSP. Con quest'ultimo passo si conclude l'intero processo di inizializzazione e di accesso alla rete di una SS.

Una volta completato il processo di ingresso nella rete, la SS crea uno o più flussi di servizio per inviare dati alla BS.

2.5.7 Supporto alla Qualità del Servizio (QoS)

Il livello MAC dello standard 802.16e offre una QoS differenziata a seconda del tipo di applicazione che andrà ad operare sulla rete 802.16e. Nel livello MAC del "Mobile WiMax" la QoS viene fornita associando i pacchetti che attraversano l'interfaccia MAC ad un "flusso di servizio" identificato dal CID (*Connection Identifier*). Quando i pacchetti sono classificati nel "Convergence Sublayer", la connessione in cui vengono collocati viene scelta sulla base del tipo di garanzie QoS che sono richieste dall'applicazione. La Figura 2.18 mostra il meccanismo di QoS dello standard 802.16e a supporto dei servizi multimediali, come ad esempio, "TDM Voice", VoIP, video streaming, TFTP, HTTP, e-mail. Il flusso unidirezionale dei pacchetti, generato dai protocolli dei livelli superiori (PDU: *Protocol Data Unit*), viene fornito con un particolare insieme di parametri di "Qualità del Servizio". Prima di fornire un certo tipo di "data service", la BS ed il terminale mobile devono stabilire un collegamento logico unidirezionale tra i

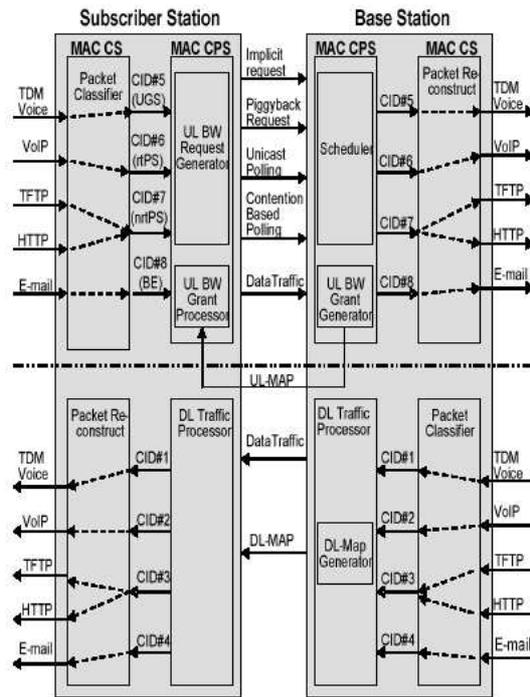


Figura 2.18: Meccanismo di QoS per "multimedia services"

rispettivi livelli MAC, chiamato "connessione". Il livello MAC di partenza associa i pacchetti che attraversano la sua interfaccia con un "flusso di servizio", per essere trasmesso sulla connessione. I parametri di QoS, associati con il flusso di servizio, definiscono l'ordine di trasmissione e di schedulazione sull'interfaccia radio. La QoS orientata alla connessione perciò, può fornire un controllo accurato sull'interfaccia aerea. Poichè generalmente, l'interfaccia aerea costituisce il "collo di bottiglia" del sistema, una gestione della qualità del servizio orientata alla connessione, può effettivamente consentire un controllo della QoS end-to-end. I parametri del flusso di servizio possono essere dinamicamente gestiti attraverso i messaggi MAC, in modo da soddisfare le continue e mutevoli richieste. Il meccanismo della QoS basato sui flussi di servizio, può essere applicato sia alle trasmissioni DL che a quelle UL. Il "Mobile WiMax" permette un ampio range di "data service" ed applicazioni con varie richieste di "Quality of Service".

Classi di Servizio

Ogni connessione, quando viene creata, viene assegnata ad una determinata classe di servizio, in base al tipo di garanzia di QoS richiesta dall'applicazione. Lo standard IEEE 802.16e prevede le seguenti classi di servizio:

- ***Unsolicited Grant Services (UGS)***: supportano quei flussi di servizio *real-time* che generano periodicamente pacchetti di dati di dimensione fissa, come ad esempio, T1/E1, VoIP (*Voice over Internet Protocol*).
- ***real-time Polling Services (rtPS)***: supportano quei flussi di servizio *real-time* che generano periodicamente pacchetti di dati di dimensione variabile, come ad esempio, i video MPEG (*Moving Picture Experts Group*).
- ***non-real-time Polling Services (nrtPS)***: supportano quei flussi di servizio che ottengono il diritto a trasmettere dati attraverso l'"*Unicast polling*" (descritto in 2.2.5), anche in condizioni di congestione della rete, come ad esempio, il "*File Transfer Protocol*" (FTP).
- ***Best Effort***: supportano quei flussi di servizio per i quali non è previsto un "*tasso di trasferimento*" minimo, come ad esempio, il *Data Transfer* ed il *Web Browsing*.

Servizio di MAC Scheduling

Il "*Mobile WiMax MAC Scheduling Service*" è stato progettato con l'obiettivo di trasmettere, in modo efficiente, "*data services*", come voce, video e dati, su canali wireless a banda larga, le cui condizioni possono variare nel tempo. L'obiettivo dello "*scheduling*" è quello di fornire la QoS desiderata per ogni tipologia di traffico e contemporaneamente, consentire l'utilizzo ottimale delle risorse radio. Questo servizio di scheduling possiede le seguenti proprietà, che abilitano i servizi di dati a banda larga:

- ***Fast Data Scheduler***: il MAC scheduler deve allocare le risorse disponibili in modo efficiente, in risposta alla natura altalenante del traffico dei dati ed alle condizioni variabili nel tempo del canale. Lo scheduler è collocato su ciascuna BS per permettere risposte rapide alle richieste da parte del traffico ed alle condizioni del canale (Figura 2.19). I pacchetti di dati

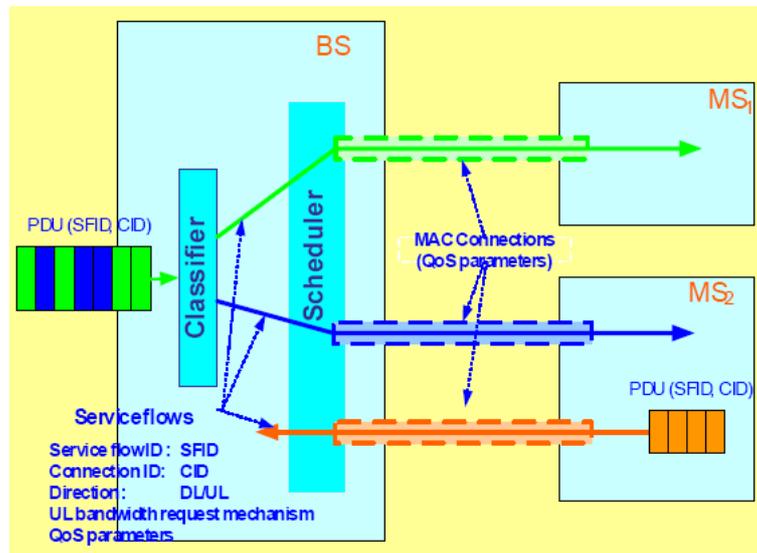


Figura 2.19: Supporto alla *Quality of Service*

vengono associati con i flussi di servizio, i cui parametri di QoS sono ben definiti nel livello MAC, cosicché lo scheduler può determinare correttamente l'ordine di trasmissione dei pacchetti sull'interfaccia aerea. Il canale CQICH (*Channel Quality Indicator Channel*) fornisce informazioni sulla qualità del canale per permettere allo scheduler di scegliere la codifica e la modulazione appropriate per ogni allocazione. L'"*Adaptive Modulation and Coding*" (AMC), combinato con l'"*Hybrid Automatic Repeat reQuest*" (HARQ), consentono trasmissioni robuste anche su canali con condizioni variabili nel tempo.

- **Scheduling Downlink ed Uplink:** il servizio di scheduling è fornito sia per il traffico in DL, che per quello in UL. Affinchè il MAC scheduler possa effettuare un'allocazione efficiente delle risorse e fornire la QoS desiderata in UL, le trasmissioni in UL devono valutare continuamente le condizioni del traffico e le loro richieste di QoS. Vari meccanismi sono stati progettati per supportare le richieste di banda in UL, come ad esempio, attraverso il "*ranging channel*", il "*piggyback request*" ed il "*polling*".
- **Allocazione Dinamica delle Risorse:** il livello MAC prevede l'allocazione delle risorse "*frequenze-tempo*", in DL ed in UL, *frame-per-frame*.

L'allocazione delle risorse viene inserita nei messaggi di MAP all'inizio di ogni frame. Perciò, può essere cambiata solo al frame successivo, in risposta alle nuove condizioni del traffico e del canale. Inoltre, la quantità di risorse in ciascuna allocazione, può variare da un solo slot fino all'intero frame. Pertanto, la veloce e fine granularità nell'allocazione delle risorse permette un'elevata QoS per il traffico dei dati.

- **QoS Oriented:** il MAC scheduler gestisce il trasporto dei dati *connessione-per-connessione*. Ciascuna connessione è associata con un singolo "data service", i cui parametri di QoS definiscono il suo comportamento. Con l'abilità di allocare dinamicamente le risorse, lo scheduler è in grado di fornire un'elevata QoS, sia per il traffico in DL che in UL.
- **Scheduling Selettivo in Frequenza:** lo scheduler è in grado di operare su *sottocanali* dotati di differenti livelli di qualità. Infatti, con la tecnica di selezione delle frequenze, lo *scheduler* può allocare gli utenti mobili solo sui sottocanali che "sentono" meglio, limitando anche l'*overhead* del *Channel Quality Indicator* (CQI) sul canale di UL.

Capitolo 3

Il MAC Scheduling nello Standard 802.16e

Uno dei motivi per cui è stato progettato il livello MAC (*Medium Access Control*) nello standard **802.16e** è quello di differenziare i servizi offerti dalla rete in varie categorie di traffico, ognuna con le sue caratteristiche di multimedialità. Molti nuovi servizi sono basati sulle applicazioni multimediali, come ad esempio, VoIP (*Voice Over Internet Protocol*), *video conferencing*, VoD (*Video-on-Demand*), *online gaming*, etc. Rispetto ai tradizionali servizi TCP/IP, le applicazioni multimediali generalmente richiedono delle garanzie in più, come ad esempio, una certa quantità di banda garantita o un ritardo limitato. A questo proposito, la rete WiMax è in grado di fornire una "Quality of Service" differenziata a seconda delle diverse caratteristiche del servizio. Il supporto alla QoS sulle reti *wireless* è un obiettivo piuttosto arduo rispetto alle reti *cablate*, poiché le caratteristiche della connessione wireless sono molto variabili ed imprevedibili nel tempo e nello spazio. Il meccanismo per il supporto alla QoS nelle reti wireless è generalmente gestito a livello MAC. Il protocollo MAC è *orientato alla connessione*: tutte le comunicazioni, relative sia al trasporto effettivo dei dati che alle informazioni di controllo, avvengono nel contesto di connessioni unidirezionali tra la *Base Station* (BS) e la *Subscriber Station* (SS).

All'inizio di ogni frame, la BS schedula le richieste delle SS in *downlink* ed *uplink* sulla base dei requisiti di QoS negoziati (Figura 3.1). Ciascuna SS

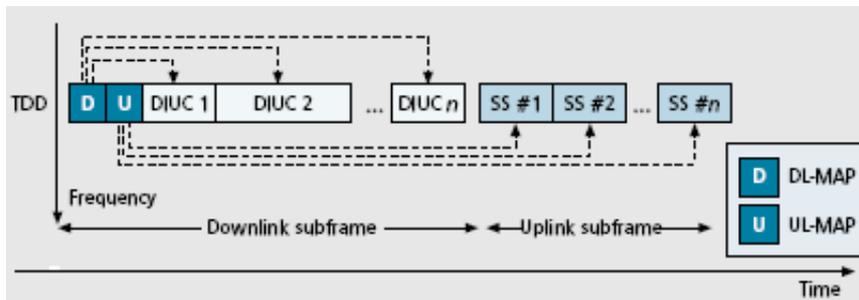


Figura 3.1: Struttura dei subframe di downlink e di uplink

apprende degli assegnamenti delle risorse (*time slot e sottocanali*) alle proprie richieste nel *subframe di uplink* decodificando il messaggio di UL-MAP (*Uplink-Mobile Access Protocol*) inviato nel *downlink subframe* dalla BS. In particolare, nell'UL-MAP è contenuta l'allocazione dei profili di burst delle SS relativi al *subframe di uplink* corrente, mentre nel DL-MAP è contenuto il piano di allocazione dei profili di burst delle SS relativi al *subframe di downlink* corrente. I messaggi di DL-MAP ed UL-MAP vengono trasmessi dalla BS all'inizio di ogni frame, come illustrato nella Figura 3.1.

3.1 Le funzioni della QoS

La Figura 3.2 mostra uno schema funzionale delle *entità logiche* per il supporto alla QoS che risiedono all'interno del livello MAC della BS e delle SS. Ciascuna SS infatti, può essere considerata sia come un dispositivo in grado di effettuare una sola richiesta alla volta (come può accadere per esempio, per un telefono cellulare), sia più richieste contemporaneamente da parte di più utenti. Relativamente alla BS, ogni connessione in *downlink* che invia informazioni alle SS, appartiene ad una coda di pacchetti. In accordo con l'insieme dei parametri di QoS e con lo stato delle code, il *downlink scheduler* seleziona dalle code di downlink, frame-per-frame, il successivo SDU (*Service Data Unit*) che dovrà essere trasmesso alla SS. Anche ogni connessione in *uplink* appartiene ad una coda di pacchetti nella BS e nelle SS. Infatti, ciascuna SS può raccogliere le richieste di connessione di più utenti e chiedere alla BS di schedularle. Dopodichè, dovrà ridistribuire ai suoi utenti le opportunità di trasmissione ricevute dalla BS.

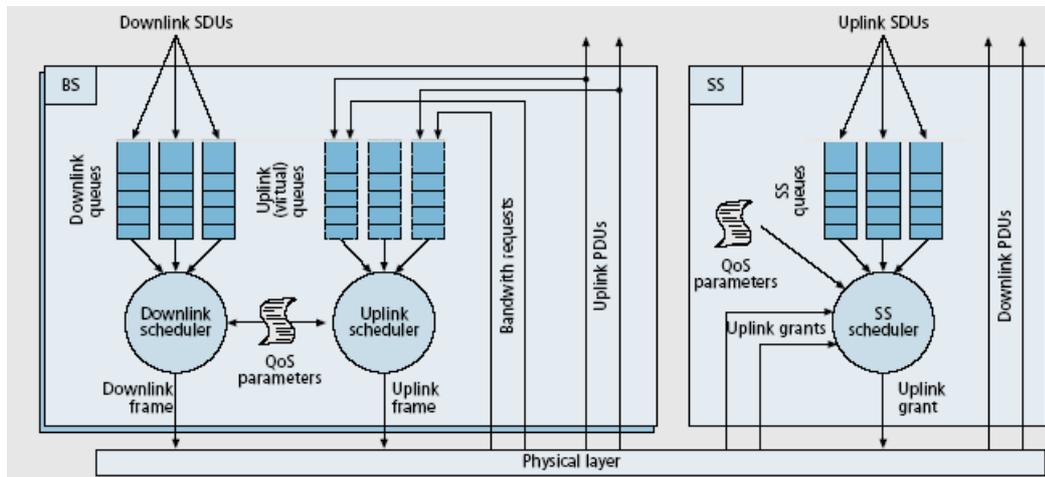


Figura 3.2: Le funzioni della QoS all'interno della BS e delle SS

Poiché la BS controlla gli accessi al mezzo trasmissivo in *uplink*, le bande di frequenza vengono assegnate dalla BS sulla base delle richieste da parte delle SS. Infatti, una volta che la richiesta di connessione della SS è stata accettata dalla BS, la SS, a seconda del tipo di "flusso di servizio" stabilito (UGS - *Unsolicited Grant Service*, rtPS - *real time Polling Service*, nrtPS - *non real time Polling Service*, BE - *Best Effort*), può avere la necessità di richiedere quantità variabili di banda. Lo standard 802.16 specifica un certo numero di meccanismi, attraverso i quali le SS possono acquisire il diritto ad effettuare una richiesta di banda. Con il meccanismo di "unsolicited granting" viene richiesta alla BS per i servizi di tipo UGS, in modo periodico, una quantità fissata di banda nella fase di *setup* della connessione in *uplink* e dopo questa fase non viene più fatta alcuna richiesta esplicita di banda da parte del servizio UGS. Lo "unicast polling" consiste nell'allocare ad una connessione in *uplink* di tipo rtPS, la banda necessaria per effettuare una "richiesta di banda". Se la connessione non ha dati in attesa di essere trasmessi, o se ha già fatto una richiesta di banda per essi, allora potrà non rispondere all'*unicast polling* offerto dalla BS, che quindi, andrà sprecato. Invece, il "broadcast polling" viene utilizzato dalla BS per *tutte* le connessioni in *uplink*, comprese quelle *non real time* e *best effort*. Il maggiore inconveniente di questo meccanismo è che si rischia di avere collisioni tutte le volte che due o più connessioni in *uplink* inviano contemporaneamente una richiesta di banda per

rispondere alla stessa opportunità di *polling* offerta loro in broadcast dalla BS. In questo caso, viene utilizzato un algoritmo di "*backoff esponenziale*" con troncamento binario. Infine, può essere utilizzato il meccanismo del "*piggybacking*", attraverso il quale la richiesta di banda viene inserita all'interno di una PDU (*Packet Data Unit*). Comunque, questa tecnica è efficace soltanto se la connessione trasmette dei dati per i quali ha già ottenuto una certa quantità di banda. Le possibilità di richiedere banda vengono offerte dalla BS anche per fare una stima sulla quantità di dati ancora da trasmettere sulle connessioni in *uplink* da parte delle SS. Infatti, basandosi sulla quantità di banda richiesta e concessa fino a quel momento, l'*uplink scheduler* sulla BS stima la quantità residua di dati che ogni connessione in *uplink* deve trasmettere, ed alloca gli "*uplink grant*", cioè i diritti di trasmettere in *uplink*, in accordo con l'insieme dei rispettivi parametri di QoS e con lo stato delle code.

Dal punto di vista delle SS, quando queste ricevono gli "*uplink grant*" per le loro connessioni, lo *scheduler* implementato nel livello MAC ha il compito di ridistribuire i grant a tutte le connessioni che ne avevano fatto richiesta. Lo standard 802.16 specifica chiaramente che la definizione degli algoritmi di scheduling in *uplink* e *downlink* sulla BS e sulle SS è fuori dagli obiettivi dello standard e perciò è lasciato agli implementatori dei dispositivi ed ai fornitori di servizi [27], [33]. Comunque, sulla base dei meccanismi descritti sopra, il livello MAC dell'802.16 specifica quattro tipi differenti di "*servizi di schedulazione*" per soddisfare le richieste di QoS delle applicazioni multimediali: UGS (*Unsolicited Grant Services*), rtPS (*real time Polling Services*), nrtPS (*non real time Polling Services*) e BE services (*Best Effort*). Ciascun "*servizio di schedulazione*", sia sulla BS che sulle SS, è caratterizzato dall'applicazione di un certo insieme di parametri di QoS fondamentali, richiesti dal particolare tipo di servizio. Inoltre, per quanto riguarda le richieste dei servizi in *uplink*, viene anche specificato quale meccanismo le SS devono utilizzare per effettuare le loro richieste di banda. In particolare, le classi di servizio a cui possono appartenere le richieste di connessione da parte delle SS, sono rappresentate dai servizi UGS, rtPS, nrtPS e BE.

3.1.1 UGS - Unsolicited Grant Services

Gli UGS sono stati progettati per supportare le applicazioni in *real time*, con una bassa tolleranza ai ritardi, che generano pacchetti di dati di lunghezza fissa ad intervalli periodici, come ad esempio, T1/E1 e VoIP senza soppressione del silenzio. Al momento del setup della connessione in uplink, la BS e la SS procedono alla negoziazione della quantità di banda necessaria al servizio, la quale rimane fissata per tutta la durata della connessione, senza bisogno che la SS avanzi una nuova richiesta ogni volta che deve inviare un nuovo pacchetto. Quindi, la BS sa che a determinati intervalli di tempo la SS ha bisogno di trasmettere il suo pacchetto di lunghezza prefissata e che quindi, deve garantirgli la quantità di banda negoziata al setup.

3.1.2 rtPS - real time Polling Services

I rtPS sono stati progettati per supportare le applicazioni *real-time*, con una minima tolleranza ai ritardi. Questi servizi generano pacchetti di dati di lunghezza variabile ad intervalli periodici, come ad esempio, video MPEG (*Moving Pictures Expert Group*) e VoIP con soppressione del silenzio. I parametri chiave di QoS per le applicazioni rtPS sono un tasso di trasmissione dei dati minimo ed un limite superiore per la latenza, che rappresenta il tempo massimo di attesa dei pacchetti nelle code del livello MAC. Siccome la dimensione dei pacchetti non è costante, le connessioni rtPS devono richiedere ogni volta alla BS una quantità di banda necessaria alle esigenze del momento e quindi, devono partecipare ai "meccanismi di richiesta di banda" descritti sopra (*unicast e broadcast polling e piggybacking*). Quindi, è essenziale che le connessioni rtPS in *uplink* abbiano a disposizione un meccanismo per notificare alla BS le necessità correnti di banda per trasmettere i propri pacchetti. Pertanto, la BS utilizza i meccanismi descritti sopra per assegnare ad ogni connessione rtPS il proprio diritto a fare una "richiesta di banda".

