

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
CAMPUS DI CESENA
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA E
TELECOMUNICAZIONI PER L'ENERGIA

Analisi e miglioramento di un sistema radio Tetra in
uso presso un'azienda di trasporto pubblico locale

Tesi in
Laboratorio di Reti di Telecomunicazioni LM

Relatore:
Prof. Walter Cerroni

Presentata da:
Mattia Bartoli

Correlatore:
Ing. Mirco Armandi

Anno Accademico 2016-2017

Indice

Introduzione.....	1
Capitolo 1: Il sistema TETRA	4
1.2 Lo standard TETRA.....	4
1.2.1 Enti di Standardizzazione	6
1.2.2 Differenze tra il Tetra e le altre tecnologie.....	9
1.2 Interfacce del sistema Tetra.....	13
1.2.1 TMO Air Interface.....	15
1.2.2 DMO Air Interface	34
1.2.3 Peripheral Equipment Interface.....	38
1.2.4 Inter-System Interface	42
1.2.5 Interfaccia telefonica	43
1.3 Servizi offerti dalla rete Tetra.....	44
1.3.1 Servizi vocali.....	45
1.3.2 Servizi Dati	53
1.3.3 Servizi supplementari	59
1.3.4 Numerazione, composizione ed indirizzamento	62
1.3.5 Sicurezza della rete Tetra.....	65
1.4 Componenti di una rete Tetra	68
1.4.1 Dispositivi radiomobili.....	69
1.4.2 Stazioni radiobase.....	70
1.4.3 Controllore centrale.....	73
1.4.4 Posti operatore.....	73
1.4.5 Infrastruttura di rete.....	73
1.4.6 Tetra-over-IP	74
1.4.7 Multicast Routing.....	76
1.5 Pianificazione in un sistema Tetra	77
1.6 TETRA Relase 2	81
Capitolo 2: La rete Tetra di TPER.....	83
2.1 La rete TETRA di Tper	83
2.1.1 Pianificazione della rete Tetra di TPER	85
2.1.2 Collegamento tra le stazioni radiobase e la centrale	90
2.1.3 Dispositivi Mobili.....	92
2.1.4 Numerazione dei dispositivi mobili.....	96
2.2 Motorola Dimetra IP	97
2.2.1 Dimetra IP Compact.....	98

2.2.2 Componenti della centrale di commutazione.....	101
2.2.3 Componenti della sala di controllo.....	107
2.2.4 Stazioni radiobase.....	111
2.2 Il sistema di telecontrollo di Tper	116
2.2.1 I server del telecontrollo	117
2.2.2 La sala di controllo	119
2.2.3 Interfaccia tra il sistema Tetra e il telecontrollo.....	121
2.2.4 I computer di bordo	121
2.3 Gestione delle comunicazioni tra la centrale e i mezzi	124
2.3.1 Gestione delle emergenze	126
Capitolo 3: Miglioramenti alla rete Tetra di Tper.....	128
3.1 Problemi di copertura nell'area urbana di Bologna	128
3.1.1 Sostituzione dell'antenna delle radio portatili	130
3.1.2 Nuove radio portatili.....	131
3.2.2 Utilizzo di radio come DMO Gateway.....	133
3.2 Miglioramento del collegamento con il sito di Tizzano.....	135
3.2.1 Collegamento di backup tramite rete cellulare 4G.....	137
3.2.2 Collegamento tramite ponte radio	140
3.3 Aggiornamento tecnologico del sistema	151
3.3.1 Dimetra Express	152
3.3.2 Dimetra X-Core.....	153
3.3.3 Migrazione dei collegamenti da E1 ad IP.....	153
Conclusioni.....	155
Bibliografia.....	157
Ringraziamenti.....	160