3.1.3 nrtPS - non real time Polling Services

Al contrario degli UGS e dei rtPS, i nrtPS sono stati progettati per applicazioni che non hanno specifiche richieste di ritardo da rispettare, ma richiedono

una minima quantità di banda per le applicazioni particolarmente "bandwidth-intensive", come l'FTP (*File Transfer Protocol*). Le richieste di banda vengono gestite dalla BS attraverso i meccanismi di "broadcast polling" e di "piggybacking". Inoltre, la BS utilizza il meccanismo di "unicast polling" per le connessioni nrtPS, attraverso il quale, dopo un tempo massimo di attesa, offre la possibilità alla connessione di fare la sua richiesta di banda.

3.1.4 BE - Best Effort Services

Questo tipo di servizio è relativo al traffico *Best Effort*, come l'HTTP (*Hyper Text Transfer Protocol*). Non ci sono garanzie di QoS: nè di *throughput*, nè di ritardo. Le applicazioni in questo flusso di servizio ricevono la banda disponibile dopo che questa è stata allocata ai tre precedenti flussi di servizio. La possibilità di richiedere banda per questo tipo di connessioni avviene solo in modalità di contesa.

3.1.5 Il meccanismo di "Quality of Service" nel livello MAC

Nel momento in cui il "livello applicativo" di una SS vuole inviare dati sulla rete 802.16, è necessario che tra i "livelli MAC" della SS e della BS, venga instaurata una "connessione". In particolare, la SS invierà un messaggio di "DSA-REQ" (*Dynamic Service Addition-Request*) al modulo "Admission Control" della BS, attraverso il quale richiederà la gestione di un nuovo "flusso di servizio", con l'indicazione dei parametri di QoS (*banda minima, ritardo massimo, jitter tollerato, etc.*). Il modulo "Admission Control" determinerà, sulla base di questi parametri, se la richiesta potrà essere soddisfatta o meno. Se il modulo decide che potrà essere accettata, allora la BS assegna un CID (*Connection Identifier*) alla connessione e poi comunica allo *scheduling* che dovrà occuparsi della negoziazione dei parametri di QoS richiesti dal flusso di servizio appena creato. Ad esempio, se si tratta di una connessione UGS (*Unsolicited Grant Service*), la SS comunicherà alla BS le dimensioni fisse dei pacchetti, la banda necessaria, le frequenze migliori e gli intervalli di tempo entro cui devono essere schedulati, ed alcuni di questi parametri rimarranno fissati per tutta la durata della connessione. In particolare, la SS non dovrà più effettuare richieste di banda per questo tipo di connessioni. Una volta instaurata la connessione, la

SS invia un messaggio di richiesta vera e propria di banda alla BS, la quale in base alla sua politica di schedulazione, provvederà ad assegnare i *sottocanali* ed i *time slot* nel *subframe di uplink*. La BS invierà un messaggio di "UL-MAP" nel quale indicherà la banda ed i *time slot* allocati per quella connessione. A questo punto, la SS impacchetterà le SDU (*Service Data Unit*) provenienti dal "livello IP" nelle PDU (*Protocol Data Unit*) e le invierà alla BS, in accordo con le informazioni di allocazione di banda e di *time slot* che ha ricevuto nel messaggio di UL-MAP nel *subframe di downlink*. La BS raccoglierà questi dati e si occuperà di trasmetterli alla SS destinataria sul canale di "downlink". Nel caso in cui le connessioni sono del tipo rtPS (*real-time Polling Service*), la SS avrà la possibilità di effettuare nuove richieste di banda alla BS con il meccanismo di "unicast polling". Negli altri casi di connessione (nrtPS e BE), la SS procederà alle sue richieste di banda alla BS attraverso i meccanismi di contesa.

3.2 Le funzioni dello scheduling

L'obiettivo principale dello *scheduling* è quello di garantire un utilizzo ottimale delle risorse (*frequenze, tempo, potenza, energia, etc.*), garantendo il rispetto dei parametri di "Quality of Service" richiesti dalle varie tipologie di servizio: *throughput, perdita dei pacchetti, ritardo, etc.*

Lo scheduling del livello MAC nell'802.16 persegue due obiettivi fondamentali legati tra loro: il primo è la ripartizione ed allocazione dell'interfaccia aria alle trasmissioni della multiutenza ed il secondo è la classificazione e prioritizzazione dei pacchetti delle varie connessioni all'interno della BS e delle SS. Lo scheduler dell'interfaccia aria viene eseguito dalla BS ed è generalmente considerato un componente del livello MAC: esso determina il contenuto dei messaggi di DL-MAP ed UL-MAP trasmessi in *downlink* dalla BS, all'inizio di ogni *frame*. In particolare, nel messaggio di UL-MAP, la BS specifica i "profili di burst" per gli utenti che devono trasmettere nel subframe di *uplink*, specificando l'allocazione dei *time slot*, dei *sottocanali*, il *tipo di codifica* e di *modulazione*, la *potenza di trasmissione*, etc. In un sistema OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), come l'802.16e, le opportunità di trasmissione per gli utenti sono i *time slot* nel dominio del tempo ed i *sottocanali* nel dominio delle frequenze,

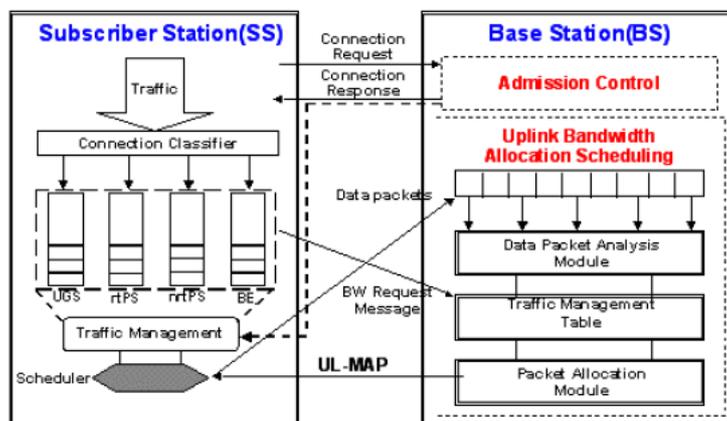


Figura 3.3: QoS architecture dell'802.16

con l'opportunità per più utenti di trasmettere nello stesso *time slot* ma su *sottocanali* diversi. Lo scheduler dell'interfaccia aerea sulla BS, gestisce le richieste di banda delle varie SS sulla base delle classi di servizio a cui appartengono le connessioni che vogliono trasmettere ed in base allo stato delle code di attesa. In particolare, la BS utilizza vari meccanismi di comunicazione (*unsolicited bandwidth request, polling, etc*) per tenersi informata sulle richieste di banda da parte delle SS che vogliono trasmettere in *uplink*. Il livello MAC definisce dei meccanismi di segnalazione (*signaling*) dei parametri di QoS, per controllare le trasmissioni dei dati tra BS e SS, come il "*BW-Request*" e l'"*UL-MAP*".

La Figura 3.3 mostra l'architettura della QoS dell'IEEE 802.16. Lo *scheduling* di allocazione della banda di uplink risiede sulla BS per controllare le trasmissioni dei pacchetti in *uplink*. Siccome il protocollo MAC dell'802.16 è *orientato alla connessione*, l'applicazione stabilisce prima una connessione con la BS e poi l'associazione della richiesta con un flusso di servizio (UGS, rtPS, nrtPS, BE). La BS assegna alla connessione un CID (*Connection Identifier*) unico. L'IEEE 802.16 definisce il meccanismo di "*connection signaling*" (*connection request, response*), cioè il meccanismo di instaurazione di una connessione tra la SS e la BS, ma non definisce il processo di "*Admission Control*", cioè il processo di accettazione o meno di nuove connessioni. Tutti i pacchetti dal livello applicazione sulla SS vengono classificati dal "*Connection Classifier*" sulla base del CID ed inoltrati sulla coda appropriata. Sulla SS, lo *scheduler* recupera i pac-

chetti dalle code e li trasmette sulla rete nei *time slot* appropriati, definiti dalla BS nell'UL-MAP. Il messaggio di UL-MAP è determinato dal modulo di "*Uplink Bandwidth Allocation Scheduling*" sulla base dei messaggi di "*BW-Request*" che contengono la dimensione corrente della coda per ciascuna connessione sulla SS. In definitiva, l'IEEE 802.16 definisce i meccanismi di "*signaling*" per lo scambio di informazioni tra la BS e la SS, come ad esempio, il *setup* della connessione, la *BW-Request* e l'UL-MAP e definisce lo *scheduling in uplink* per i flussi di servizio UGS. Mentre non definisce lo *scheduling in uplink* per i flussi di servizio rtPS, nrtPS e BE e l'"*Admission Control*" delle connessioni.

3.3 Il "Management Reference Model" della rete 802.16e per la QoS

Il modello di riferimento è quello di una rete wireless mobile a commutazione di pacchetto costituita da una "*Base Station*" (BS) e da un certo numero di "*Subscriber Station*" (SS) mobili e fisse. Lo *scheduling* è implementato in modo centralizzato sulla BS, la quale è in grado di comunicare con tutte le SS. Comunicazioni dirette tra le SS non sono possibili. E' importante che lo *scheduling* sia a conoscenza di due aspetti necessari per l'allocazione dei "sottocanali" e dei "*time slot*" alle varie connessioni:

- uno, è rappresentato dallo stato del canale trasmissivo; in particolare, di come i *sottocanali* vengono percepiti dalle varie SS, in modo da allocarli agli utenti che li "ascoltano" meglio.
- l'altro, è rappresentato dai criteri di QoS richiesti dalle varie connessioni, come ad esempio, il ritardo massimo tollerato, la banda minima richiesta, etc. Questi parametri, vengono negoziati all'instaurazione della connessione tra la SS e la BS e poi mantenuti o modificati attraverso i meccanismi di "*richiesta di banda*" e di "*negoiazione dei parametri*".

3.4 Il *MAC scheduling* dell'802.16 nella letteratura

Uno degli obiettivi principali del livello MAC sulla *Base Station* di una rete 802.16, è quello di consentire alle *Subscriber Station* di trasmettere le proprie informazioni sul canale di *uplink* della rete, in modo da rispettare i parametri di QoS richiesti e di garantire l'allocazione degli utenti sulle frequenze migliori. Lo standard 802.16 prevede un meccanismo per soddisfare i requisiti di QoS, che è quello di associare ogni connessione ad un determinato "*flusso di servizio*" (UGS, rtPS, nrtPS, BE), beneficiando di tutte le prerogative che ne conseguono (banda minima garantita, ritardo massimo ammesso, potenza di trasmissione, possibilità di richiedere banda variabile). Inoltre, per quanto riguarda l'allocazione delle frequenze, lo standard 802.16e, utilizza una tecnica di modulazione OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), la quale permette a più utenti di trasmettere simultaneamente su sottocanali diversi nello stesso "*time slot*". Siccome la probabilità, che utenti diversi sperimentino la stessa qualità per un determinato sottocanale, è molto bassa, allora si può garantire che ad ogni utente vengano assegnati i sottocanali in cui trasmette meglio.

In particolare, il problema dell'assegnamento dei sottocanali e della potenza di trasmissione in *uplink* a diversi utenti in un sistema OFDMA, è diventato recentemente, un'area attiva di ricerca, soprattutto nel campo delle telecomunicazioni. Il problema della schedulazione e prioritizzazione del traffico in *uplink*, rispettando i parametri di QoS, come ad esempio, la garanzia di una banda minima o di un ritardo massimo, rappresenta un settore di ricerca prevalentemente informatico. In realtà, i due aspetti sono molto legati tra di loro, tant'è vero, che le varie soluzioni proposte fin'ora nella letteratura, prevedono spesso uno sviluppo congiunto dei due aspetti, un controllo "*multi-layer*" della QoS.

In questa tesi, viene affrontato il problema dello "*scheduling in uplink*" del traffico della multiutenza, dando particolare enfasi al parametro di "*Quality of Service*" rappresentato dal "*massimo ritardo tollerato*" dalle varie tipologie di servizio. Infatti, visto il grande incremento dei servizi *real time* in questi ultimi anni, soprattutto servizi multimediali come videoconferenza e videofonia, il

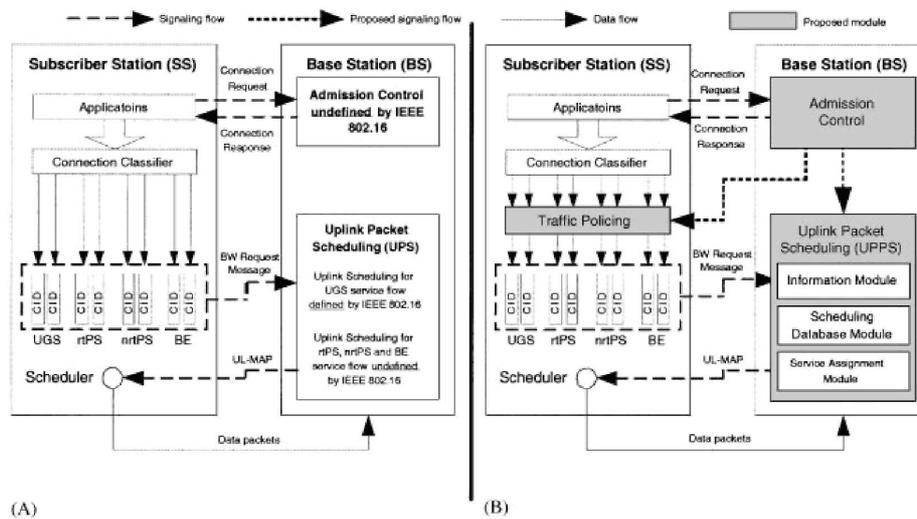


Figura 3.4: Architettura della QoS proposta da A.Ganz ed altri in [18]

fatto di dover garantire la trasmissione dei pacchetti a determinate scadenze, diventa molto importante per non ottenere un degrado eccessivo della qualità dei dati. Inoltre, lo "scheduling in uplink" è particolarmente "delicato" rispetto a quello in *downlink*, poiché un certo numero di utenti entra in competizione per una serie di motivi, come ad esempio, per trasmettere il traffico su un intervallo limitato di frequenze, per richiedere variazioni sulla quantità di banda disponibile, sulla potenza o sulle frequenze di trasmissione. La BS ha il compito di gestire tutte queste richieste dando loro un preciso ordinamento e garantendo il rispetto dei parametri di QoS. In *downlink* invece, solo la BS può trasmettere alle SS e quindi, non deve entrare in competizione con nessuno per accedere al canale. I pacchetti di dati vengono mandati dalla BS in *broadcast* a tutte le SS, ciascuna delle quali raccoglie soltanto i pacchetti destinati a lei. Quindi, i meccanismi di scheduling in *uplink* per la prioritizzazione del traffico e per l'allocazione dinamica della banda, esaminati come punto di partenza in questa tesi, considerano il parametro di "deadline" una componente fondamentale della qualità del servizio. Tuttavia, nella letteratura, oltre al "ritardo massimo", sono stati presi in considerazione anche altri parametri di QoS, come ad esempio, "la perdita dei pacchetti", "il risparmio energetico", la "fairness" [5] etc.

In [18] viene proposta una nuova architettura della QoS che va a completare

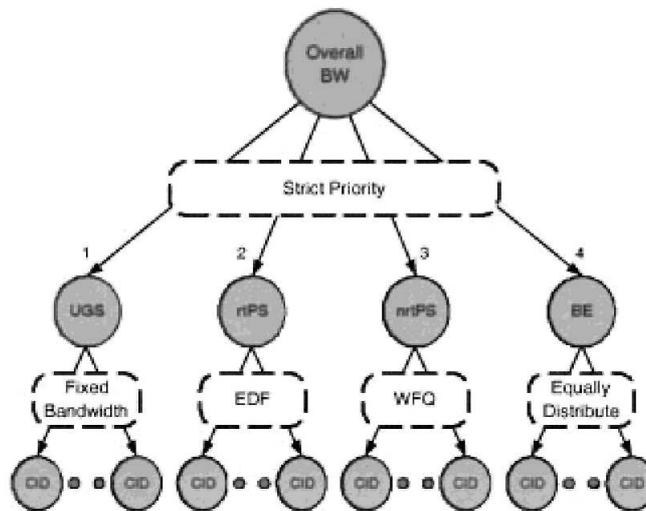


Figura 3.5: Struttura gerarchica dell'allocazione di banda proposta da A.Ganz ed altri in [18]

gli aspetti lasciati indefiniti dallo standard (Figura 3.4). In particolare, sulla BS è stata aggiunta una dettagliata descrizione del modulo UPS (*Uplink Packet Scheduling*), con un algoritmo di scheduling che supporta tutti i tipi di flussi di servizio, e del modulo di "Admission Control". Sulla SS è stato aggiunto il modulo di "Traffic Policing". Per supportare tutti i tipi di flussi di servizio (UGS, rtPS, nrtPS e BE), lo scheduling di *uplink* dei pacchetti proposto, utilizza una combinazione di alcune discipline della priorizzazione del traffico, come gli algoritmi EDF (*Earliest Deadline First*) e WFQ (*Weighted Fair Queue*). La Figura 3.5 mostra la struttura gerarchica di allocazione della banda considerando la priorità dei flussi di servizio. I principi su cui si basa il modulo di UPS sono:

- L'allocazione della banda avviene rispettando rigidamente la priorità dei flussi di servizio, dalla più alta alla più bassa: prima vengono soddisfatti tutti gli UGS, poi i rtPS, poi i nrtPS ed infine i BE. L'inconveniente di questo principio è che si rischia l'attesa indefinita dei servizi a priorità minore.
- Per i servizi UGS viene garantita la quantità di banda o il numero di *time slot*) fissati al setup della connessione; questi servizi non hanno più bisogno di fare richieste di banda.

- Per i servizi rtPS viene applicato l'algoritmo EDF: i pacchetti con "deadline" più prossima vengono schedulati prima.
- Per i servizi nrtPS viene applicato l'algoritmo WFQ: i pacchetti vengono schedulati sulla base del "peso" delle singole connessioni, dato dal rapporto tra il "data rate" medio della connessione ed la media dei "data rate" di tutte le connessioni nrtPS.
- Per i servizi BE la banda residua viene allocata in egual misura tra le connessioni.

In [20] viene proposta un'architettura di QoS basata su uno scheduling con prioritizzazione del traffico e sull'allocazione dinamica della banda, attraverso i quali, si cerca di garantire le richieste di "ritardo massimo" da parte di cinque differenti tipologie di traffico: UGS, UGS-AD (UGS con Activity Detection), rtPS, nrtPS e BE. I componenti di questa nuova architettura sono i seguenti:

- Scheduler 1: è responsabile della gestione del traffico dal punto di vista delle richieste di ritardo massimo da parte dei flussi di servizio UGS, rtPS e nrtPS. La politica di scheduling utilizzata in questo scheduler è quella EDF (*Earliest Deadline First*).
- Scheduler 2: è utilizzato per schedulare le richieste di banda minima, specialmente quelle provenienti dai flussi di servizio nrtPS. L'algoritmo utilizzato in questo scheduler, per garantire la banda richiesta da ogni flusso di servizio, è il WFQ (*Weighted Fair Queue*), dove il "peso" è rappresentato dalla quantità di banda richiesta. Più la richiesta di banda è elevata, maggiore sarà la priorità nel soddisfarla da parte dello scheduler.
- Scheduler 3: viene utilizzato per ordinare il traffico in accordo con la sua priorità. Ad esempio, flussi di servizio BE possono stabilire un ordine di precedenza basandosi sulla priorità dei singoli servizi. Questo scheduler utilizza l'algoritmo WFQ, dove il "peso" è rappresentato dalla priorità del servizio.
- CSA (*Contention Slot Allocated*): è utilizzato dalla BS per correggere dinamicamente le allocazioni di banda che vengono effettuate negli "slot

di contesa” (utilizzati dalle SS per richiedere banda) e negli *”slot riservati*” (utilizzati dalle SS per trasmettere il loro traffico). Ad esempio, un numero troppo elevato di slot destinati alla contesa per le richieste di banda da parte delle SS, limita la quantità di banda residue per le trasmissioni dei loro dati.

- MAP Generator: è utilizzato per ricevere ed elaborare le informazioni provenienti dagli scheduler e dal CSA. La regola è: il *”MAP Generator*” seleziona le opportunità di trasmissione o le opportunità di richiedere banda dallo *”Scheduler 1*”; se il *frame* non è pieno, allora viene selezionata l’opportunità dello *”Scheduler 2*”; infine, se sono state selezionate le precedenti opportunità, si selezionerà anche quella dello *”Scheduler 3*”.

In [17] viene proposto un meccanismo di controllo di QoS da integrare nell’architettura dello standard IEEE 802.16-2004, per le connessioni PMP (*Point-to-Multipoint*) e Mesh, in modalità TDD (*Time Division Duplexing*). Gli obiettivi fondamentali di questo studio, sono rivolti a garantire i diversi livelli di QoS dei *”flussi di servizio*”, la prioritizzazione delle classi di traffico, l’allocazione dinamica e condivisa delle risorse. I parametri di QoS che vengono considerati sono le richieste minime di banda e di *”data rate*”, il ritardo ed il jitter tollerati. Secondo questa architettura vengono utilizzati due algoritmi di scheduling, PQ (*Priority Queue*) e DFPQ (*Deficit Fair Priority Queue*), per prioritizzare il traffico e tre algoritmi di scheduling, EDF (*Earliest Deadline First*), WFQ (*Weighted Fair Queue*) e RR (*Round Robin*), per allocare la banda disponibile all’interno delle varie classi.

In particolare, vengono definite sei code (Figura 3.6), in accordo con le direzioni di UL, DL e le classi di servizio (rtPS, nrtPS e BE). Poiché ai servizi UGS verrà allocata una quantità di banda prefissata (o un certo numero di *time slot*), questo tipo di traffico non parteciperà insieme agli altri servizi, al meccanismo di allocazione di banda. Per i servizi rtPS viene utilizzato l’algoritmo EDF, secondo il quale il pacchetto con scadenza più prossima viene schedulato per primo. L’*”Information Module*” determina il tempo di scadenza dei pacchetti sommando il tempo di arrivo ed il ritardo massimo. Per i servizi nrtPS viene utilizzato l’algoritmo WFQ, il quale schedula i pacchetti considerando il

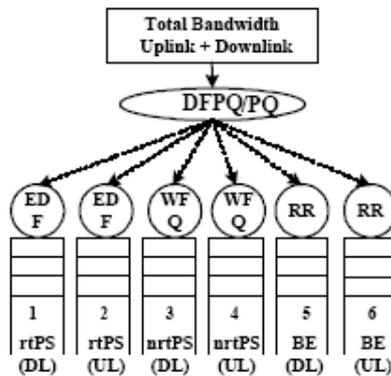


Figura 3.6: Struttura gerarchica dell'allocazione di banda

rapporto tra la minima quantità di "data rate" garantita e la somma totale della stessa per tutte le connessioni nrtPS. La banda rimanente viene allocata alle connessioni di tipo BE utilizzando l'algoritmo RR.

3.5 Considerazioni sui meccanismi di QoS presenti in letteratura

Molte altre architetture di controllo della QoS nello standard IEEE 802.16 sono presenti in letteratura [11] [14], ma la maggior parte di queste non tiene conto del "massimo ritardo ammesso" come parametro fondamentale per ottenere una qualità accettabile nel trasferimento su rete wireless di alcuni tipi di dati. Infatti, non viene preso in adeguata considerazione il fatto che oggi un numero sempre maggiore di applicazioni è molto sensibile ai ritardi, basti pensare al trasferimento voce e video in real time, alla videoconferenza, alla videosorveglianza, alla videofonia. La maggior parte di questi lavori, si è diretta principalmente verso il tentativo di allocare in maniera ottimale i *sottocanali* al massimo numero di utenti possibile in ogni *time slot*, in modo da ottenere la massimizzazione del *throughput* del sistema. In ogni caso, anche quelle architetture che hanno considerato il "massimo ritardo ammesso" come parametro irrinunciabile della QoS, non hanno tenuto conto del fatto che anche i servizi a bassa priorità, come quelli *non real time* o *best effort*, potrebbero avere

una "deadline" alla cui scadenza dovrebbero essere eseguiti, se non si vogliono errori. A questo proposito, si potrebbe notare che in una rete wireless mobile come il *Mobile WiMax*, il traffico pagante è rappresentato principalmente da applicazioni real time come voce, videochiamate e recentemente, anche dai servizi di TV su telefono cellulare, mentre il traffico *Internet* è non pagante, per cui si tende a relegarlo nei ritagli rimanenti di frequenze e tempo. In genere, in questi studi presenti in letteratura, in cui si è tenuto conto delle *deadline* delle richieste, è stata creata una coda per ogni tipologia di servizio, UGS, rtPS, nrtPS e BE, e poi si è scelto di applicare delle politiche secondo le quali prima vengono soddisfatte tutte le richieste UGS, poi quelle rtPS, poi quelle nrtPS ed infine quelle BE. Ma cosa succede se le applicazioni a maggiore priorità esauriscono sempre la banda in ogni frame? Si potrebbe rischiare che i servizi a più bassa priorità come quelli BE ad esempio, non vengano mai soddisfatti. Nel capitolo successivo viene proposta una nuova politica di schedulazione in *up-link* del traffico di rete *Mobile WiMax*, applicando una variante dell'algoritmo EDF (*Earliest Deadline First*).

Capitolo 4

Un Nuovo Algoritmo di *MAC Scheduling*

L'obiettivo di questa tesi, è quello di proporre ed implementare un "*nuovo algoritmo di scheduling*", che permetta di controllare gli accessi al mezzo fisico di comunicazione, da parte degli utenti della rete 802.16e "*Mobile WiMax*", i quali chiedono di trasmettere in *uplink*, cioè verso altri utenti, i loro servizi. Il fine principale di ogni utente di una rete WiMax mobile infatti, è quello di riuscire ad ottenere dalla "*Base Station*" (BS), il diritto ad utilizzare il canale di comunicazione, per trasmettere i propri servizi verso gli altri utenti. In una semplice telefonata, ad esempio, l'utente che sta inviando "dati vocali" verso il destinatario, ha ricevuto in precedenza dalla BS, il diritto ad accedere al canale, nei tempi e sulle frequenze, stabiliti dalla "*politica di scheduling*" adottata dalla BS [16]. Pertanto, la "*schedulazione in uplink*" [33], è importante per determinare quando, su quali frequenze e per quanto tempo, un utente può comunicare con un altro.

Questo nuovo algoritmo proposto nel seguito, verrà valutato e confrontato con i più importanti algoritmi di scheduling per reti WiMax presenti in letteratura [13]. In particolare, verrà presa in considerazione la politica di scheduling illustrata in [18] e verrà implementato in questa tesi, il corrispondente algoritmo con cui confrontare quello nuovo. Nel Capitolo 5 inoltre, verrà presentata l'applicazione "*WiMax Simulator*", implementata anch'essa in questa tesi, inizialmente

con l'obiettivo di simulare il comportamento dei due algoritmi di scheduling, ma in seguito, trasformata in "piattaforma generica", su cui poter testare un qualsiasi algoritmo di scheduling che dovesse essere aggiunto ed implementato anche in futuro. Infine, nel Capitolo 6 verranno eseguite le simulazioni dei due algoritmi, utilizzando l'applicazione "*WiMaxSimulator*" e tratte le conclusioni sulla bontà del nuovo algoritmo proposto. Come verrà spiegato ampiamente nel Capitolo 6, i parametri presi in considerazione per valutare il comportamento degli algoritmi in vari condizioni di traffico, sono il "*Numero di pacchetti persi sul totale dei pacchetti trasmessi*", per i servizi di tipo UGS e rtPS, ed il "*Ritardo medio rispetto alla terminazione attesa*", per i servizi di tipo nrtPS e BE.

4.1 Perchè un nuovo algoritmo di *MAC Scheduling*

Lo standard 802.16e [27], si limita a definire le proprietà della QoS (*Quality of Service*), come ad esempio, la possibilità per le varie tipologie di servizio (*UGS, rtPS, nrtPS e BE*), di chiedere la banda necessaria per trasmettere le proprie informazioni. Però, lo standard non definisce la "*schedulazione in uplink*", cioè i meccanismi di determinazione del contenuto del messaggio di *UL-MAP* inviato dalla "*Base Station*" agli utenti delle richieste di trasmissione. Cioè, non definisce le politiche di allocazione dei *sottocanali* e dei *time slot* alle richieste degli utenti, all'interno del sottoframe di uplink. Per questo motivo, si è deciso di implementare una nuova politica di schedulazione dei servizi, che tenesse conto di un parametro essenziale della QoS, rappresentato dalla "*deadline*" (che verrà esposta in dettaglio nel seguito del capitolo), con l'obiettivo di fornire un meccanismo equo di allocazione delle risorse (*frequenze e tempo*) alle varie tipologie di pacchetto.

Il servizio di scheduling che utilizzerà questo algoritmo è un servizio centralizzato, poiché risiederà sulla *Base Station* [26] e le consentirà di soddisfare le molteplici richieste di trasmissione in *uplink* da parte degli utenti, basandosi sulla loro "*deadline*". Infatti, ogni richiesta di accesso al canale di uplink da parte di un servizio dell'utente ha associata una *deadline*, la quale rappresenta il "*tempo massimo*" entro il quale la richiesta dovrà essere schedulata, se non si

vuole che diventi inutilizzabile. Ad esempio, per i servizi *voce* e *video* di tipo *real time*, il rispetto di tale deadline dovrebbe essere abbastanza "rigido", mentre per i servizi *non real time* questo valore può essere assegnato in modo arbitrario dallo scheduling e se non dovesse risultare sufficiente per allocare tutto il servizio, può essere incrementato.

La maggior parte degli algoritmi di scheduling presentati fin'ora in letteratura (alcuni dei quali sono stati esposti nel capitolo precedente), altri sono elencati in [22] [32] [32] [25] [34] [28], effettuano una classificazione delle connessioni nei vari flussi di servizio, creando quattro classi con caratteristiche di QoS differenti ed assegnando a ciascuna classe una priorità nell'ordine di schedulazione. Ad esempio, in alcuni di questi algoritmi, i *sottocanali* ed i *time slot* vengono assegnati prima a tutte le connessioni che appartengono alla classe UGS (*Unsolicited Grant Service*), poi quelli rimanenti, vengono assegnati alle connessioni rtPS (*real time Polling Service*), poi a quelle nrtPS (*non real time Polling Service*) ed infine, se ci sono ancora frequenze e time slot disponibili nel *frame*, a quelle BE (*Best Effort*). Lo svantaggio di questi schedulatori è rappresentato dal fatto che i servizi a priorità minore, come quelli non real time (generalmente, il traffico di rete non pagante), rischiano di non essere mai schedulati, soprattutto in condizioni di elevato traffico real time (generalmente, il traffico pagante).

Il nuovo algoritmo proposto invece, ordina i vari tipi di richieste di servizio, non in base alla classe a cui appartengono, ma a seconda della loro "*deadline*", cioè del tempo massimo entro cui devono essere schedulate prima di diventare inutilizzabili. Esso si basa, apportando delle varianti, sul principio utilizzato nell'algoritmo **EDF** (***Earliest Deadline First***) [19], secondo il quale, le richieste vengono inserite in una "coda di priorità", in cui la richiesta con la *deadline* più imminente è quella a maggiore priorità, mentre la richiesta con la *deadline* più lontana è quella a minore priorità. L'algoritmo EDF però, richiede che il traffico sia periodico, mentre nel nuovo algoritmo proposto, viene introdotta anche la possibilità del traffico non periodico, al quale viene attribuita una "certa" *deadline*, considerata "sufficiente" dallo *scheduler*, per allocare completamente una richiesta *non real time*. Si vedrà poi, che questa *deadline* "arbitraria", potrà essere estesa dallo schedulatore, nel caso non dovesse essere sufficiente per soddisfare il servizio. In pratica, con questa nuova tecnica, si riescono a schedu-

lare anche quei servizi non real time non periodici, come ad esempio il traffico FTP (*File Transfer Protocol*), ai quali si può attribuire una *deadline* fittizia, "adeguatamente" lontana, rispetto al traffico real time periodico, come ad esempio, quello video e voce, per il quale le scadenze hanno una certa periodicità prefissata.

Anche in quegli studi presenti in letteratura in cui viene presa in considerazione la *deadline* delle varie richieste, la schedulazione viene comunque effettuata su una classe di servizio alla volta, partendo da quella UGS, a priorità maggiore, generalmente schedulata con politiche *a priorità* (le richieste vengono ordinate ad esempio, in base al *ritardo massimo ammesso* o al *bit-rate*), fino a quella BE, a priorità minore, generalmente schedulata con una politica FIFO (*First In First Out*).

In particolare, il lavoro svolto da A.Ganz e K.Wongthavarawat in [18], adotta proprio questa metodologia, la quale verrà confrontata con quella adottata nel nuovo algoritmo di scheduling proposto. Infatti, basandosi sulle linee guida del lavoro svolto da Ganz ed al., è stato sviluppato ed implementato in questa tesi, anche un algoritmo di scheduling che utilizza una priorizzazione dei servizi in base alla classe a cui appartengono. Prima vengono schedulati tutti i servizi UGS, poi quelli rtPS, poi quelli nrtPS ed infine, quelli BE. Infine, le due politiche di schedulazione vengono messe a confronto, analizzati i risultati e tratte le conclusioni.

4.2 L'algoritmo EDF (*Earliest Deadline First*)

L'*Earliest Deadline First* [3], anche conosciuto come *Nearest Deadline First*, è un algoritmo di schedulazione ottimo, a priorità dinamica, proposto da Liu e Layland [9], utilizzato in varie tipologie di sistemi *real-time*, in cui tipicamente, le richieste sono periodiche e devono essere soddisfatte entro un determinato periodo di tempo, dato dalla loro *deadline*. Infatti, come si è accennato in precedenza, l'elemento chiave dell'algoritmo EDF è rappresentato dall'utilizzo della *deadline*, che rappresenta il tempo massimo entro il quale la richiesta deve essere schedulata, altrimenti diventa inservibile. In particolare, nei servizi *real-time* questa deadline è periodica, cioè la richiesta si ripresenta per essere

schedulata, ad intervalli di tempo piuttosto regolari e costanti. Questo algoritmo, utilizza una "coda di priorità" nella quale inserisce in modo dinamico le varie richieste con la loro deadline. La priorità di ogni richiesta è data proprio dalla sua deadline ed ogni nuova richiesta che arriva, viene inserita nella coda in base al suo valore. In pratica, la richiesta che ha priorità maggiore è quella che ha la deadline più imminente. L'algoritmo EDF è di tipo *preemptive*, nel senso che, se arriva una richiesta con una deadline minore di quella in esecuzione, quest'ultima viene sospesa e viene eseguita quella con *deadline* più corta appena arrivata. Nell'algoritmo sviluppato in questa tesi, il principio di *preemptive* viene applicato considerando che la schedulazione delle richieste viene effettuata un frame alla volta; considerando la lunghezza tipica di un frame (intorno ai 10-20 msec), una deadline piuttosto imminente, ad esempio un video in real-time, non riuscirà mai comunque a cadere all'interno del frame attualmente in schedulazione. Pertanto, il principio di *preemptive* verrebbe applicato come minimo, nel frame successivo (il funzionamento dell'algoritmo verrà spiegato nei paragrafi successivi di questo capitolo). In un sistema EDF le priorità vengono assegnate in modo dinamico. Una richiesta che vuole essere soddisfatta riceve la massima priorità se la sua deadline è la più vicina tra tutte quelle delle altre già presenti nella coda, mentre riceve la minima priorità se la sua deadline è la più lontana. Dertouzos [12] ha dimostrato che l'EDF è un algoritmo ottimo e Liu e Layland [9] hanno provato che un insieme $\Gamma = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$ di n richieste periodiche è schedulabile con EDF *se e solo se*:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i} \leq 1$$

dove C_i rappresenta il tempo di esecuzione della *i-esima* richiesta e T_i rappresenta il periodo di tempo entro il quale la *i-esima* richiesta deve essere servita di nuovo. Secondo gli studi fatti da Liu e Layland, se il fattore di utilizzazione dell'insieme delle richieste è maggiore di uno, non esiste alcun algoritmo in grado di produrre una schedulazione fattibile. Il problema di questo algoritmo è che in condizioni di sovraccarico, l'insieme delle richieste che "mancano" la deadline diventa imprevedibile. Per questo motivo, per garantire che lo schedulatore rispetti ogni deadline, l'algoritmo EDF è spesso accompagnato da un "controllore" [23], il quale deve valutare se ogni nuova richiesta non sovraccarichi

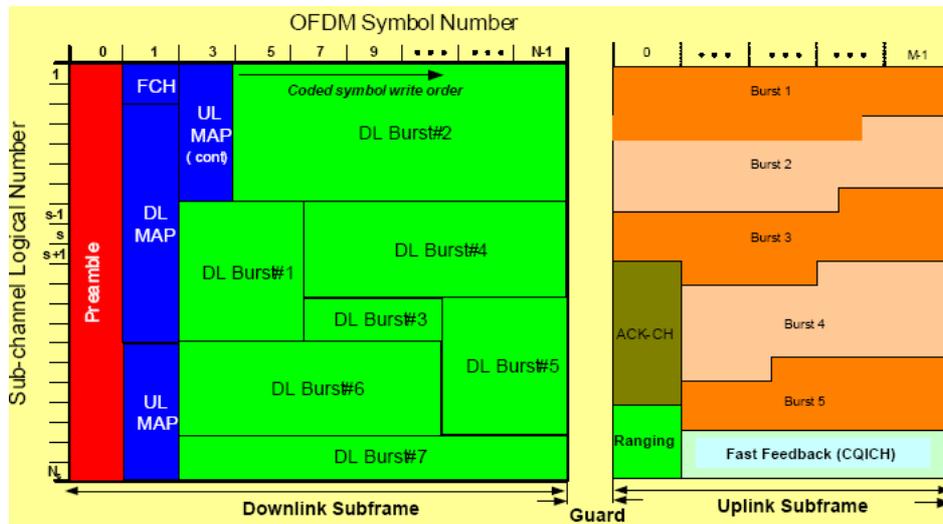


Figura 4.1: Esempio di struttura di un frame OFDMA nella modalità di duplexing TDD

il sistema ed eventualmente, rifiutarla.

4.3 Modello di riferimento adottato dallo scheduling

Il modello di riferimento che è stato preso in considerazione è quello illustrato nella Figura 4.1, già presentata nel paragrafo 2.4.3 del Capitolo 2.

La modalità di moltiplicazione del canale di trasmissione è quella TDD (*Time Division Duplexing*), secondo la quale il sistema utilizza l'intera banda di frequenza sia per le trasmissioni in *downlink* che per quelle in *uplink* ed il frame viene suddiviso, nel dominio del tempo, in "DL Subframe" ed "UL Subframe". La modalità di accesso al canale trasmissivo avviene con la tecnica OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), secondo la quale l'intera banda di frequenza viene suddivisa in sottocanali, ciascuno dei quali può essere assegnato ad utenti differenti nello stesso *time slot*. Questa tecnica sfrutta il fatto che utenti collocati in zone diverse, possono percepire le varie frequenze in modo diverso; per cui, una frequenza non buona per un utente può essere migliore per un altro che si trova in una posizione più favorevole.

Pertanto, il modello preso in considerazione dallo schedulatore implementato in questa tesi, è dato dalla combinazione delle due tecniche TDD/OFDMA, che poi rappresenta la "direzione" verso cui si sta orientando il "Mobile WiMax".

4.4 Il nuovo algoritmo di scheduling per il livello MAC

Lo standard IEEE 802.16e stabilisce che la schedulazione delle richieste da parte degli utenti sul canale di *uplink* debba avvenire sulla "Base Station" (BS) in modo centralizzato [27]. Con la schedulazione centralizzata è la BS che riceve tutte le richieste di trasmissione sul canale di *uplink* da parte degli utenti e che si occupa di assegnare loro i *time slot* ed i *sottocanali* necessari in un determinato *frame* fino al termine del servizio.

Come accennato in precedenza, lo schedulatore implementato in questa tesi, si basa sull'algoritmo **EDF** (*Earliest Deadline First*), il quale utilizza una "Coda di Priorità" in cui inserire le richieste di trasmissione in uplink degli utenti. La priorità di queste richieste è data dalla loro *deadline*, cioè dal tempo massimo che possono aspettare prima di essere schedulate, dopodiché devono essere scartate in quanto diventano inservibili. L'idea di applicare l'algoritmo EDF allo scheduling di pacchetti nelle reti *WiMax*, è scaturita dal fatto che lo standard 802.16e [27] prevede la possibilità di garantire la *QoS*, ma non specifica alcuna "politica di scheduling" dei servizi per ottenerla. Fin'ora in letteratura, sono stati proposti, per le reti "Mobile WiMax", algoritmi in cui la priorità di schedulazione dei pacchetti è data dalla priorità delle classi di servizio a cui appartengono. Il problema di una tale politica è rappresentato principalmente dal fatto che i servizi a priorità minore, che in genere sono quelli non paganti, rischiano di vedersi "succhiare" continuamente banda da quelli a priorità maggiore, che in genere sono quelli paganti. Pertanto, il nuovo algoritmo proposto, nasce proprio dall'idea di offrire una politica più equa per soddisfare le richieste di risorse da parte delle varie tipologie di servizio. Infatti, ordinando le richieste in base al loro tempo massimo di attesa, cioè in base alla loro *deadline*, anche quelle a priorità più bassa riusciranno ad ottenere banda entro un certo tempo "massimo" di attesa. Il tempo massimo di attesa di un servizio a bassa priorità,

come può essere un servizio *non real time* o *best effort* (ad esempio, il caricamento di una pagina web o il trasferimento di un file) viene fissato all'inizio, con un valore arbitrario, considerato ragionevolmente grande. In seguito, se il servizio una volta raggiunta la sua deadline non dovesse essere soddisfatto completamente, si può tentare di estenderla in modo proporzionale ai bits rimanenti da trasmettere, fino a quando non si riesce ad allocare interamente il servizio.