Introduzione

TPER (Trasporti Passeggeri Emilia Romagna) è una società per azioni con sede a Bologna che opera nell'ambito dei trasporti pubblici di persone sia su gomma che su rotaia il cui maggiore azionista è la Regione Emilia-Romagna. TPER nasce nel 2012 dalla fusione della ATC (Azienda Trasporti Consorziali) di Bologna e di FER (Ferrovie Emilia Romagna) e gestisce il servizio di trasporto pubblico su gomma sia urbano che extraurbano nelle province di Bologna e Ferrara oltre ad occuparsi, insieme a Trenitalia, dell'esercizio del servizio ferroviario regionale in Emilia-Romagna. TPER, il cui fatturato annuo ammonta a 236 milioni di euro, è la prima azienda di trasporto pubblico in regione e la sesta a livello nazionale per quanto riguarda i volumi di servizio. L'azienda impiega oltre 2.500 dipendenti e i suoi 1.150 autobus trasportano ogni giorno 340.000 persone per un totale di 50 milioni di chilometri ogni anno, mentre sui suoi 94 treni viaggiano ogni giorno 30.000 persone per un totale di 5 milioni di chilometri l'anno.

Dei 1.150 autobus della flotta di Tper circa 900 operano all'interno del bacino di trasporto pubblico bolognese mentre i rimanenti 250 nella provincia di Ferrara, di questi mezzi circa 550 sono urbani, 250 suburbani e 350 interurbani.

Tra tutte le zone su cui operano i mezzi di Tper quella che decisamente costituisce il bacino d'utenza più rilevante è la città di Bologna che è attraversata da 70 linee urbane e 15 suburbane esercitate da 650 autobus tra urbani e suburbani.

È facile immaginare come un'azienda di una simile dimensione necessiti di un sistema di telecomunicazioni radio efficiente ed affidabile grazie al quale poter gestire efficacemente le comunicazioni tra gli autobus che operano sulla propria rete e gli operatori addetti alla gestione e al controllo della regolarità dell'esercizio e sul quale basare il proprio sistema di gestione automatizzato della flotta. In particolare è possibile comprendere come in una situazione del genere non sia possibile semplicemente affidarsi ad un sistema pubblico come i normali servizi cellulari

offerti dagli operatori di telefonia, in quanto essi non garantiscono livelli sufficienti di affidabilità e sicurezza che possono essere ottenuti solo tramite la realizzazione di un'infrastruttura di telecomunicazioni proprietaria, scelta che permette inoltre di avere una completa libertà per quanto riguarda la gestione del servizio e la garanzia di non incorrere in episodi di congestione in quanto non vi sono altri utenti che possono accedere alla rete.

Per questa ragione già dal 2008 Tper si è dotata di una rete radio digitale privata realizzata grazie alla tecnologia Tetra che copre tutta l'area urbana di Bologna permettendo di effettuare in maniera efficace ed affidabile comunicazioni sia vocali che dati tra gli autobus operanti all'interno della rete urbana e suburbana e gli operatori, situati sia all'interno della centrale di controllo posta presso la sede aziendale che dislocati sul territorio, che si occupano della regolarità del servizio. Il sistema inoltre è progettato per interfacciarsi con il sistema automatizzato di gestione della flotta che è operativo presso l'azienda e che è stato realizzato internamente ad essa.

In questi dieci anni la rete Tetra di Tper si è rivelata essere un'infrastruttura tecnologicamente all'avanguardia in grado di garantire comunicazioni in maniera efficace e affidabile, ciononostante con il tempo sono emerse alcune criticità che in taluni casi possono compromettere l'affidabilità del sistema e che l'azienda è intenzionata a risolvere con investimenti nel prossimo futuro.

Inoltre, dopo dieci anni di servizio alcuni componenti del sistema, come è normale nell'ambito dell'elettronica e delle telecomunicazioni, iniziano a divenire obsoleti con la conseguenza che risulta difficile continuare a garantire per essi la reperibilità di ricambi e la possibilità di effettuare aggiornamenti software, quindi risulta ragionevole iniziare a valutare l'opportunità di effettuare degli aggiornamenti tecnologici al fine di continuare ad avere un sistema al passo con i tempi che possa continuare ad operare in maniera affidabile per gli anni a venire.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è quello di analizzare nel dettaglio la tecnologia Tetra e in particolare la rete operativa presso Tper al

fine di individuare eventuali criticità e proporre delle possibili soluzioni per risolverle e allo stesso tempo valutare l'opportunità di effettuare aggiornamenti tecnologici che permettano al sistema di rimanere al passo con i tempi e in tal modo garantire che possa continuare ad operare anche in futuro in maniera affidabile.