Per l'implementazione dello scheduling sono state fatte alcune ipotesi:

- Si considera che ogni utente possa effettuare alla BS una sola richiesta di servizio alla volta.
- La schedulazione delle richieste avviene un frame alla volta (come specificato dallo standard). Quando il frame è stato allocato tutto, allora si passa al frame successivo.
- Eventuali variazioni apportate alla richiesta di un servizio, come ad esempio, l'estensione della deadline di una richiesta BE, diventano applicabili a partire dal frame successivo (è necessario un certo tempo per calcolare i nuovi dati). Anche l'eventuale arrivo di nuove richieste nella coda, magari con priorità maggiore rispetto a quella che si sta allocando, produce effetti che sono applicabili a partire dal frame successivo; ad esempio, l'allocatione della richiesta corrente viene prerilasciata all'arrivo di una richiesta a priorità maggiore, a partire dal frame successivo (l'esempio illustrato più avanti chiarirà meglio il concetto).
- La richiesta che si trova in testa alla "coda di priorità" delle richieste sulla BS, è quella a priorità maggiore, cioè quella che ha la deadline più prossima alla scadenza e quindi, quella che verrà schedulata per prima.
- Per le richieste di servizi UGS (*Unsolicited Grant Service*) e rtPS (*real time Polling Service*) le informazioni sui dati da schedulare (come ad esempio, la quantità di bit) non sono subito disponibili al momento dell'arrivo della richiesta alla *Base Station*; si assume che diventino disponibili a partire dai due frame precedenti a quello in cui scade la deadline della richiesta.
- Per le richieste di servizi nrtPS (*non real time Polling Service*) e BE (*Best Effort*) invece, le informazioni sulla richiesta sono subito disponibili al mo-

mento dell'arrivo alla BS, la quale quindi, potrebbe iniziare a schedularle subito.

- Per i servizi nrtPS e BE viene assegnato alla deadline un valore "arbitrario", nel senso che se il tempo massimo fissato non dovesse essere sufficiente per schedulare tutto il servizio, allora si può estendere in modo proporzionale alla quantità di bits rimanente, fino a quando non si riesce a completare tutto.

4.4.1 Implementazione dell'algoritmo

Come prima cosa, si assume che l'algoritmo di scheduling sia centralizzato (come specificato dallo standard) e che quindi, venga eseguito sulla BS, la quale si occuperà di predisporre tutte le operazioni e le strutture dati necessarie per il suo funzionamento. L'algoritmo utilizza il principio dell'EDF, pertanto verrà assegnata ad ogni richiesta di servizio da parte degli utenti, una *deadline*, la quale verrà utilizzata dalla BS come ordine di schedulazione. Nel caso di servizi *UGS* o *rtPS*, si sono considerati dei valori medi di *deadline*, entro cui le richieste devono essere schedulate per non perdere pacchetti, e dei valori medi di *terminazione del servizio*, entro cui si considera conclusa la richiesta. Nel caso di servizi *nrtPS* o *BE*, non esiste una *terminazione del servizio*, o meglio, il servizio termina quando sono stati allocati tutti i bit; inoltre, il valore assegnato alla *deadline* è un valore fittizio, nel senso, che se non è sufficiente per allocare tutti i bits, allora può essere esteso.

Strutture dati utilizzate dall'algoritmo

La BS che utilizzerà l'algoritmo per l'allocazione delle richieste sul frame di uplink, avrà la necessità di utilizzare delle strutture dati nelle quali memorizzare sia le richieste degli utenti, sia le allocazioni dei time slot e dei sottocanali nei frame di uplink. In particolare, le ultime due informazioni sono essenziali per gli utenti stessi, che le riceveranno nel messaggio di "UL-MAP" inviato dalla BS nel *subframe* di downlink, perchè contengono le istruzioni di trasmissione delle loro richieste. Le principali strutture dati utilizzate sono:

- "*Coda di Richieste*": è la principale struttura dati utilizzata, la quale

contiene in ordine decrescente per *deadline*, tutte le richieste degli utenti raccolte dalla BS. La richiesta che è in testa alla coda è quella a priorità maggiore e pertanto, quella che otterrà per prima dalla BS, l'allocazione dei time slot e dei sottocanali nel frame corrente. Fintanto che questa coda non è vuota, l'algoritmo continua a girare, allocando time slot e sottocanali alle varie richieste.

- "*Coda di appoggio delle Richieste*": è la struttura dati in cui vengono momentaneamente depositate le richieste che non sono state completamente soddisfatte e per le quali non si può fare più niente nel frame corrente. Al termine dell'allocazione di ogni frame, quando cioè, non ci sono più time slot liberi o non ci sono richieste che possano essere allocate nel frame corrente, le richieste contenute in questa coda vengono trasferite in modo ordinato, nella "*Coda di Richieste*" per l'allocazione nel frame successivo.
- "*Matrice di allocazione dei subframe in Uplink*": è la struttura dati che contiene l'allocazione dei time slot e dei sottocanali delle richieste da parte della BS. In pratica, contiene tutte quelle informazioni che saranno necessarie agli utenti, per sapere in quali time slot e sottocanali del subframe di uplink, possono trasmettere i bits delle loro richieste.
- "*Array del Data Rate dei sottocanali*": è la struttura dati che indica per ogni utente la "bontà" dei sottocanali; infatti, si assume, che in un ambiente mobile, utenti diversi possano percepire gli intervalli di frequenza in modo diverso. L'algoritmo utilizza il principio secondo cui prima viene allocato il sottocanale con *data rate* maggiore, e poi via, via quelli con un *data rate* sempre minore.

Per un'esposizione più chiara dell'algoritmo, si riporta in *pseudocodice*, la logica di funzionamento:

```
while (Time slot > 0 in frame corrente && Coda Richieste > 0)
{
    Estrai Richiesta in testa a Coda Richieste;

    if (Richiesta UGS o rtPS e può essere soddisfatta nel frame corrente
        || Richiesta nrtPS o BE)
```

```

{
While (Bits da allocare && Sottocanali disponibili per l'utente)
{
For (Time slot fino a Deadline || Fino a lunghezza frame
    || Fino a Terminazione Servizio)
{
Alloca bits Richiesta al time slot sul sottocanale
con "data rate" maggiore;
}
}

if (Richiesta allocata tutta)
{
if (Richiesta UGS o rtPS)
{
if (Terminazione Servizio in frame successivi in cui "Nuova
Richiesta" può essere soddisfatta)
{
Inserisci "Nuova Richiesta" in Coda Appoggio;
}
}
else if (Richiesta nrtPS o BE)
{
Salva time slot del frame in cui Richiesta è stata
soddisfatta tutta;
}
Cancella Richiesta da Coda Richieste;
}

else if (Richiesta non allocata tutta)
{
if (Richiesta UGS o rtPS)
{
if (Deadline o Terminazione Servizio nel frame corrente)
{
Pacchetto perso;
}
}
}
}

```

```

    if (Terminazione Servizio in frame successivi in cui "Nuova
        Richiesta" può essere soddisfatta)
    {
        Inserisci "Nuova Richiesta" in Coda Appoggio;
    }
}
else if (Deadline non nel frame corrente)
{
    if (Terminazione Servizio non nel frame corrente)
    {
        Decrementa Bits Richiesta ancora da allocare
            nei frame successivi;
    }
    else if (Terminazione Servizio nel frame corrente)
    {
        Pacchetto perso;
    }
}
Cancella Richiesta da Coda Richieste;
}
else if (Richiesta nrtPS o BE)
{
    Decrementa Bits Richiesta ancora da allocare
        nei frame successivi;

    if (Deadline Richiesta nel frame corrente)
    {
        Estendi Deadline in proporzione ai Bits rimanenti da allocare;
    }
    Cancella Richiesta da Coda Richieste;
}
}
else if (Richiesta UGS o rtPS ma non può essere soddisfatta
        nel frame corrente)
{

```

```

    if (Terminazione Servizio nel frame corrente)
    {
        Cancella definitivamente Richiesta da Coda Richieste;
    }
    else
    {
        Togli momentaneamente Richiesta da Coda Richieste;
    }
}
if (Time slot == 0 || Coda Richieste vuota)
{
    Trasferisci Richieste in modo ordinato da Coda Appoggio
        a Coda Richieste;
    Applica tecnica "Sliding Windows": decrementa di un frame
        Deadline e Terminazione (per UGS e rtPS);
    Incrementa contatore di frame;
    Libera matrice di allocazione per il frame successivo;
}
}
}

```

Il dettaglio del codice dell'algoritmo nel linguaggio di implementazione utilizzato (C#) è riportato nell'appendice A.

4.4.2 Un esempio di funzionamento

Per una migliore comprensione dell'algoritmo, viene presentato un esempio di scheduling, che illustra la logica di funzionamento. Questo esempio è stato creato "ad-hoc", per mostrare le varie situazioni che si possono presentare nella schedulazione delle richieste utilizzando questo algoritmo.

Esempio.

Questo esempio è stato creato utilizzando "WiMaxSimulatorDemo", la versione dimostrativa appunto, dell'applicazione appositamente implementata in questa tesi, per effettuare le simulazioni del comportamento degli algoritmi di

	MAC	Kind	Bits	Deadline	Termination
	1	UGS	528	20	175
	2	rtPS	10000	34	80
	4	BE	14307	90	90
	3	nrtPS	12199	99	99

Figura 4.2: Esempio di Coda di Richieste ordinate per deadline

scheduling presi in considerazione. Una descrizione dettagliata dell'applicazione principale, "WiMaxSimulator" e della versione "Demo", viene data nel Capitolo 6.

Si suppone di avere **quattro** richieste di servizio, una per utente: una richiesta di tipo **UGS**, una di tipo **rtPS**, una di tipo **nrtPS** ed una di tipo **BE**. Supponiamo di avere un "subframe di uplink", su cui la BS alloca le richieste, composto per semplicità, da *10 time slot* e *20 sottocanali*. Al momento dell'arrivo delle richieste alla BS, l'algoritmo di scheduling le inserisce in ordine decrescente di *deadline* nella "Coda delle Richieste" (Figura 4.2). In testa alla coda ci sarà la richiesta a priorità più alta, quella che ha la **deadline** più prossima alla scadenza e che quindi, verrà estratta ed esaminata per prima.

La Figura 4.3 e la Figura 4.4 illustrano l'allocazione dei *time slot* e dei *sottocanali* alle varie richieste, da parte dell'*algoritmo di scheduling*, evidenziando anche come la "Coda delle Richieste" venga aggiornata, mano che queste vengono soddisfatte.

Nella Figura 4.3 viene rappresentata l'allocazione delle richieste nei primi cinque frame, nel modo seguente:

- L'algoritmo estrae la richiesta in testa alla coda (in questo caso, di tipo UGS) e siccome può essere allocata subito, gli assegna i time slot ed i sottocanali (nel *primo frame*), necessari per trasmettere i suoi bit; poi, siccome i bit della richiesta sono stati allocati tutti ed il servizio non termina ora, si aggiorna la *deadline* della richiesta al valore successivo (nell'esempio 40) e la si estrae momentaneamente dalla coda.

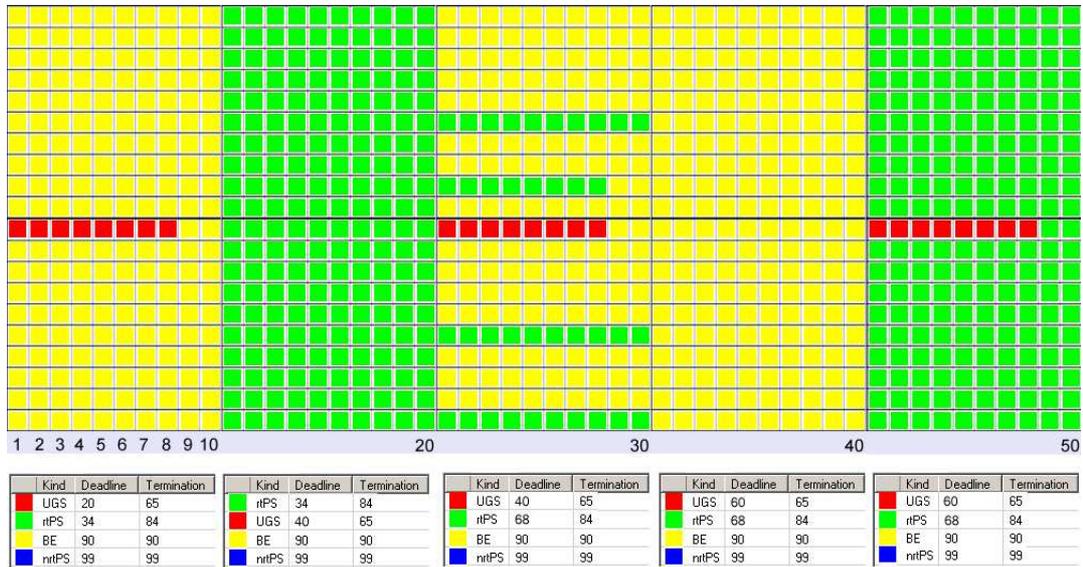


Figura 4.3: Esempio di allocazione dei frame in uplink

- Siccome nel *frame corrente* ci sono ancora dei time slot liberi, l'algoritmo estrae dalla coda la richiesta che ora è passata in testa e controlla se può allocarla; si tratta di una richiesta rtPS, i cui dati non sono ancora disponibili, perciò non può fare altro che toglierla momentaneamente dalla coda e passare ad esaminare la richiesta successiva.
- La richiesta successiva è di tipo BE e siccome i suoi dati sono subito disponibili, l'algoritmo alloca la maggiore quantità di bit possibile. Siccome l'allocazione nel frame corrente non è stata sufficiente per soddisfare totalmente la richiesta, l'algoritmo aggiorna la quantità di bit rimanenti e cancella momentaneamente la richiesta dalla coda, perchè tanto per ora, non può fare più niente per lei.
- Ora il *primo frame* è completamente allocato e siccome la condizione della "Coda di Richieste", nel frattempo, può essere cambiata, si reinseriscono tutte le richieste che erano state momentaneamente tolte dalla coda e si riordinano per *deadline*. In questo modo, a partire dal *frame successivo* (in questo caso, il secondo), si ricomincia ad allocare la richiesta con maggiore priorità, cioè quella con deadline più prossima alla scadenza.

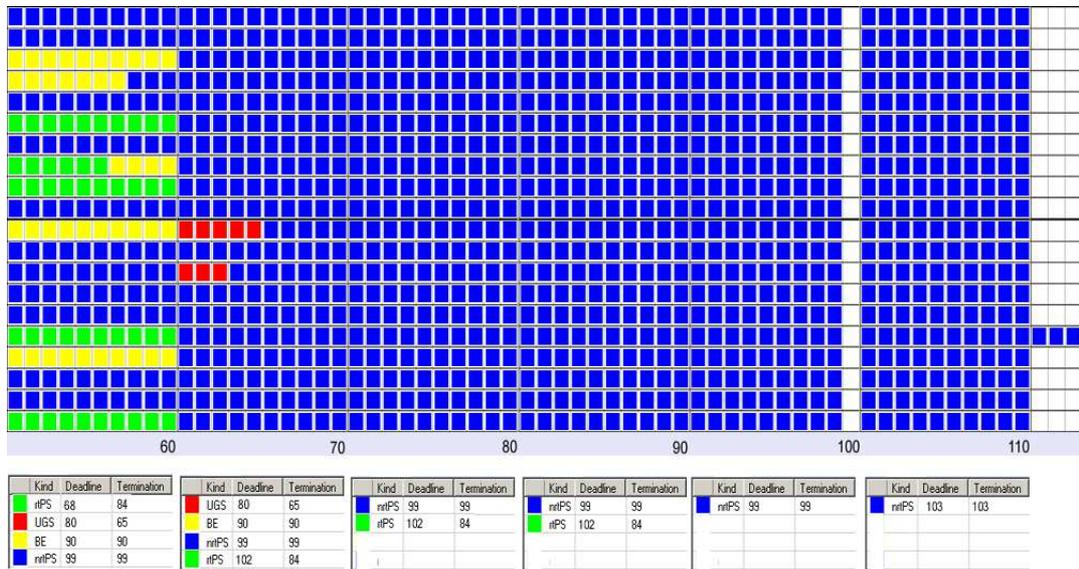


Figura 4.4: Esempio di allocazione dei frame in uplink

- Nel *secondo frame*, l'algoritmo alloca la richiesta rtPS, i cui dati sono ora disponibili e siccome la richiesta esaurisce tutti i time slot del frame, non si può fare altro che decrementare i bit da allocare e passare al frame successivo, riordinando di nuovo la "Coda di Richieste".
- Nel *terzo frame*, a seguito del riordino della coda in base alle deadline, la richiesta con maggiore priorità, torna ad essere quella UGS, la quale viene soddisfatta tutta e momentaneamente cancellata dalla coda; inoltre, siccome tale servizio non termina ora, si aggiorna anche la sua deadline al valore successivo (nell'esempio 60).
- Siccome nel frame corrente, ci sono ancora time slot disponibili, l'algoritmo passa ad esaminare la richiesta successiva, che è quella di tipo rtPS, la quale non avendo ancora raggiunto la sua deadline, può essere ancora allocata per i bit rimanenti. Pertanto, l'algoritmo finisce di allocare anche questa richiesta e se tale servizio non termina ora, aggiorna anche la sua deadline al valore successivo (nell'esempio 68). Tuttavia, nel frame corrente, ci sono ancora time slot liberi, pertanto l'algoritmo passa ad allocare anche la richiesta BE, decrementando il numero di bit rimanenti.

A questo punto, anche il *terzo frame* è completamente allocato e quindi, si procede ancora una volta, al riordino della "*Coda di Richieste*".

- Nel *quarto frame*, la richiesta di tipo UGS non è ancora disponibile, così come quella rtPS, pertanto l'algoritmo passa ad allocare la richiesta BE, decrementando ancora il numero di bits rimanenti.
- Nel *quinto frame*, la richiesta UGS è quella a maggiore priorità ed i suoi dati sono ora disponibili, pertanto l'algoritmo la alloca totalmente e siccome tale servizio non termina ora, aggiorna anche la sua deadline al valore successivo (nell'esempio 80) e la cancella momentaneamente dalla coda. Inoltre, poichè ci sono ancora time slot disponibili, l'algoritmo passa ad allocare anche la richiesta successiva, che è quella di tipo rtPS, diventata ora disponibile, decrementando il numero di bit rimanenti e cancellando momentaneamente la richiesta dalla coda. Ancora una volta, l'allocazione del frame corrente è terminata, pertanto si procede al riordino della "*Coda di Richieste*".
- Nel *sesto frame*, l'algoritmo continua ad allocare la richiesta rtPS, perchè è quella a priorità più alta che ha i dati disponibili. Inoltre, siccome questo servizio termina in un frame in cui un'eventuale sua nuova richiesta potrebbe essere soddisfatta, l'algoritmo aggiorna la deadline al nuovo valore (nell'esempio 102) e cancella momentaneamente la richiesta dalla coda. Siccome ci sono time slot ancora disponibili, l'algoritmo passa ad allocare anche la richiesta successiva, che è quella BE e la alloca totalmente, cancellando anche questa definitivamente dalla coda. Ma i time slot non sono ancora terminati, pertanto si passa ad allocare una nuova richiesta, che è quella di tipo nrtPS, decrementando i bit rimanenti e cancellando la richiesta momentaneamente dalla coda. Ora il frame è completamente allocato e quindi, si passa a riordinare la "*Coda di Richieste*".
- Nel *settimo frame*, è la richiesta UGS che ritorna ad avere la massima priorità; pertanto, l'algoritmo la alloca completamente e siccome tale servizio termina ora, cancella definitivamente la richiesta dalla coda. Inoltre, siccome ci sono ancora time slot disponibili, l'algoritmo passa ad allocare anche la richiesta successiva, che è quella di tipo nrtPS.

- Anche nell'*ottavo frame*, l'algoritmo continua ad allocare la richiesta nrtPS, poichè è quella con priorità più alta. Siccome questa richiesta esaurisce tutti i time slot nel frame corrente, l'algoritmo aggiorna i bit rimanenti, riordina la coda e passa al frame successivo.
- Anche nel *nono frame*, la richiesta nrtPS continua ad essere quella a maggiore priorità, pertanto l'algoritmo continua ad allocarla il più possibile e a decrementare i suoi bit. Questa richiesta riesce ad esaurire i time slot del frame corrente, pertanto la richiesta successiva, che sarebbe quella rtPS, il cui servizio termina proprio in questo frame (nell'esempio 84), non verrà mai soddisfatta e l'algoritmo non potrà fare altro che cancellarla definitivamente dalla coda ed annotarsi che un pacchetto di tale servizio è andato perso. In questo modo, si evita che le richieste dei servizi nrtPS o anche BE, vengano continuamente "scavalcate" dalle richieste dei servizi UGS o rtPS, assicurando quindi, che anche loro, alla scadenza della deadline, otterranno le risorse di cui necessitano.
- Nel *decimo frame*, l'algoritmo non riesce comunque ad allocare completamente la richiesta nrtPS entro la sua deadline (nell'esempio 99) quindi, decide di prolungarla in modo proporzionale alla quantità di bit rimanenti (nell'esempio, fino a 103). Pertanto, l'allocazione della richiesta nrtPS termina nell'*undicesimo frame*, anzichè nel *decimo*. Una cosa da notare nell'estensione della deadline, è che essa diventa operativa a partire dal frame successivo.
- In conclusione, il risultato della schedulazione, utilizzando questo algoritmo, è illustrato nella Figura 4.5. Come si può notare, l'algoritmo riesce a servire in modo completamente corretto, senza perdita di pacchetti, il servizio UGS e riesce a completare, anche prima della deadline, la richiesta del servizio BE; mentre, perde un pacchetto del servizio rtPS ed è costretto ad estendere la deadline del servizio nrtPS.

Comunque, l'esempio presentato non corrisponde ad una situazione di simulazione reale, con veri dati delle richieste, delle caratteristiche del frame e delle condizioni dei sottocanali. E' stato illustrato semplicemente con l'obiettivo di

<i>UGS Service Class</i>				<i>nrtPS Service Class</i>			
	MAC	Await Packet	Lost Packet		MAC	Await Termination	Termination
	1	4	0		3	99	113

<i>rtPS Service Class</i>				<i>BE Service Class</i>			
	MAC	Await Packet	Lost Packet		MAC	Await Termination	Termination
	2	3	1		4	90	60

Figura 4.5: Risultati della schedulazione per il frame di uplink

facilitare la spiegazione del funzionamento dell'algoritmo. Le simulazioni reali dell'algoritmo verranno eseguite e valutate nel Capitolo 5.

4.5 L'algoritmo di MAC Scheduling per il confronto

La logica di scheduling implementata nell'algoritmo proposto in questa tesi, viene confrontata con quella maggiormente utilizzata negli algoritmi di scheduling proposti in letteratura. Questa politica utilizza la "priorità delle classi di servizio" come ordine di schedulazione delle rispettive richieste, vale a dire, che prima vengono allocate tutte le richieste che appartengono alla classe UGS, poi tutte quelle che appartengono alla classe rtPS, poi quelle della classe nrtPS ed infine, quelle BE. Quindi, in questa tesi, è stato implementato, anche l'algoritmo di scheduling che utilizza questa logica, con cui effettuare il confronto, adottando le stesse assunzioni utilizzate per l'altro algoritmo ed esposte nel paragrafo precedente.

4.5.1 Implementazione dell'algoritmo

Anche per questo algoritmo, si assume che venga eseguito sulla BS, la quale predisporrà tutte le operazioni e le strutture dati necessarie per il suo funzionamento. Questo algoritmo, utilizza una "Coda di Richieste" per ogni classe di servizio (UGS, rtPS, nrtPS e BE), all'interno delle quali, applica una politica di schedulazione. Le 'Coda di Richieste' vengono prese in esame per la schedulazione, in base alla loro priorità, prima le richieste UGS, poi quelle rtPS, poi quelle nrtPS ed infine, quelle BE. All'interno di ogni "Coda di Richieste" viene applicata una politica di scheduling: nelle code UGS e rtPS, le richieste dei vari utenti, vengono ordinate in base alla loro *Deadline*, nelle code nrtPS vengono ordinate in base al *data rate* che richiedono ed infine, nelle code BE vengono ordinate secondo una politica FIFO (*First In First Out*). Anche in questo caso, vengono considerati dei valori medi da assegnare alle *deadline* ed alla *terminazione* dei servizi UGS e rtPS, mentre non viene assegnata alcuna *deadline* ai servizi nrtPS e BE.

Strutture dati utilizzate dall'algoritmo

Anche in questo caso, la BS che utilizzerà questo algoritmo, avrà bisogno di strutture dati nelle quali memorizzare le varie richieste degli utenti e le allocazioni dei time slot e dei sottocanali per il *subframe di uplink*. Le principali strutture dati utilizzate sono:

- 'Coda di Richieste UGS': rappresenta la struttura dati che contiene le richieste per ordine decrescente di *deadline*; rappresenta la coda a maggiore priorità.
- 'Coda di Richieste rtPS': rappresenta la struttura dati che contiene le richieste per ordine decrescente di *deadline*.
- 'Coda di Richieste nrtPS': rappresenta la struttura dati che contiene le richieste per ordine decrescente di '*data rate*' che richiedono.
- 'Coda di Richieste BE': rappresenta la struttura dati che contiene le richieste ordinate secondo la politica FIFO, in testa alla coda si trova la richiesta che è arrivata per prima.

- ‘*Coda di appoggio delle Richieste*’: possiede le stesse proprietà descritte per l’algoritmo precedente.
- ‘*Matrice di allocazione dei subframe in Uplink*’: è la struttura dati che contiene l’allocazione dei time slot e dei sottocanali delle richieste da parte della BS. In pratica, contiene tutte quelle informazioni che saranno necessarie agli utenti, per sapere in quali time slot e sottocanali del subframe di uplink, possono trasmettere i bits delle loro richieste.
- ‘*Array del Data Rate dei sottocanali*’: è la struttura dati che indica per ogni utente la ‘bontà’ dei sottocanali; infatti, si assume, che in un ambiente mobile, utenti diversi possano percepire gli intervalli di frequenza in modo diverso. L’algoritmo utilizza il principio secondo cui prima viene allocato il sottocanale con *data rate* maggiore, e poi via, via quelli con un *data rate* sempre minore.

Inoltre, anche per questo algoritmo, vengono utilizzate una ‘*Coda di appoggio delle Richieste*’, una ‘*Matrice di allocazione dei subframe in Uplink*’ ed un ‘*Array del Data Rate dei sottocanali*’, con le stesse funzionalità descritte per l’algoritmo precedente.

Anche in questo caso, per un’esposizione più chiara dell’algoritmo, si riporta in *pseudocodice*, la logica di funzionamento. Inoltre, le istruzioni comuni che vengono ripetute all’interno di ogni coda, vengono inglobate in procedure che poi vengono richiamate all’interno del codice:

- ***Procedura di Allocazione dei time slot e dei sottocanali per le Richieste di tipo real time:***

```

Allocazione_timeslots_subchannels_Richiesta_realttime(Richiesta)
{
    While (Bits > 0 && Sottocanali > 0 per l’utente)
    {
        For (Time slot fino a Deadline || Fino a lunghezza frame
            || Fino a Terminazione Servizio)
        {
            Alloca bits Richiesta al time slot sul sottocanale

```

```

        con "data rate" maggiore;
    }
}
}

```

- *Procedura di Controllo per verificare se la Richiesta real time è stata allocata tutta o se rimangono dei bits ancora da allocare:*

```

Controllo_AllocazioneCompletata_Richiesta_realtime(Richiesta)
{
    if (Richiesta allocata tutta)
    {
        if (Terminazione Servizio in frame successivi in cui "Nuova
            Richiesta" può essere soddisfatta)
        {
            Inserisci "Nuova Richiesta" in Coda Appoggio;
        }
        Cancella definitivamente Richiesta da Coda Richieste;
    }
    else if (Richiesta non allocata tutta)
    {
        if (Deadline o Terminazione Servizio nel frame corrente)
        {
            Pacchetto perso;

            if (Terminazione Servizio in frame successivi in cui "Nuova
                Richiesta" può essere soddisfatta)
            {
                Inserisci "Nuova Richiesta" in Coda Appoggio;
            }
            else if (Deadline non nel frame corrente)
            {
                if (Terminazione Servizio non nel frame corrente)
                {
                    Decrementa Bits Richiesta ancora da allocare
                        nei frame successivi;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        else if (Terminazione Servizio nel frame corrente)
        {
            Pacchetto perso;
        }
    }
    Cancella Richiesta da Coda Richieste;
}
}

```

- ***Procedura di Salto dell'Allocazione della Richiesta real time per il frame corrente:***

```

Salta_Allocazione_Richiesta_realtime(Richiesta)
{
    if (Richiesta non può essere allocata nel frame corrente)
    {
        if (Terminazione Servizio nel frame corrente)
        {
            Cancella definitivamente Richiesta da Coda Richieste;
        }
        else
        {
            Togli momentaneamente Richiesta da Coda Richieste;
        }
    }
}
}

```

- ***Procedura di Allocazione dei time slot e dei sottocanali per le Richieste di tipo non real time e best effort:***

```

Allocazione_timeslots_subchannels_Richieste_nonrealtime(Richiesta)
{
    While (Bits > 0 && Sottocanali > 0 per l'utente)
    {
        For (Time slot fino a Deadline || Fino a lunghezza frame)
        {
            Alloca bits Richiesta al time slot sul sottocanale
        }
    }
}

```

```

        con "data rate" maggiore;
    }
}
}

```

- *Procedura di Controllo per verificare se la Richiesta non real time o best effort è stata allocata tutta o se rimangono dei bits ancora da allocare:*

```

Controllo_AllocazioneCompletata_Richiesta_nonrealtime(Richiesta)
{
    if (Richiesta allocata tutta)
    {
        Salva time slot del frame in cui Richiesta viene
        completamente soddisfatta;
    }
    else if (Richiesta non allocata tutta)
    {
        Aggiorna Bits rimanenti da allocare;
    }
    Cancella Richiesta da Coda Richieste;
}

```

Il procedimento completo dell'algoritmo è riassunto nel seguente pseudocodice:

```

While (Time Slot > 0 && Almeno una coda non vuota)
{
    if (Richieste nella coda UGS)
    {
        Estrai Richiesta in testa alla coda;

        if (Richiesta può essere soddisfatta nel frame corrente)
        {
            Allocazione_timeslots_subchannels_Richiesta_realtime(Richiesta);

            Controllo_AllocazioneCompletata_Richiesta_realtime(Richiesta);
        }
    }
}

```

```

else (Richiesta non può essere soddisfatta nel frame corrente)
{
    Salta_Allocazione_Richiesta_realtime(Richiesta);
}
}
if (Time Slot > 0 && Coda UGS vuota)
{
    if (Richieste nella Coda rtPS)
    {
        Estrai Richiesta in testa alla coda;

        if (Richiesta può essere soddisfatta nel frame corrente)
        {
            Allocazione_timeslots_subchannels_Richiesta_realtime(Richiesta);

            Controllo_AllocazioneCompletata_Richiesta_realtime(Richiesta);
        }
        else if (Richiesta non può essere soddisfatta nel frame corrente)
        {
            Salta_Allocazione_Richiesta_realtime(Richiesta);
        }
    }
}
if (Time Slot > 0 && Coda rtPS vuota)
{
    if (Richieste nella Coda nrtPS)
    {
        Estrai Richiesta in testa alla coda;
        Allocazione_timeslots_subchannels_Richieste_nonrealtime(Richiesta);
        Controllo_AllocazioneCompletata_Richiesta_nonrealtime(Richiesta);
    }
    if (Time Slot > 0 && Coda nrtPS vuota)
    {
        if (Richieste nella Coda BE)
        {
            Estrai Richiesta in testa alla coda;
            Allocazione_timeslots_subchannels_Richieste_

```

```

        _nonrealtime(Richiesta);
        Controllo_AllocazioneCompletata_Richiesta_
        _nonrealtime(Richiesta);
    }
}
}
}
if (Time slot == 0 && Tutte le code vuote)
{
    Trasferisci Richieste in modo ordinato dalla Coda di Appoggio
        alle rispettive Code di Richieste;
    Applica tecnica "Sliding Windows" ai servizi UGS e rtPS:
        decrementa di un frame Deadline e Terminazione;
    Incrementa contatore di frame;
    Libera matrice di allocazione per il frame successivo;
}
}

```

Il dettaglio del codice dell'algoritmo nel linguaggio di implementazione utilizzato (C#) è riportato nell'appendice A.

Nel capitolo successivo verranno descritte le simulazioni dei due algoritmi di *MAC Scheduling*, mettendo in evidenza i risultati dell'uno e dell'altro, ottenuti considerando per entrambi, le stesse richieste di servizio da parte degli utenti. Questo vuol dire, che i due algoritmi, sono stati fatti lavorare nelle stesse identiche condizioni di traffico.

Capitolo 5

L'Applicazione

” *WiMaxSimulator* ”

Una componente fondamentale della tesi è rappresentata da ” *WiMaxSimulator* ”, l'applicativo sviluppato per simulare il comportamento degli algoritmi di scheduling e studiarne i risultati. Ad oggi, gli attuali simulatori delle varie architetture di rete disponibili, come ad esempio, ”OPNET” o ”ns2”, non prevedono ancora l'implementazione di moduli per la simulazione di reti WiMax. Pertanto, si è deciso di implementare in questa tesi, un'applicazione ” *ad-hoc* ”, che permettesse di testare il comportamento degli algoritmi di scheduling dei pacchetti in varie condizioni di traffico. Inizialmente, questo applicativo era stato ideato appositamente per studiare il comportamento dello specifico algoritmo di scheduling implementato in questa tesi, ma poi, si è deciso di svilupparlo in modo ” *modulare* ”, per dare la possibilità anche in seguito, di aggiungere e testare nuovi moduli, riappresentati da un qualunque algoritmo di scheduling per reti WiMax. Pertanto, tale applicazione non è semplicemente fine a sè stessa, ma rappresenta una ” *piattaforma generica* ”, sulla quale poter testare il comportamento di un qualsiasi algoritmo di ” *MAC scheduling* ” che dovesse essere adottato sulla *Base Station* di una rete WiMax. Inoltre, siccome il comportamento dell'algoritmo di scheduling risultava piuttosto complicato da verificare, si è deciso di implementare anche un ” *modulo grafico* ”, solo ed esclusivamente per effettuare il *debugging* dell'algoritmo. Tale modulo, non fa altro che rappresentare grafi-

camente su di una matrice $m \times n$ (m = numero di *time slot*, n = numero di *sottocanali*), l'allocazione dei *time slot* e dei *sottocanali* dei frame, alle varie richieste degli utenti. Questo modulo in realtà, non fa parte dell'applicazione finale, ma può essere considerato più come uno "*strumento di ausilio*", che può essere utilizzato dallo sviluppatore nel corso dell'implementazione dell'algoritmo, per verificare il suo corretto funzionamento. Comunque, si è deciso di inserirlo nella versione "*WiMaxSimulatorDemo*" dell'applicazione, per dare la possibilità, ad eventuali sviluppatori futuri, di poterlo utilizzare (maggiori dettagli nel paragrafo 6.2).

L'ambiente di sviluppo dell'applicazione è quello "*Microsoft .NET*" ed il linguaggio utilizzato per l'implementazione è quello orientato agli oggetti di C#, con l'ausilio del "*Visual Studio 2005*". Nel seguito del capitolo, verranno presentate l'architettura e le componenti fondamentali dell'applicazione, rimandando la visione del codice completo all'appendice A.

5.1 Architettura dell'Applicazione

L'applicazione è costituita da due componenti essenziali: "*WiMaxSimulator*" e "*CommonScheduler*".

5.1.1 Componente "*WiMaxSimulator*"

Rappresenta la componente di sviluppo propria delle caratteristiche di rete. Quindi, contiene l'implementazione del generatore di traffico, degli utenti, dei servizi, delle richieste, della *Base Station* e del ripetitore automatico della simulazione:

- Classe "*TrafficGeneratorForm*": si occupa di offrire un'interfaccia grafica all'utilizzatore dell'applicazione, per consentirgli di decidere quante richieste creare di ogni tipo (UGS, rtPS, nrtPS, BE), quali algoritmi di scheduling applicare e se vuole la ripetizione automatica di un certo numero di simulazioni oppure, intende effettuare una simulazione singola (Figura 5.1). Questa classe è stata implementata in modo da consentire la visualizzazione di tutti gli "*algoritmi di scheduling*" implementati ed inseriti in un'apposita cartella. Questo vuol dire, che un qualunque

Figura 5.1: Screen shot della Form di creazione dei servizi e di selezione degli scheduler

algoritmo di scheduling che dovesse essere implementato ed inserito in seguito, verrebbe automaticamente "caricato" dall'interfaccia e presentato come alternativa all'utilizzatore del sistema. Con tale metodo, il sistema è in grado di istanziare gli algoritmi di scheduling in modo "dinamico", cioè soltanto quelli che sono stati selezionati dall'utente. Questo meccanismo quindi, rende il sistema "modulare" e "dinamico", pronto a ricevere e ad applicare qualunque algoritmo di scheduling.

- Classe "*RepeatSimulation*": si occupa di ripetere la stessa simulazione (nel senso che mantiene la stessa proporzione dei servizi), per un numero di volte specificato nella Form iniziale di generazione del traffico (*TrafficGeneratorForm*). Infatti, selezionando l'opzione *Quick Simulation* e specificando il numero di ripetizioni, si ottengono i risultati della simulazione di ogni scheduler ("*media dei pacchetti persi*" e "*ritardo medio*", che saranno presentati nel Capitolo 6), direttamente in un file di testo. Tutto questo, senza generare le interfacce grafiche di visualizzazione dei parametri del traffico, come ad esempio, la quantità di bits di ogni servizio, la deadline,

la terminazione, la coda di priorità utilizzata dallo schedulatore, etc.

- Classe "*TrafficGenerator*": rappresenta la classe che si occupa di generare gli utenti della rete, su richiesta (tramite interfaccia grafica) dell'utilizzatore dell'applicazione e di attivare la *Base Station* corrispondente, passandogli gli utenti creati con la rispettiva richiesta del loro servizio. In pratica, questa è la classe che innesca tutto il meccanismo, che porterà la BS ad effettuare la schedulazione delle richieste dei servizi. Inoltre, si occuperà durante la schedulazione, di ricreare le richieste UGS e rtPS degli utenti, fino alla terminazione del servizio.
- Classe "*BaseStation*": rappresenta la classe che si occupa di ricevere le richieste di servizio da parte degli utenti e di inviarle agli "*schedulatori*" selezionati, chiedendo loro di predisporre tutte le operazioni necessarie per attivare il procedimento di scheduling in modo corretto. Ad esempio, richiede agli schedulatori di ordinare le richieste trasmesse, applicando le rispettive politiche di prioritizzazione del traffico. In questo modo, tutte le strutture dati sono pronte per dare il via alla schedulazione.
- Classe "*User*": rappresenta la classe degli utenti della rete creati dal "generatore di traffico". Sono gli utenti che chiedono alla BS di schedulare in uplink le loro richieste di trasmissione dei servizi. Ogni utente, quando viene generato, possiede delle proprietà, come ad esempio, l'indirizzo MAC (che lo identifica in modo univoco all'interno della rete), la BS a cui è registrato, la bontà di trasmissione dei suoi sottocanali, il servizio che richiede alla BS.
- Classe "*Service*": rappresenta la classe che genera il particolare servizio richiesto dall'utente. Quando un utente crea un oggetto di questa classe, gli passa anche la lista delle caratteristiche che deve possedere: la tipologia del servizio (UGS, rtPS, nrtPS, BE), la quantità di bit da trasmettere, la deadline e la terminazione del servizio.
- Classe "*Request*": rappresenta la classe delle richieste che gli utenti rivolgono alla BS per ottenere la schedulazione in uplink del loro servizio. La BS possiede una lista di tutti gli utenti registrati, ciascuno con la sua richiesta di scheduling in uplink del servizio. Ciascuna richiesta, possiede un

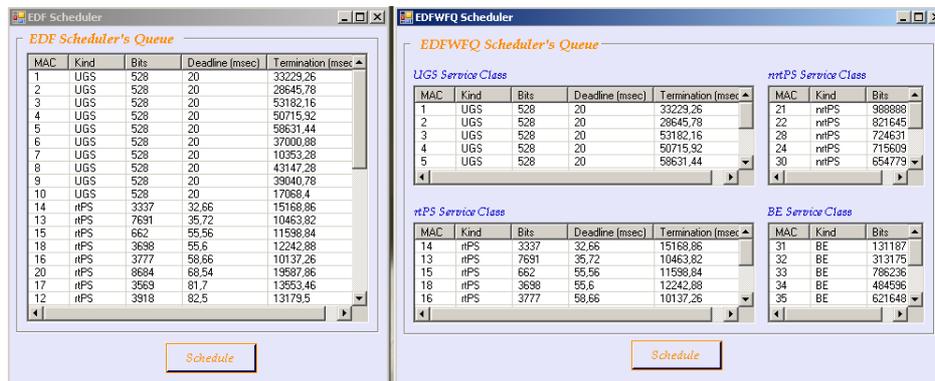


Figura 5.2: Screen shots delle "Code di Richieste" per gli scheduler EDF ed EDFWFQ

insieme di proprietà necessarie alla BS per procedere alla schedulazione: il "MAC" (identifica l'utente a cui appartiene), il "service" (identifica il servizio con tutte le sue caratteristiche), il *time slot* del frame dove il servizio è terminato (in caso di applicazioni non real time) ed eventuali pacchetti persi (in caso di applicazioni real time).