Questo scritto è strutturato in tre capitoli: nel primo viene analizzata in maniera teorica la tecnologia Tetra evidenziandone le caratteristiche e le funzionalità offerte, nel secondo si mostrano nel dettaglio le scelte tecnologiche adottate nella realizzazione della rete Tetra di Tper ed infine nel terzo si evidenziano le criticità rilevate, si propongono possibili soluzioni ad esse ed inoltre si valuta l'opportunità di effettuare sul sistema degli aggiornamenti tecnologici.

Capitolo 1: Il sistema TETRA

1.2 Lo standard TETRA

Il sistema TETRA (acronimo per Terrestrial Trunked Radio, originariamente Trans European Trunked Radio) è una tecnologia di comunicazione ad onde radio digitale progettata specificatamente per applicazioni nell'ambito di reti radio private professionali (PMR – Private Mobile Radio) [2]. Il Tetra nasce con lo scopo di enunciare un insieme di standard atti a definire le caratteristiche di un sistema radio che unisca i pregi delle moderne tecnologie radio cellulari con l'affidabilità e la versatilità delle vecchie tecnologie PMR analogiche.

La standardizzazione del Tetra è iniziata nel 1988 ad opera dell'ETSI (European Telecommunication Standard Institute) e si è concretizzata nel 1995 con l'emissione di numerosi documenti che ne definiscono in maniera dettagliata i vari aspetti funzionali e tecnologici e che costituiscono la Release 1, nota anche come Tetra V+D (Voice plus Data), a sottolineare la capacità del sistema di offrire sia servizi vocali che di trasmissione dati. Le prime reti funzionanti in tecnologia Tetra sono state installate nel 1997, da quel momento in poi lo sviluppo dello standard non si è mai fermato e nel 2005 è stata rilasciata la Release 2, nota come TEDS (Tetra Enhanced Data Service) a rimarcare il fatto che introduce numerosi miglioramenti principalmente per quanto riguarda i servizi di trasmissione dati. Il Tetra è uno standard aperto, il che significa che può essere liberamente adottato da vari produttori senza la necessità di pagare alcuna licenza.

Il sistema Tetra si rivolge ad un'utenza di tipo professionale, in particolare a tutte quelle organizzazioni che hanno la necessità di realizzare e mantenere una rete di comunicazioni radio privata affidabile e versatile; in particolare questa tecnologia in virtù delle sue caratteristiche trova largo impiego nell'ambito delle forze militari e di pubblica sicurezza e in quello dei servizi di emergenza, oltre che presso enti pubblici e in tutte quelle aziende che offrono servizi di pubblica utilità come trasporti pubblici e ferrovie. Sebbene

sia nato come standard europeo il Tetra è stato successivamente adottato anche in altre parti del mondo quali Asia, Medio Oriente e America Latina, non è utilizzato invece in America Settentrionale dove è stato sviluppato un altro standard denominato APCO-25, che è strettamente imparentato con il Tetra e ne condivide le caratteristiche salienti.

Il Tetra unisce le funzionalità tipiche dei sistemi radio PMR, come la possibilità di effettuare chiamate di gruppo e gestire le situazioni di emergenza, con quelle delle moderne reti radio cellulari, come ad esempio la possibilità di effettuare chiamate telefoniche, inviare messaggi di testo e di usufruire di servizi di trasmissione dati.

Le caratteristiche salienti del sistema Tetra sono:

- Trasmissione di voce e dati sulla stessa rete
- Possibilità di effettuare chiamate private tra gli utenti della rete
- Possibilità di effettuare chiamate di gruppo anche con gruppi definiti in maniera dinamica
- Efficace gestione delle chiamate di emergenza
- Possibilità di assegnare una priorità alle chiamate
- Possibilità di bloccare una chiamata in corso nel caso di una chiamata con maggiore priorità
- Possibilità di operare a canale aperto
- Capacità di operare in modo diretto (i terminali mobili possono parlare direttamente tra di loro quando sono fuori dalla zona di copertura delle stazioni base)
- Invio e ricezione di messaggi di testo e di stato
- Interfacciamento verso la rete telefonica (PABX, PSTN, ISDN)
- Interfacciamento con altre reti Tetra
- Interfacciamento verso reti dati esterne (LAN/WAN)
- Massima efficienza spettrale
- Tempo di instaurazione delle chiamate estremamente ridotto
- Semplicità di impiego dei terminali
- Topologia di rete flessibile e facilmente espandibile
- Interoperabilità cioè la possibilità per apparati mobili di vari produttori di comunicare sulla stessa rete