5.1.2 Componente "CommonScheduler"

Rappresenta la componente di sviluppo propria delle "politiche di scheduling". Pertanto, contiene l'implementazione degli algoritmi di scheduling:

- Interfaccia "Scheduler": rappresenta l'interfaccia comune, da cui derivano tutti gli scheduler. Contiene la definizione di tutte le *proprietà* ed i *metodi* comuni a tutti gli scheduler, i quali poi, le implementeranno in modo specifico a seconda delle proprie esigenze.
- Classe "EDFScheduler": rappresenta l'implementazione, sotto forma di *libreria (dll)*, del nuovo algoritmo di scheduling sviluppato nella tesi. Questa classe implementa la "Coda di Richieste" degli utenti, ordinate per *deadline* e la "politica di scheduling" che utilizza: viene allocata la richiesta di servizio che ha la *deadline* più prossima alla scadenza. Inoltre, offre un'interfaccia grafica che visualizza l'ordinamento della "Coda di Richieste". La

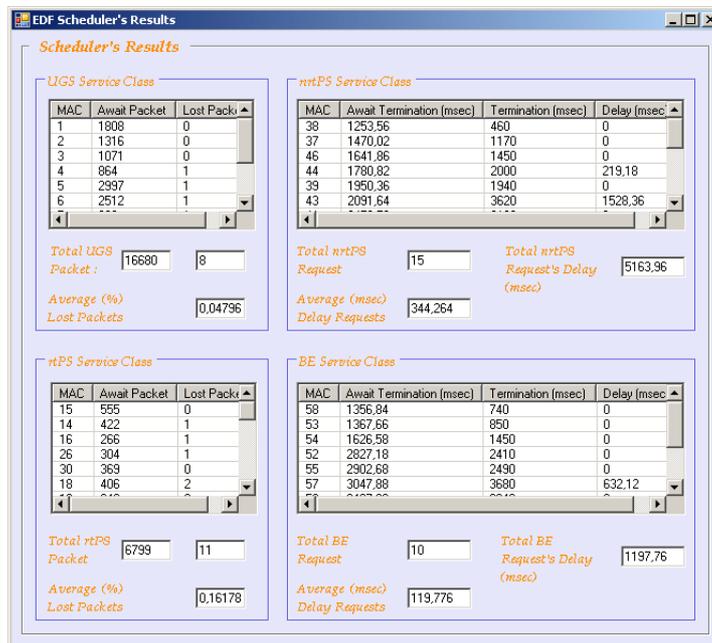


Figura 5.3: Screen shots delle "Code di Richieste" per gli scheduler EDF ed EDFWFQ

prima immagine della Figura 5.2 mostra questa coda ordinata di richieste. L'algoritmo di schedulazione per lo "Scheduler EDF", è stato esposto in dettaglio nel Capitolo 4.

- Classe "EDFWFQScheduler": rappresenta l'implementazione dell'altro algoritmo con cui è stato confrontato quello precedente. Anche questa classe è sviluppata sottoforma di libreria ed implementa anche lei una "politica di scheduling": viene sempre allocata la richiesta che appartiene alla classe di servizio con maggiore priorità. Inoltre, offre un'interfaccia grafica per visualizzare l'ordinamento delle sue "Code di Richieste". La seconda immagine nella Figura 5.2, illustra queste code ordinate. L'algoritmo di schedulazione per lo "Scheduler EDFWFQ", è stato esposto in dettaglio nel Capitolo 4.
- Classe "ResultForm": rappresenta l'interfaccia grafica di presentazione dei risultati della simulazione, suddivisi per classi di servizio (Figura 5.3). In particolare, viene mostrato il dettaglio di ogni richiesta: ad esempio,

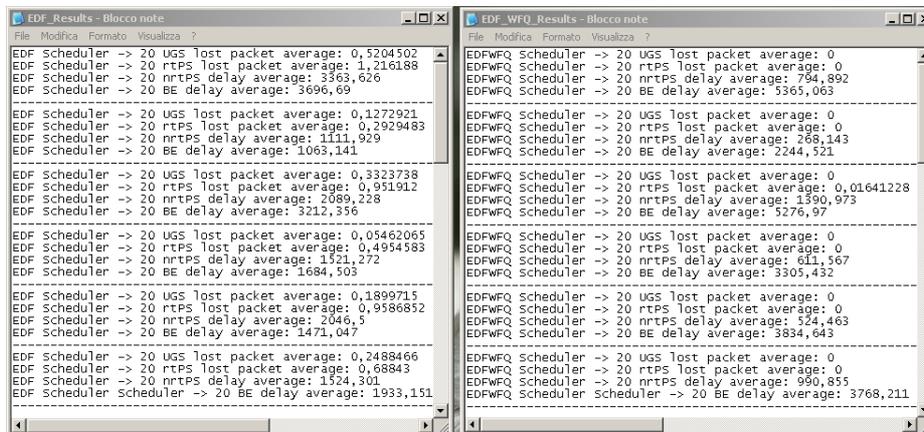


Figura 5.4: Screen shots delle "Code di Richieste" per gli scheduler EDF ed EDFWQ

per i servizi UGS e rtPS, viene visualizzato il numero di pacchetti persi, mentre per i servizi nrtPS e BE, viene visualizzato l'eventuale ritardo nel completare l'allocazione del servizio. In fondo ad ogni classe di servizio poi, vengono specificati il "numero medio di pacchetti persi" (espresso in percentuale sul numero totale di pacchetti attesi) ed il "ritardo medio di attesa" per la terminazione del servizio (espresso come media aritmetica tra il ritardo complessivo ed il numero totale di servizi). Questi parametri comunque, saranno illustrati in dettaglio nel Capitolo 6 delle Simulazioni.

- I "File dei risultati": sono dei file di testo, dove ciascuno scheduler riporta i risultati delle sue simulazioni, nel caso in cui, l'utilizzatore del sistema, aveva specificato l'opzione "Quick Simulation", sulla Form di apertura dell'applicazione. Infatti, quando si desidera effettuare un certo numero di simulazioni, mantenendo la stessa composizione del traffico, intesa come numero di richieste per ogni tipologia di servizio, i risultati di ognuna, vengono riportati da ogni scheduler nel rispettivo file di testo. La Figura 5.4 illustra il contenuto di questi file, per ognuno degli scheduler sviluppati nella tesi.

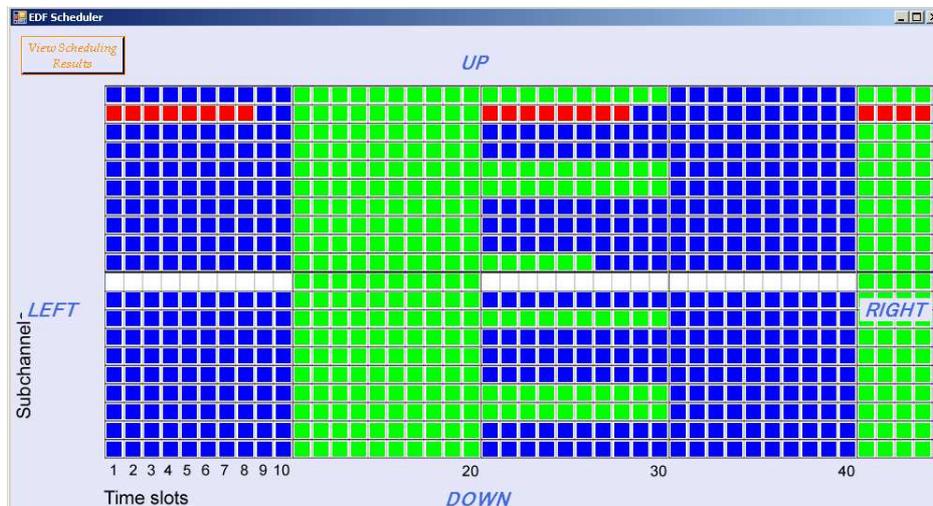


Figura 5.5: Screen shot della griglia di allocazione dei *time slot* e dei *sottocanali* alle richieste degli utenti

5.2 "Modulo di Debugging" dell'Applicazione

Si è deciso di inserire questo "modulo" nella versione "WiMaxSimulatorDemo" dell'applicazione, per dare la possibilità anche ad eventuali sviluppatori futuri del sistema, di poterlo utilizzare. In questo modulo, si ricorre all'utilizzo dei *colori*, per individuare le varie richieste degli utenti e all'immagine di una *griglia* per visualizzare l'allocazione dei *time slot* a tali richieste, nei frame di uplink. "WiMaxSimulatorDemo" rappresenta una versione, per così dire "*limitata*" dell'applicazione, in quanto i parametri che esprimono il numero di utenti, le quantità di bit delle richieste, le deadline, le terminazioni dei servizi, il numero di *time slot*, dei *sottocanali* e dei *frame*, è limitato, cioè non rispondente ad una situazione di simulazione reale. In pratica, consente semplicemente di fare dei *test* di verifica sul corretto funzionamento dell'algoritmo di scheduling. La Figura 5.5 illustra un esempio di allocazione di questa griglia, dove ogni colore rappresenta l'allocazione di un servizio.

Nel Capitolo 6 verranno affrontate le simulazioni dei due algoritmi di scheduling, con l'obiettivo di evidenziare i comportamenti dell'uno e dell'altro, in varie

condizioni di traffico, con maggiore presenza di richieste di servizio real time, oppure non real time. I due algoritmi verranno confrontati sulla base di due metriche: la "*Percentuale di Perdita dei Pacchetti Real Time*", rispetto al totale dei pacchetti trasmessi ed il "*Ritardo Medio di Completamento dei Servizi Non Real Time*", rispetto al ritardo complessivo di terminazione di tutte le richieste non real time.

Capitolo 6

Le Simulazioni

In questo capitolo, vengono presentate le simulazioni dei due "algoritmi di scheduling" (implementati nella tesi ed illustrati nel Capitolo 4), con l'obiettivo di mettere a confronto le prestazioni delle loro politiche di allocazione delle richieste di servizio da parte degli utenti. Ciò che ci si aspetta dal nuovo algoritmo, è un comportamento che riesca a ridurre il ritardo medio di schedulazione dei servizi non real time (generalmente, il traffico non pagante), rispetto all'altro algoritmo, che privilegia la schedulazione dei servizi real time (generalmente, il traffico pagante). Per eseguire le simulazioni è stato utilizzato "WiMaxSimulator", l'applicativo implementato per testare il comportamento degli "algoritmi di scheduling in uplink" dei pacchetti dei servizi di rete "Mobile WiMax". Come si era osservato nel Capitolo 4, la maggior parte degli algoritmi di scheduling per reti WiMax presenti in letteratura, utilizzano una politica di schedulazione che garantisce il rispetto della QoS (*Quality of Service*), suddividendo le varie tipologie di richieste degli utenti, in "Classi di Servizio", ciascuna con una sua priorità. Secondo questa politica, i servizi a priorità maggiore e quindi, quelli che verranno schedulati per primi, saranno quelli che appartengono alla classe UGS (*Unsolicited Grant Service*), poi verranno schedulati quelli che appartengono alla classe rtPS (*real time Polling Service*), poi quelli nrtPS (*non real time Polling Service*) ed infine, quelli BE (*Best Effort*). Una tale politica però, non è molto "equa", se si considera il fatto che i servizi *non real time* e *best effort* vengono eseguiti sempre per ultimi, rischiando tra l'altro, di non

avere più banda disponibile per trasmettere i propri dati entro un intervallo di tempo accettabile. Ecco qua, che il "ritardo" nella schedulazione, può diventare un parametro significativo anche per i servizi non real time, rischiando di farli rallentare fino a livelli non più accettabili. Per tale motivo, è stato proposto in questa tesi, un nuovo algoritmo di scheduling, che fosse più "equo", rispetto al precedente, nello schedulare in uplink le varie tipologie di pacchetto. Infatti, l'utilizzo del "ritardo massimo ammesso", cioè della *deadline*, come politica di prioritizzazione del traffico, consente a tutti i pacchetti che la raggiungono, di essere schedulati. Secondo questa politica, ad ogni richiesta di servizio viene assegnata una *deadline*, la quale stabilisce l'ordine di schedulazione: la richiesta a priorità maggiore è quella che ha la deadline più prossima alla scadenza. Quindi, anche i servizi non real time, per quanto abbiano una deadline piuttosto elevata, arriveranno in cima alla coda di priorità e pertanto, verranno schedulati.

L'obiettivo della simulazione è quello di valutare quanto, il nuovo algoritmo proposto, sia "equo" nell'assegnare ad ogni tipologia di pacchetto, la possibilità di essere schedulato. In pratica, quello che ci si attende da tale algoritmo, è che consenta ai servizi *non real time* e *best effort*, di essere schedulati e quindi, di ricevere banda, entro un intervallo di tempo accettabile. Per effettuare tali valutazioni, verranno considerate diverse combinazioni del carico di rete, ad esempio, verranno analizzati scenari in cui sarà massiccia la presenza di traffico *real time*, *video* o *voce*, oppure di traffico *non real time* o *best effort*.

6.1 I parametri delle simulazioni

L'esecuzione della simulazione da parte dell'applicazione "WiMaxSimulator", richiede la determinazione di alcuni "parametri", che sono essenziali per settare l'ambiente di rete, cioè stabilire il comportamento della *Base Station* e degli utenti che inviano le richieste di trasmissione in uplink. Questi parametri possono variare il loro valore ad ogni simulazione, poichè vengono generati in modo "random uniforme" dal modulo "TrafficGenerator" dell'applicazione (che li seleziona tra un valore minimo ed uno massimo) e per questo motivo, una stessa simulazione, intesa come creazione dello stesso numero e tipologia di servizi, dovrebbe essere ripetuta un "certo numero di volte" per avere un risultato at-

tendibile sul comportamento degli algoritmi di scheduling. Questo perchè, pur avendo la stessa proporzione di traffico per più simulazioni, si possono avere delle condizioni diverse nei parametri. Una tale assunzione, può essere fatta poiché ci si trova in un ambiente di rete mobile, in cui gli utenti si muovono nello spazio e nel tempo e pertanto, possono percepire le condizioni ambientali in modo diverso e cambiare i parametri della loro simulazione. Tali parametri sono:

- *"La velocità di trasmissione in uplink dei sottocanali"*: cioè, il loro *"data rate"*. Infatti, utenti diversi, distribuiti nell'ambiente, possono percepire le bande di frequenza in modo diverso e questo fatto può essere sfruttato come un vantaggio, assegnando loro soltanto i canali migliori. Il *"Generatore del Traffico"* implementato nell'applicazione, seleziona in modo casuale un valore compreso tra un *minimo* ed un *massimo*, fissati considerando le aspettative del *"WiMax Forum"* riguardo al *"Mobile WiMax"* [21] e cioè, un *data rate* fino a 15 Mbps, per un canale da 5 MHz.
- *"Lunghezza in msec del subframe in uplink"*: 10 msec.
- *"Numero di time slot che compongono il subframe in uplink"*: 500 *time slot*.
- *"Numero di sottocanali in uplink"*: 32 sottocanali [10].
- *"Numero di bits, deadline e terminazione dei servizi UGS"*: si sono considerati pacchetti del servizio VoIP (*Voice over IP*), che hanno la dimensione fissa di 528 bits, una deadline ogni 20 msec (1000 *time slot* = 2 *frame*) ed una terminazione del servizio che può oscillare da un minimo di 10 secondi (500000 *time slot* = 1000 *frame*) ad un massimo di 1 minuto (3 M *time slot* = 6000 *frame*) [5].
- *"Numero di bits, deadline e terminazione dei servizi rtPS"*: si sono considerati pacchetti di servizi *video*, con una quantità di bits per pacchetto che varia da un minimo di 100 bits ad un massimo di 10 Kb, una deadline che va da un minimo di 30 msec (1500 *time slot* = 3 *frame*), per i video ad alta qualità (DVD) che richiedono 30 immagini al secondo, ad un massimo di

100 msec (5000 *time slot* = 10 *frame*), per i video a bassa qualità (TV) che richiedono 10 immagini al secondo [29], ed una frequenza di terminazione che va da un minimo di 10 secondi (500 K *time slot* = 1000 *frame*) ad un massimo di 20 secondi (1 M *time slot* = 2000 *frame*).

- "Numero di bits, deadline e terminazione dei servizi nrtPS e BE": si considera una quantità di bits per richiesta che va da un minimo di 1 K (per le email, ad esempio) ad un massimo di 1 M (per il Web) ed una deadline che va da un minimo di 1 sec (50000 *time slot* = 100 *frame*) ad un massimo di 5 sec (250000 *time slot* = 500 *frame*).

6.2 Le metriche di valutazione

Per valutare la bontà del nuovo algoritmo vengono prese in considerazione due metriche: il "Numero medio di pacchetti persi", per i servizi UGS e rtPS, ed il "Ritardo medio di completamento della richiesta", per i servizi nrtPS e BE. Ogni schedulatore implementato nell'applicazione, produrrà dei valori per queste metriche, che saranno fortemente influenzate dalla politica di scheduling adottata. In particolare, in questa tesi, verranno messe a confronto, le metriche ottenute dal nuovo algoritmo di scheduling, con quelle ottenute dall'altro algoritmo, implementato basandosi sul lavoro svolto in [18].

Numero Medio di Pacchetti Persi: questa metrica viene utilizzata per valutare il comportamento della schedulazione dei pacchetti dei servizi di tipo *UGS*, come ad esempio, la voce, e dei servizi di tipo *rtPS*, come ad esempio, il video real time, la videotelefonata, la videoconferenza. Tale valore esprime la percentuale dei pacchetti persi sul totale dei pacchetti trasmessi sulla rete, dagli utenti alla BS:

$$\text{Numero Medio Pacchetti Persi} = \frac{\text{TotalePacchettiPersi}}{\text{TotalePacchettiTrasmessi}} * 100$$

Ritardo Medio di Completamento della Richiesta: questa metrica viene utilizzata per valutare il comportamento della schedulazione dei servizi di tipo *non real time*, come ad esempio, il trasferimento dei file, e dei servizi *Best Effort*, come ad esempio, il caricamento di pagine web. Tale valore

esprime il ritardo medio che devono sopportare i servizi a bassa priorità, per la loro schedulazione:

$$\mathbf{Ritardo\ Medio\ Completamento} = \frac{RitardoTotaleRichieste}{TotaleRichieste}$$

Nel paragrafo successivo verranno affrontate le simulazioni in diversi scenari di traffico, considerando varie combinazioni delle tipologie di servizio.

6.3 La simulazione degli algoritmi di scheduling

Gli scenari di traffico presi in considerazione nelle simulazioni, sono illustrati nelle Figure A.1, A.2, A.3 e A.4 in Appendice A. I valori sulle righe indicano il numero di servizi considerati, per tipologia e l'ultima colonna indica la percentuale di servizi di tipo *UGS* e *rtPS* sul numero totale. Infatti, a seconda della quantità di traffico *real time* presente, i due algoritmi si comporteranno in maniera diversa, come sarà illustrato dai risultati delle simulazioni. L'obiettivo che si vuole raggiungere eseguendo queste simulazioni, è quello di dimostrare che più si aumenta la percentuale del traffico *real time*, *UGS* e *rtPS*, e più si rallenta il tempo di completamento dei servizi *non real time*. In particolare, si vuole dimostrare che, il nuovo algoritmo assume un comportamento di schedulazione che, rispetto all'altro, cerca di limitare questo ritardo per i servizi *non real time*, peggiorando però inevitabilmente, le prestazioni per i servizi *real time*, che cominciano a "saltare" qualche deadline. Le simulazioni illustreranno quando queste "perdite di pacchetti" inizieranno ad essere "critiche" per l'integrità del servizio stesso. Inoltre, si noterà dai risultati che, in generale, quanto più si aumenta il numero di richieste di schedulazione da parte degli utenti, tanto più il sistema si troverà in difficoltà nel soddisfarle completamente, entro tempi accettabili per tutti.

6.4 Esecuzione delle simulazioni

Le simulazioni di ciascun algoritmo di scheduling, sono organizzate in quattro gruppi: il primo è composto da 40 richieste di servizio, il secondo da 80, il terzo da 120 ed il quarto da 160.

Per ogni algoritmo di scheduling e per ogni gruppo di simulazioni, sono state applicate le seguenti combinazioni di traffico:

- 0 % Richieste di tipo real time (UGS + rtPS) e 100 % Richieste di tipo non real time (nrtPS + BE);
- 25 % Richieste di tipo real time (UGS + rtPS) e 75 % Richieste di tipo non real time (nrtPS + BE);
- 50 % Richieste di tipo real time (UGS + rtPS) e 50 % Richieste di tipo non real time (nrtPS + BE);
- 75 % Richieste di tipo real time (UGS + rtPS) e 25 % Richieste di tipo non real time (nrtPS + BE);
- 100 % Richieste di tipo real time (UGS + rtPS) e 0 % Richieste di tipo non real time (nrtPS + BE).

6.4.1 Primo Gruppo di Simulazioni: 40 Richieste di Servizio

Il primo gruppo di simulazioni è stato eseguito su 40 richieste di servizio, distribuite nelle varie classi, secondo le proporzioni specificate in precedenza ed illustrate nella Figura A.1 dell'Appendice A.

Risultati ottenuti.

- *"Percentuale Pacchetti Real Time Persi"*:

I risultati delle simulazioni per i due algoritmi, riguardo a questa metrica, sono illustrati nella Figura A.5 in Appendice A. I valori contenuti nelle tabelle rappresentano la percentuale di pacchetti persi sul totale dei pacchetti trasmessi per ogni tipologia di servizio real time (UGS e rtPS) e sono stati ottenuti ripetendo la stessa simulazione per un certo numero di volte, per ogni algoritmo.

La Figura 6.1 mostra il comportamento dei due algoritmi riguardo alla metrica della *"Percentuale di Pacchetti Persi"*.

In particolare, dal grafico per l'algoritmo di scheduling EDF, si può dedurre che:

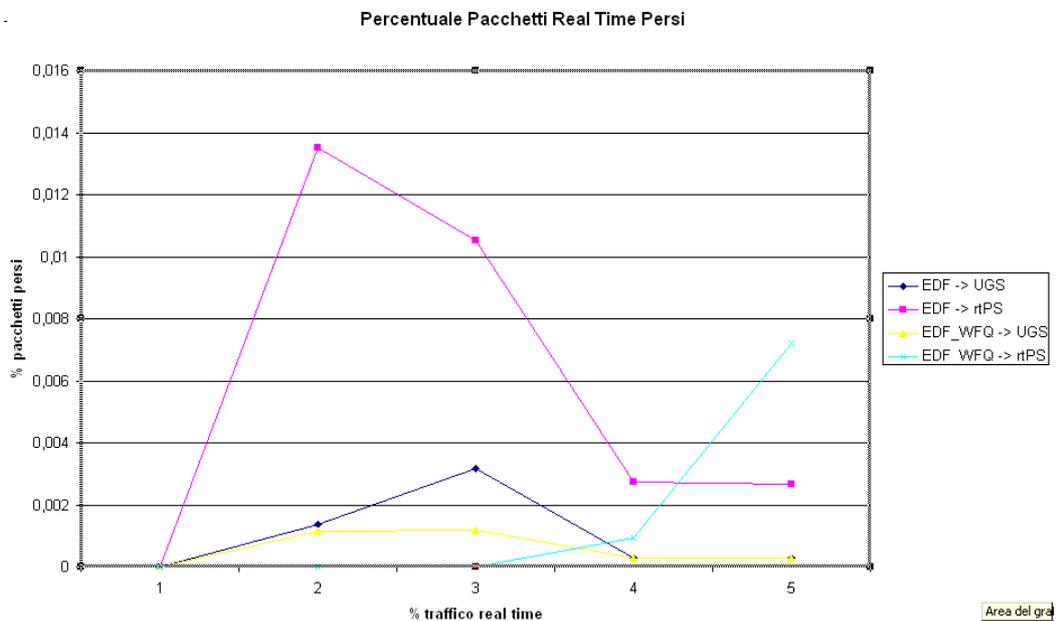


Figura 6.1: Percentuale pacchetti real time persi per gli scheduler EDF e EDF_WFQ per un Numero Totale Richieste = 40

- Nel caso in cui la percentuale dei servizi real time è inferiore (25%) rispetto a quella dei servizi non real time (75%), la schedulazione di grandi quantità di bit per questi ultimi, fa saltare qualche deadline ai primi, soprattutto quelli UGS, che hanno scadenza più frequente, provocando la perdita dei loro pacchetti ("picco" nel grafico).
- Man mano che la percentuale dei servizi real time aumenta, rispetto a quella dei servizi non real time, il sistema si "alleggerisce" dal dover allocare grandi quantità di bit, diminuendo anche il rischio di saltare le deadline dei servizi real time.
- Nel caso in cui la percentuale dei servizi real time comincia ad essere superiore (75%) rispetto a quella dei servizi non real time (25%), l'algoritmo, oltre che perdere meno pacchetti, perchè diminuisce la mole di bit dei servizi non real time da schedulare, tende a comportarsi in maniera più equa nella schedulazione delle due tipologie di servizio real time, *UGS* e *rtPS*.

Dal grafico per l'algoritmo EDF_WFQ, si può dedurre il suo comporta-

mento:

- Anche se la percentuale dei servizi real time è inferiore (25%) o al limite, uguale (50%) a quella dei servizi non real time, la presenza di grandi quantità di bit da schedulare per questi ultimi, non ha grandi effetti sui primi, in quanto, vista la loro maggiore priorità, vengono schedulati tutti sempre per primi. Quindi, i loro pacchetti non vengono persi.
- Man mano che la percentuale di servizi real time aumenta e quella dei servizi non real time diminuisce, diventa sempre più evidente il comportamento di scheduling dell’algoritmo, il quale tende a soddisfare sempre per prime, tutte le richieste che appartengono alla classe di servizio a maggiore priorità, cioè quella UGS, a discapito delle successive, in questo caso rtPS, che perdono pacchetti (“picco” nel grafico).

• ”Ritardo Medio Completamento Servizi Non Real Time”:

I risultati delle simulazioni per i due algoritmi, riguardo a questa metrica, sono illustrati nella Figura A.6 in Appendice A. I valori contenuti nelle tabelle rappresentano il ritardo medio di completamento della richiesta, per ogni tipologia di servizio non real time (nrtPS e BE) e sono stati ottenuti ripetendo la stessa simulazione per un certo numero di volte, per ogni algoritmo.

La Figura 6.2 mostra il comportamento dei due algoritmi riguardo alla metrica del *”Ritardo Medio di Completamento dei Servizi”*.

In particolare, per l’algoritmo di scheduling EDF, si può dedurre che:

- Man mano che cresce la percentuale dei servizi non real time, cresce anche, in modo pressoché uniforme, il ritardo di schedulazione per entrambe le tipologie di servizio, nrtPS e BE.

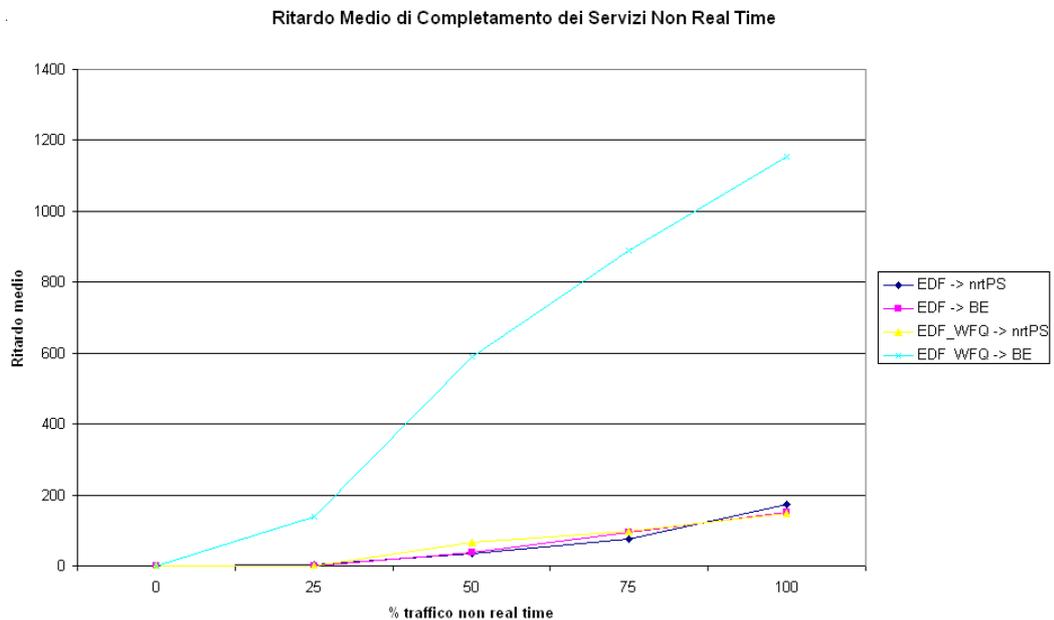


Figura 6.2: Ritardo medio dei servizi non real time per gli scheduler EDF e EDF_WFQ

Dal grafico per l’algoritmo EDF_WFQ, si può dedurre il suo comportamento:

- Man mano che cresce la percentuale dei servizi non real time, cresce anche il divario tra il ritardo medio che subiscono i servizi di tipo BE rispetto a quello che subiscono i servizi di tipo nrtPS. Dal grafico, è evidente come lo scheduler privilegi la classe nrtPS, con maggiore priorità, rispetto a quella BE, con minore priorità.

Conclusioni Primo Gruppo di Simulazioni: 40 Richieste.

Per questo primo gruppo di simulazioni, possiamo concludere che il nuovo algoritmo di scheduling riesce a distribuire la ”perdita dei pacchetti” in maniera piuttosto uniforme tra i servizi UGS e rtPS, ed il ”ritardo di completamento” tra i servizi nrtPS e BE. L’altro algoritmo invece, tende a privilegiare sempre la classe di servizio con maggiore priorità, quindi, sarà sempre la classe rtPS che perderà più pacchetti e sarà sempre la classe BE che avrà il ritardo più elevato. E’ vero che nel nuovo algoritmo si ha una maggiore perdita di pacchetti real

time, soprattutto in presenza di elevato traffico non real time (perchè la grande mole di bits "monopolizza" l'allocazione dei frame), però si ha un ritardo minore per allocare i servizi non real time. Inoltre, la cosa più importante che salta all'occhio osservando anche i grafici delle due metriche dei due algoritmi, è che il nuovo schedulatore si comporta in modo molto più "*equo*" nell'allocazione delle richieste, con tutte le tipologie di servizio, rispetto all'altro schedulatore.

6.4.2 Secondo Gruppo di simulazioni: 80 Richieste di Servizio

Il secondo gruppo di simulazioni è stato eseguito su 80 richieste di servizio, distribuite nelle varie classi, come nel caso precedente ed illustrate nella Figura A.2 in Appendice A.

Risultati ottenuti.

- "Percentuale Pacchetti Real Time Persi":

Anche in questo caso, i risultati delle simulazioni per i due algoritmi, riguardo a questa metrica, sono illustrati nella Figura A.7 in Appendice A.

La Figura 6.3 mostra il comportamento dei due algoritmi riguardo alla metrica della "*Percentuale di Pacchetti Persi*". Osservando il grafico, si può notare come la perdita dei pacchetti sia distribuita in maniera più equa nello scheduling EDF, rispetto a quello EDF_WFQ, il quale tende sempre a far divergere il "trattamento della perdita dei pacchetti", a vantaggio della classe a maggiore priorità, in questo caso, quella rtPS, che ha perdita praticamente nulla.

- "Ritardo Medio Completamento Servizi Non Real Time":

Anche in questo caso, i risultati delle simulazioni per i due algoritmi, riguardo a questa metrica, sono illustrati nella Figura A.8 in Appendice A.

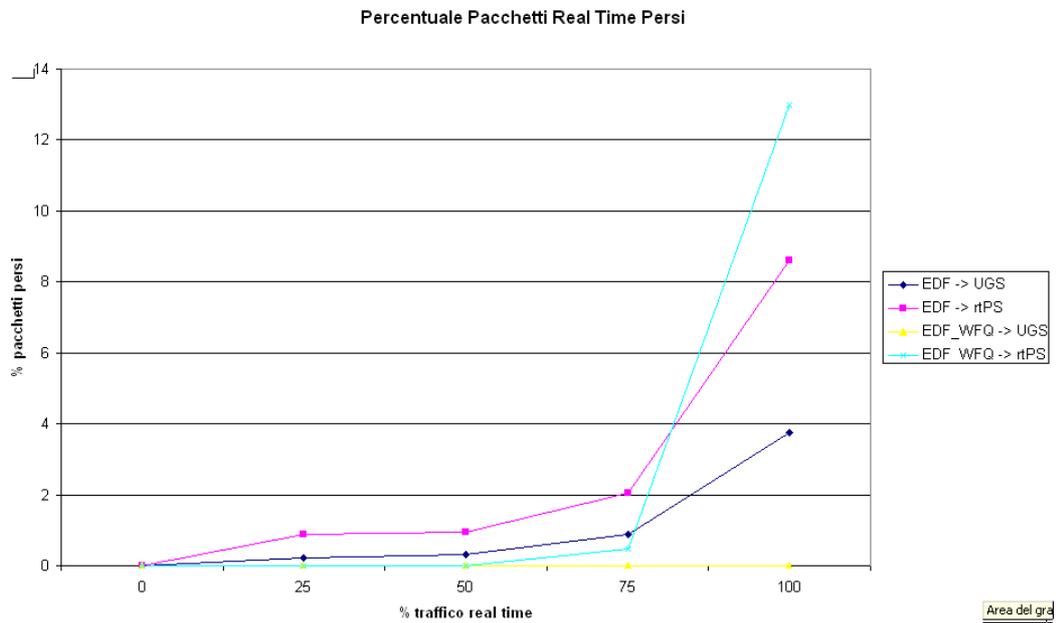


Figura 6.3: Percentuale pacchetti real time persi per gli scheduler EDF e EDF_WFQ per un Numero Totale Richieste = 80

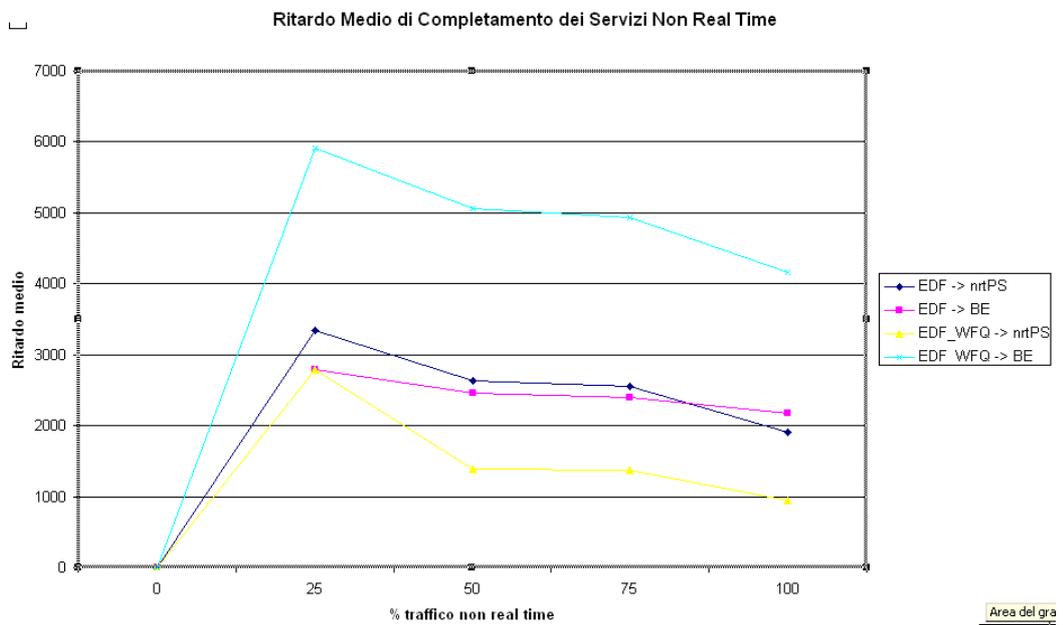


Figura 6.4: Ritardo medio dei servizi non real time per gli scheduler EDF e EDF_WFQ con Numero Totale Richieste = 80

La Figura 6.4 mostra il comportamento dei due algoritmi riguardo alla metrica del "*Ritardo Medio di Completamento dei Servizi Non Real Time*". Osservando il grafico, anche in questo caso lo scheduler EDF distribuisce il ritardo di completamento in modo equo tra le due classi di servizio, rispetto all'altro scheduler che tende a privilegiare la classe nrtPS.

Conclusioni Secondo Gruppo di Simulazioni: 80 Richieste.

Anche per questo secondo gruppo di simulazioni, si può concludere che il nuovo algoritmo di scheduling distribuisce in maniera più equa, sia la perdita dei pacchetti real time, che il ritardo medio di completamento dei servizi non real time.

6.4.3 Terzo Gruppo di simulazioni: 120 Richieste di Servizio

Il terzo gruppo di simulazioni è stato eseguito su 120 richieste di servizio, distribuite nelle varie classi, come nei casi precedenti ed illustrate nella Figura A.3 in Appendice A.

Risultati ottenuti.

- "*Percentuale Pacchetti Real Time Persi*":

Anche in questo caso, i risultati delle simulazioni per i due algoritmi, riguardo a questa metrica, sono illustrati nella Figura A.9 in Appendice A.

La Figura 6.5 mostra il comportamento dei due algoritmi riguardo alla metrica della "*Percentuale di Pacchetti Persi*". Osservando il grafico, si deducono, per i due algoritmi di scheduling, dei comportamenti analoghi a quelli riscontrati nei precedenti gruppi di simulazioni.

- "*Ritardo Medio Completamento Servizi Non Real Time*":

Anche in questo caso, i risultati delle simulazioni per i due algoritmi,

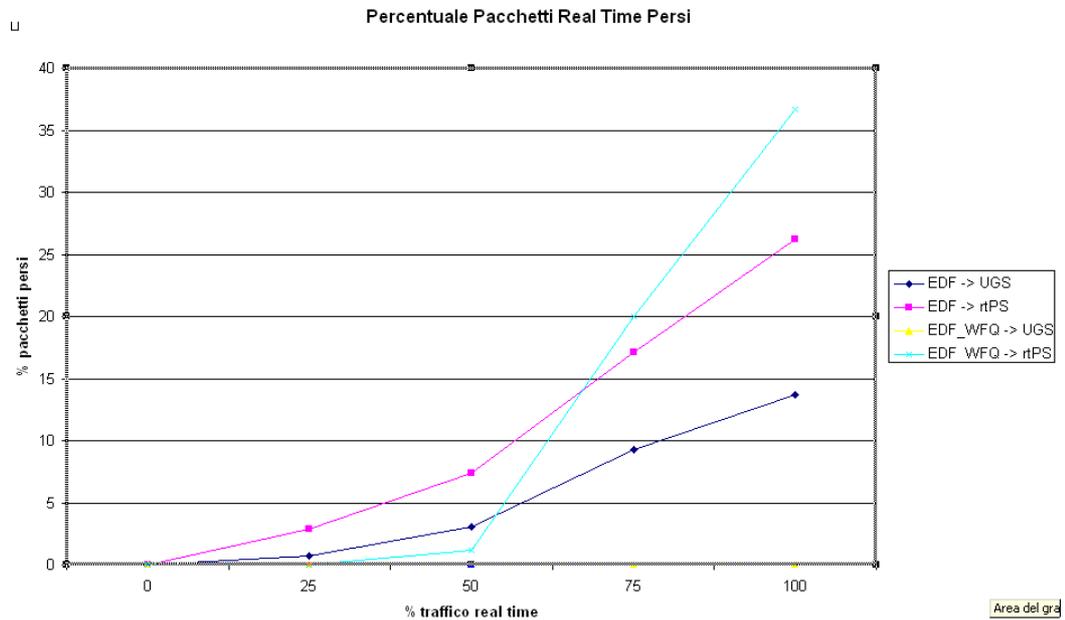


Figura 6.5: Percentuale pacchetti real time persi per gli scheduler EDF e EDF_WFQ per un Numero Totale Richieste = 120

riguardo a questa metrica, sono illustrati nella Figura A.10 in Appendice A.

La Figura 6.6 mostra il comportamento dei due algoritmi riguardo alla metrica del "Ritardo Medio di Completamento dei Servizi Non Real Time". Osservando il grafico, anche in questo caso, si deduce, per i due scheduler, un comportamento analogo a quello riscontrato nelle simulazioni precedenti.

Conclusioni Terzo Gruppo di Simulazioni: 120 Richieste.

Anche per questo terzo gruppo di simulazioni, si può concludere che il nuovo algoritmo di scheduling distribuisce in maniera più equa, sia la perdita dei pacchetti real time, che il ritardo medio di completamento dei servizi non real time.

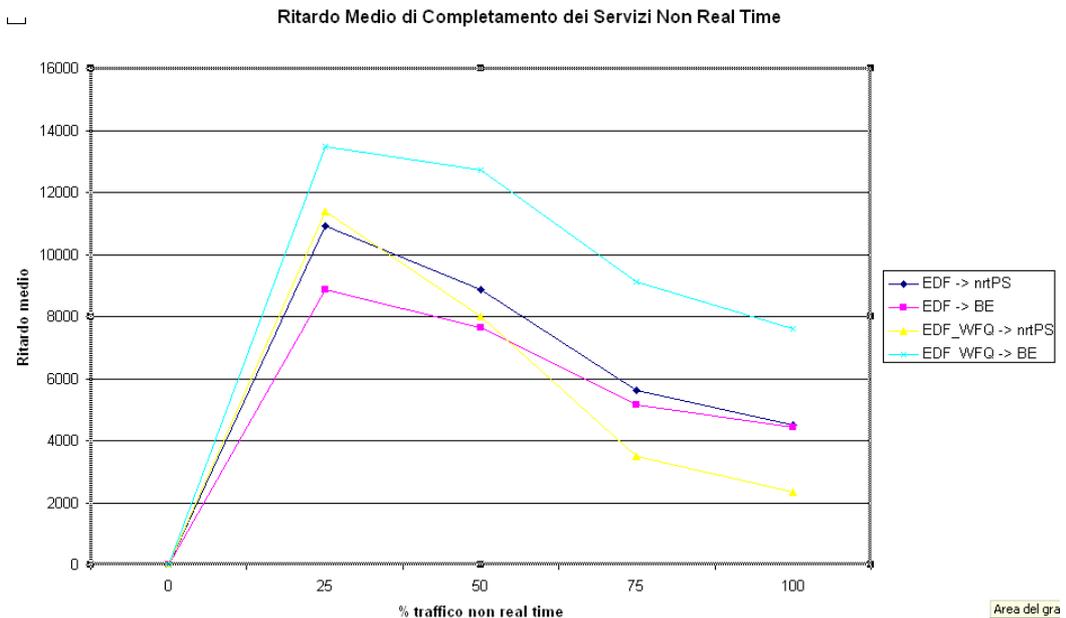


Figura 6.6: Ritardo medio dei servizi non real time per gli scheduler EDF e EDF_WFQ con Numero Totale Richieste = 120

6.4.4 Quarto Gruppo di simulazioni: 160 Richieste di Servizio

Il quarto gruppo di simulazioni è stato eseguito su 160 richieste di servizio, distribuite nelle varie classi, come nei casi precedenti ed illustrate nella Figura A.4 in Appendice A.