- Interfunzionalità cioè la capacità dei dispositivi mobili di operare su reti realizzate da costruttori diversi
- Gestione dinamica della banda per i servizi dati
- Sicurezza delle comunicazioni

Le principali caratteristiche tecniche dello standard sono:

- Funzionamento in banda UHF (in varie bande di frequenze dai 380 ai 900 MHz)
- Modulazione $\pi/4$ DQPSK
- Canalizzazione 25 KHz
- Accesso multiplo a divisione di tempo (TDMA)

1.2.1 Enti di Standardizzazione

L'organismo che si è occupato della standardizzazione del sistema Tetra è l'ETSI (European Telecommunications Standard Institute) che è l'ente, riconosciuto dall'Unione Europea, che si occupa dell'emanazione di standard per telecomunicazioni in Europa. L'ETSI è un'organizzazione senza scopo di lucro, è stata fondata nel 1988 ed ha sede in Francia, allo stato attuale conta più di 800 soci distribuiti in 65 paesi che comprendono pubbliche amministrazioni, università ed enti di ricerca, produttori di hardware e software e provider di servizi di telecomunicazioni.

La definizione dello standard Tetra ad opera dell'ETSI è iniziata nel 1988 (inizialmente il progetto era stato denominato MDTRS – Mobile Digital Trunked Radio System) e la Release 1 dello standard, denominata Tetra V+D (Voice plus Data) è avvenuta nel 1995, da quel momento lo sviluppo della tecnologia non si è mai fermata e nel 2005 è stata annunciata la Release 2 denominata TEDS (Tetra Enhanced Data Service).

All'interno dell'ETSI esistono vari gruppi denominati Technical Committee (TC) ciascuno dei quali si occupa specificatamente di una particolare tecnologia. Il comitato che lavora sullo standard Tetra è denominato Tetra and Critical Communication Evolution (TCCE), e si occupa specificatamente dei sistemi di comunicazione radio atti ad un utilizzo in ambito professionale. Il TCCE a sua volta si divide in

vari Work Groups ciascuno dei quali si occupa specificatamente di un particolare aspetto della tecnologia.

L'ETSI tramite i suoi comitati produce vari tipi di documenti ciascuno con delle particolari caratteristiche:

- European Standard (EN): è un documento volto a definire degli standard europei atti ad essere recepiti dalle normative comunitarie e nazionali degli stati membri dell'Unione Europea. Come tale viene redatto sotto mandato della Commissione Europea ed è soggetto ad approvazione da parte del CEN (Comitè Européen de Normalisation), l'ente di standardizzazione dell'Unione Europea.
- ETSI Standard (ES): è un documento contenente specifiche riguardanti una particolare tecnologia e deve essere approvato dall'intero consiglio di amministrazione dell'ETSI.
- ETSI Technical Specification (TS): è un documento che contiene requisiti prettamente tecnici. Non è necessario che venga approvato da tutto il consiglio dell'ETSI ma viene firmato direttamente dal comitato tecnico che lo ha redatto.
- ETSI Technical Report (TR): è un documento che contiene materiale divulgativo atto a spiegare le caratteristiche e le funzionalità di un determinato standard. Viene approvato direttamente dal comitato tecnico che lo redige.