Risultati ottenuti.

- *"Percentuale Pacchetti Real Time Persi"*:

Anche in questo caso, i risultati delle simulazioni per i due algoritmi, riguardo a questa metrica, sono illustrati nella Figura A.11 in Appendice A.

La Figura 6.7 mostra il comportamento dei due algoritmi riguardo alla metrica della *"Percentuale di Pacchetti Persi"*. Osservando il grafico, si

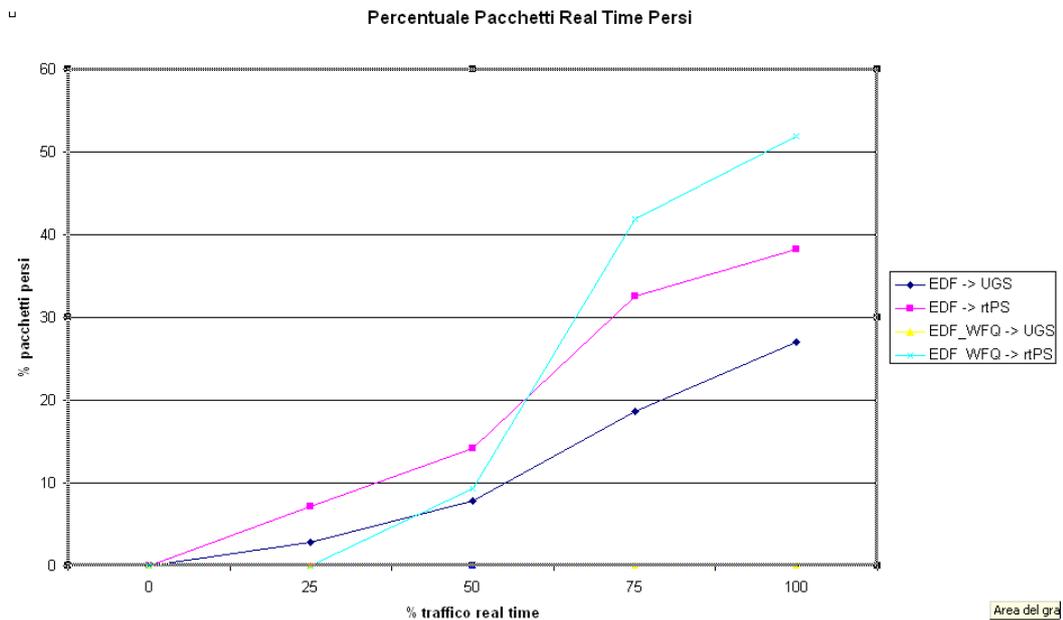


Figura 6.7: Percentuale pacchetti real time persi per gli scheduler EDF e EDF_WFQ per un Numero Totale Richieste = 160

deducono, per i due algoritmi di scheduling, dei comportamenti analoghi a quelli riscontrati nei precedenti gruppi di simulazioni.

- "Ritardo Medio Completamento Servizi Non Real Time":

Anche in questo caso, i risultati delle simulazioni per i due algoritmi, riguardo a questa metrica, sono illustrati nella Figura A.12 in Appendice A.

La Figura 6.8 mostra il comportamento dei due algoritmi riguardo alla metrica del "Ritardo Medio di Completamento dei Servizi Non Real Time". Osservando il grafico, anche in questo caso, si deduce, per i due scheduler, un comportamento analogo a quello riscontrato nelle simulazioni precedenti.

Conclusioni Quarto Gruppo di Simulazioni: 160 Richieste.

Anche per il quarto gruppo di simulazioni, si può concludere che il nuovo algoritmo di scheduling distribuisce in maniera più equa, sia la perdita dei pac-

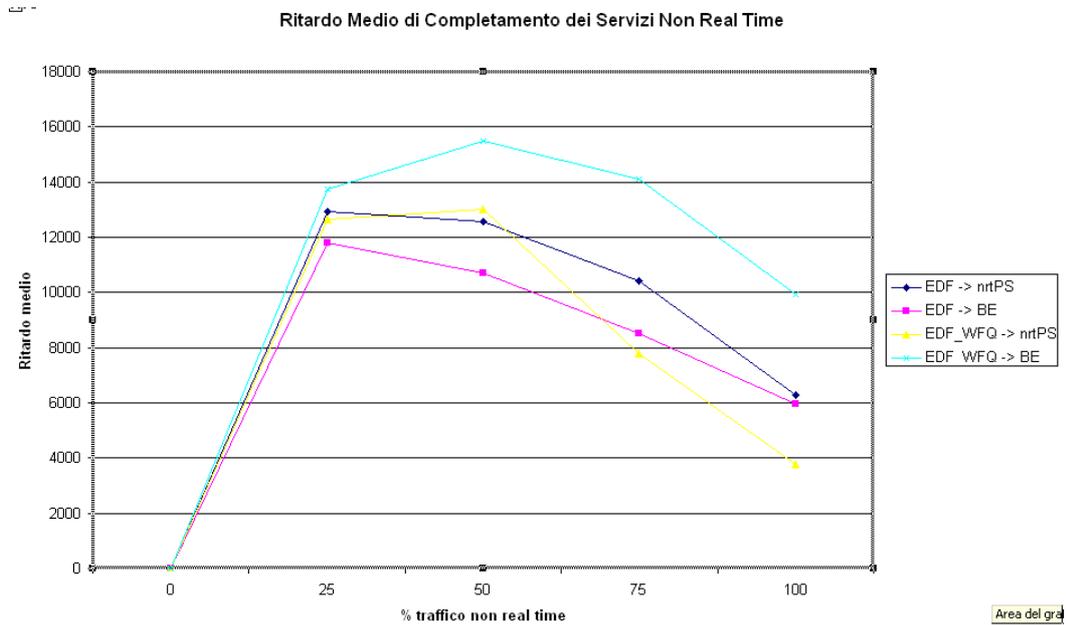


Figura 6.8: Ritardo medio dei servizi non real time per gli scheduler EDF e EDF_WFQ con Numero Totale Richieste = 160

chetti real time, che il ritardo medio di completamento dei servizi non real time.

Nel Capitolo 7 verranno tratte le conclusioni sull'intero lavoro svolto in questa tesi e verranno avanzate nuove proposte sugli eventuali sviluppi futuri di nuovi algoritmi di scheduling di pacchetti per reti WiMax, e dell'applicazione di simulazione "WiMaxSimulator".

Conclusioni

Uno dei maggiori punti di forza della tecnologia "WiMax", è rappresentato dal fatto che lo standard 802.16, prevede l'utilizzo di "Tecniche di Schedulazione del Traffico", implementate al livello del "Controllo di Accesso al Mezzo Fisico" (MAC) sulla Base Station, ma non prevede le modalità di implementazione per queste tecniche. Questo vuol dire, che ogni implementatore di dispositivi WiMax ed ogni fornitore di servizi, può decidere di implementarle come vuole, rispettando, più o meno, i principi di QoS (*Quality Of Service*) proposti dallo standard, basati sulla ripartizione dei servizi in classi di priorità. In base a questa ripartizione, lo *scheduler* può decidere di allocare prima tutte le richieste che appartengono alla classe con maggiore priorità e poi via, via quelle a priorità sempre minore, oppure può decidere di implementare nuove politiche di allocazione. In questa tesi ad esempio, si è deciso di implementare un "nuovo algoritmo di scheduling", che tenesse conto della "deadline" delle richieste, come parametro essenziale per la priorità di schedulazione. Pertanto, la richiesta a maggiore priorità, che verrà schedulata per prima, sarà quella che avrà la deadline più prossima alla scadenza. Inoltre, per confrontare questa nuova politica, basata sull'algoritmo EDF (*Earliest Deadline First*), si è deciso di implementare anche uno scheduler di confronto, che applicasse la politica descritta per prima. Su questa linea di idee, rivolta verso la possibilità di inventare, sperimentare e confrontare algoritmi di scheduling per reti WiMax sempre nuovi, si è deciso di implementare in questa tesi, anche una "piattaforma di simulazione generica" per testare questi algoritmi. Grazie all'utilizzo di questa applicazione, è stato possibile verificare la corretta formulazione ed implementazione del nuovo algoritmo di scheduling. In sostanza, è stato possibile verificare praticamente, che l'algoritmo facesse realmente quello che ci si aspettava dovesse fare, e cioè,

schedulare in maniera più "equa" le varie richieste di servizio, indipendentemente dalla loro classe di appartenenza, ma semplicemente in base al loro tempo massimo di attesa.

Il lavoro svolto in questa tesi non esaurisce (ovviamente) gli studi in questo settore. In particolare, sarebbe importante proseguire nelle simulazioni dell'algoritmo proposto, analizzando il suo comportamento in scenari diversificati di traffico, al fine di delinearne in maniera più puntuale le sue proprietà. Più in generale, è importante studiare nuove politiche di scheduling che migliorino l'equità nell'accesso alle risorse in WiMax, mantenendo buone prestazioni per le classi di traffico a maggiore priorità.

Appendice A

Dati delle Simulazioni

In quest'Appendice vengono riportati i dati utilizzati nelle simulazioni ed i risultati prodotti per ogni gruppo di simulazioni effettuate. In particolare, vengono rappresentate la composizione del traffico di rete considerato, cioè la tipologia e la quantità delle richieste di servizio da parte degli utenti ed i risultati ottenuti, in termini delle due metriche considerate, che sono la "*Percentuale di Pacchetti Real Time Persi*", per le classi UGS e rtPS, ed il "*Ritardo Medio di Completamento dei Servizi Non Real Time*", per le classi nrtPS e BE.

UGS	rtPS	nrtPS	BE	Totale Servizi	% Servizi Real Time
0	0	20	20	40	0
5	5	15	15	40	25
10	10	10	10	40	50
15	15	5	5	40	75
20	20	0	0	40	100

Figura A.1: Scenario del traffico per il **primo** gruppo di simulazioni con Numero Totale Richieste = 40

UGS	rtPS	nrtPS	BE	Totale Servizi	% Servizi Real Time
0	0	40	40	80	0
10	10	30	30	80	25
20	20	20	20	80	50
30	30	10	10	80	75
40	40	0	0	80	100

Figura A.2: Scenario del traffico per il **secondo** gruppo di simulazioni con Numero Totale Richieste = 80

UGS	rtPS	nrtPS	BE	Totale Servizi	% Servizi Real Time
0	0	60	60	120	0
15	15	45	45	120	25
30	30	30	30	120	50
45	45	45	45	120	75
60	60	0	0	120	100

Figura A.3: Scenario del traffico per il **terzo** gruppo di simulazioni con Numero Totale Richieste = 120

UGS	rtPS	nrtPS	BE	Totale Servizi	% Servizi Real Time
0	0	80	80	160	0
20	20	60	60	160	25
40	40	40	40	160	50
60	60	20	20	160	75
80	80	0	0	160	100

Figura A.4: Scenario del traffico per il **quarto** gruppo di simulazioni con Numero Totale Richieste = 160

UGS	rtPS	UGS	rtPS
0	0	0	0
0,003355705	0,03483912	0	0
0,001502945	0,014431645	0,000525571	0
0,000206415	0,001202501	0,000206415	0,002443173
0,000437867	0,000989511	0,000437867	0,005755955

Figura A.5: Percentuale di pacchetti real time persi per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 40

nrtPS	BE	nrtPS	BE
0	0	0	0
2,15879995	0	0,37899995	137,453595
35,9766	36,4863	65,1917995	588,716995
76,4771965	93,069928	96,8144605	890,752245
173,88245	151,7978	149,0357	1154,73264

Figura A.6: Ritardo medio di completamento dei servizi non real time per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 40

UGS	rtPS	UGS	rtPS
0	0	0	0
0,220121863	0,893915886	0,000673295	0
0,326490568	0,956268605	0,000319511	0,001835152
0,883089017	2,065033608	0,000299983	0,483455405
3,736738857	8,621783497	0,000284207	12,98965734

Figura A.7: Percentuale di pacchetti real time persi per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 80

UGS	rtPS	UGS	rtPS
0	0	0	0
3346,86645	2792,56824	2789,107995	5916,5459
2626,7209	2458,454455	1394,15434	5054,99805
2553,85348	2392,561285	1367,70515	4927,8372
1914,235095	2172,60957	948,49708	4161,7018

Figura A.8: Ritardo medio di completamento dei servizi non real time per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 80

UGS	rtPS	UGS	rtPS
0	0	0	0
0,76385753	2,851749585	0	0,001226994
3,089856181	7,3521132	0,000194925	1,195427664
9,292056745	17,1007388	0,000698691	19,96150745
13,7202019	26,184807	0,000584873	36,6808605

Figura A.9: Percentuale di pacchetti real time persi per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 120

UGS	rtPS	UGS	rtPS
0	0	0	0
10902,0123	8874,2864	11383,02125	13474,79555
8851,81155	7654,1312	8006,8156	12719,87565
5620,60775	5145,95565	3481,02795	9118,5775
4510,60585	4436,40575	2341,38665	7606,67375

Figura A.10: Ritardo medio di completamento dei servizi non real time per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 120

UGS	rtPS	UGS	rtPS
0	0	0	0
2,812751994	7,1822716	0,000143575	0,008203014
7,790933715	14,17659465	0,000854458	9,334480515
18,6874905	32,591692	0,000338777	41,84706
26,971567	38,307652	0,000359458	51,8974375

Figura A.11: Percentuale di pacchetti real time persi per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 160

UGS	rtPS	UGS	rtPS
0	0	0	0
12950,47015	11794,50115	12652,3704	13738,17235
12562,2664	10708,15835	13029,15345	15484,1654
10428,4758	8531,8043	7782,3962	14123,3687
6293,8268	5947,80105	3761,7973	9944,17525

Figura A.12: Ritardo medio di completamento dei servizi non real time per gli algoritmi EDF e EDFWFQ con Numero Totale Richieste = 160

Bibliografia

- [1] j. Andrews R. Chen A. Ghosh, D. Wolger. Broadband wireless access with wimax/802.16: Current performance benchmarks and future potential. *IEEE Communications Magazine*, February 2005.
- [2] ARCHchart. Wimax: The critical wireless standard. <http://whitepapers.zdnet.co.uk/0,39025945,60108901p-39000390q,00.htm>, January 2004.
- [3] G. Buttazzo. Sistemi real-time per il controllo automatico: Problemi e nuove soluzioni. Technical report, Università di Pavia, Unità di ricerca INFN - Pavia, May 2000.
- [4] Prepared by Westech Communication Inc. on behalf of the WiMAX Forum. Can wimax address your applications? <http://www.wimaxforum.org/news/downloads/>, October 2005.
- [5] E. Mingozi C. Cicconetti, L. Lenzini. Quality of service support in ieee 802.16 networks. *IEEE Network*, March/April 2006.
- [6] K. Stanwood S. Wang C. Eklund, R. Marks. Ieee standard 802.16: A technical overview of the wirelessman air interface for broadband wireless access. Technical report, National Institute of Standards and Technology, June 2002.
- [7] Michele Dario De Canio. Wimax: una svolta per diffusione della larga banda? <http://www.eccellere.com/Rubriche/Tecnologia/wimax.htm>, 2005.
- [8] Inc. Cisco System. How to implement wimax in a mobile network, 2005.

- [9] J.W. Layland C.L. Liu. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard real time environment. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 20 (1):44–61, January 1973.
- [10] Senza Fili Consulting. Fixed, nomadic, portable and mobile applications for 802.16-2004 and 802.16e wimax networks. Technical report, WiMAX Forum, November 2005.
- [11] M. Kim K. Han D. Cho, J. Song. Performance analysis of the ieee 802.16 wireless metropolitan area network. In *Proceedings of the First International Conference on Distributed Frameworks for Multimedia Applications*. Department of Computer Engineering, Kyungpook National University, Korea, 2005.
- [12] M.L. Dertouzos. Control robotics: the procedural control of physical processes. In *Information Processing 74*. North-Holland Publishing Company, 1974.
- [13] C. Leung H. Fattah. An overview of scheduling algorithms in wireless multimedia networks. Technical report, The University of British Columbia, October 2002.
- [14] C. Zhao Z. Zhou H. Lv, J. Nie. A simplified architecture of qos for the ieee 802.16 bwa system. Technical report, School of Telecommunications Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, 2005.
- [15] Intel. Ieee 802.16 medium access control and service provisioning. *Intel Technology Journal*, 08(03), August 2004.
- [16] G. Kandus J. Bostic. Mac scheduling for fixed broadband wireless access systems. Technical report, Jozef Stefan Institute, Slovenia, November 2001.
- [17] Q.Guo J. Chen, W. Jiao. An integrated qos control architecture for ieee 802.16 broadband wireless access system. Technical report, Lucent Technologies, Bell Labs Research China, August 2005.
- [18] A. Ganz K. Wongthavarawat. Packet scheduling for qos support in ieee 802.16 broadband wireless access systems. Technical report, Multime-

dia Networks Laboratory, Electrical and Computer Engineer Department, University of Massachusetts U.S.A, August 2002.

- [19] M.C. Clò M.Bonuccelli. Edd algorithm performance gauarantee for periodic hard-real-time scheduling in distributed systems. In *IPPS/SPDP 1999*. IEEE Computer Society, April 1999.
- [20] C. Pei B. Yang N. Liu, X. Li. Delay character of a novel architecture for ieee 802.16 systems. Technical report, State Key Laboratory of ISN, Xidian University, China, May 2005.
- [21] Many Organizations. Mobile wimax - part i: A technical overview and performance evaluation. Technical report, WiMAX Forum, February 2006.
- [22] R. Aravind P. Parag, S. Bhashyam. A subcarrier allocation algorithm for ofdma using buffer and channel state information. Technical report, Department of Electrical Engineering, Texas A and M University College, USA and Indian Institute of Technology Mandras, India, 2005.
- [23] The PhpWiki programming team. Scheduling algorithms. <http://www.mega-tokyo.com/osfaq2/index.php/Scheduling> October 2005.
- [24] Taylor Raynolds. The implications of wimax for competition and regulation. Technical report, OECD - Organisation de Coopération et de Développement Economiques, March 2006.
- [25] B. Ryu S. Shin. Packet loss fair scheduling scheme for real-time traffic in ofdma systems. *ETRI Journal*, 26(5), October 2004.
- [26] IEEE Computer Society. Part 16: Air interface for fixed broadband wireless access systems. <http://www.ieee802.org/16/pubs/80216-2004.html>, October 2004.
- [27] IEEE Computer Society. Part 16: Air interface for fixed broadband wireless access systems amendment 2: Physical and medium access control layers for combined fixed and mobile operation in licensed bands and corrigendum 1. <http://www.ieee802.org/16/pubs/80216e.html>, February 2006.

- [28] V. Sharma V. Singh. Efficient and fair scheduling of uplink and downlink in ieee 802.16 ofdma networks. Technical report, Department of Electrical Communication Engineering, Indian Institute of Science, India, 2002.
- [29] New Global Vision. Gli standard del video. <http://www.ngvision.org/howto/standard.html>.
- [30] Wikipedia. Wimax. <http://it.wikipedia.org/wiki/WiMAX>, May 2006.
- [31] J. Wolnicki. The ieee 802.16 wimax broadband wireless access; physical layer (phy), medium access control layer (mac), radio resource management (rrm). In *Seminar on Topics in Communications Engineering*. Munich University of Technology, 2005.
- [32] S. Woo D. Kim Y. Ki, E. Kim. Downlink packet scheduling with minimum throughput guarantee in tdd-ofdma cellular network. Technical report, Yonsei University, Dept, of Electrical and Electronic Engineering, Seoul, Korea, 2005.
- [33] S. Lee J. Lee C. Kang Y. Tcha, Y. Kim. Qos management for facilitation of uplink scheduling. Technical report, Korea University, August 2004.
- [34] D.K. Kim Y.M. Ki. Packet scheduling algorithms for throughput fairness and coverage enhancement in tdd-ofdma downlink network. *IEICE Trans. Commun.*, E88-B(10), November 2005.