Allo stato attuale sono più di 100 i documenti che l'ETSI ha rilasciato a riguardo del sistema Tetra, tra questi quelli di maggiore rilevanza sono:

- EN 300 392-1 – General Design: riguarda le caratteristiche generali di una rete Tetra.
- EN 300 392-2 – Air Interface (AI): riguarda gli aspetti radio.
- EN 300 392-3 – Inter System Interface (ISI): definisce l'interfaccia tra più reti Tetra.
- EN 300 392-4 – Gateways: definisce l'interfaccia verso reti esterne.
- EN 300 292-5 – Peripheral Equipment Interface (PEI): definisce l'interfaccia tra un dispositivo mobile Tetra e un terminale esterno.

- EN 300-292-7 – Security: definisce gli aspetti relativi alla sicurezza.
- TS 100 392-15 – Frequency Band, duplex spacing and channel numbering: definisce le specifiche frequenziali.
- EN 300 395 – Speech Coded: definisce la codifica da utilizzare per le chiamate vocali.
- EN 300 396 – Direct Mode (DMO): regola le comunicazioni dirette tra terminali mobili.
- TR 102 300-5 – Numbering and Addressing: definisce l'indirizzamento all'interno della rete Tetra.
- TR 101 021 – Tetra Release 2: definisce le nuove caratteristiche introdotte con la Release 2.

L'altra organizzazione che lavora per lo sviluppo e la standardizzazione della tecnologia Tetra è la Tetra and Critical Communication Association (TCCA). La TCCA è una società privata con sede nel Regno Unito che è stata costituita da enti e società private che sono interessate allo sviluppo della tecnologia Tetra a vario titolo, come produttori di apparati o di software, gestori di reti di telecomunicazioni, installatori, utilizzatori o pubbliche amministrazioni. L'associazione nasce nel 1994 originariamente con il nome di Tetra MoU (Memorandum of Understanding), ha poi cambiato nome in quello attuale con l'intento di comprendere non solo il Tetra ma anche altre tecnologie affini nell'ambito dei sistemi radio professionali. Lo scopo della TCCA è quello di recepire le esigenze del mercato e implementare soluzioni tecnologiche che possano realizzarle al meglio. La TCCA opera in collaborazione con l'ETSI per la definizione degli standard e anche con altre organizzazioni come la 3GPP (3rd Generation Partnership Project) e la GSMA (Global System Mobile Alliance).

L'organizzazione della TCCA prevede un consiglio di amministrazione (Executive Board) che ne dirige le operazioni e numerosi gruppi di lavoro che si occupano dei vari aspetti della tecnologia.

Uno dei compiti principali della TCCA è quello di rilasciare i certificati di interoperabilità che garantiscono, a seguito di un

processo di certificazione, che i dispositivi dei vari produttori rispondano alle disposizioni dello standard e quindi siano in grado di funzionare correttamente in sistemi comprendenti apparati realizzati da vari costruttori.

1.2.2 Differenze tra il Tetra e le altre tecnologie

Lo standard Tetra si rivolge a tutte quelle organizzazioni che hanno la necessità di realizzare una rete di comunicazione radio privata. La scelta di realizzare una rete di comunicazione radio privata invece di affidarsi ai normali servizi di comunicazione radio cellulari è sicuramente una soluzione più costosa ma comporta numerosi vantaggi. Innanzitutto, avere una rete di proprietà permette di avere il controllo totale sul sistema di comunicazione, di non dover quindi sottostare alle politiche di un gestore di telecomunicazioni esterno e di poter gestire la propria rete in modo tale da soddisfare al meglio le proprie necessità. Inoltre, non dovendo condividere l'infrastruttura con altre utenze si ha il vantaggio di avere l'uso esclusivo di tutte le risorse del sistema il che evita di incorrere, purché lo stesso sia correttamente dimensionato, in problemi di congestione e quindi di avere la certezza di poter comunicare anche in quelle situazioni in cui le reti pubbliche potrebbero essere non disponibili a causa di problemi di saturazione. Un altro aspetto determinante è quello della sicurezza, particolarmente rilevante per le applicazioni nell'ambito delle forze militari e di pubblica sicurezza, infatti una rete privata su cui circola solo il proprio traffico non solo è intrinsecamente più sicura di una rete pubblica su cui viaggiano le comunicazioni di molti utenti ma il fatto di essere i diretti gestori dell'infrastruttura permette di adottare le politiche che si ritengono più adatte alle proprie esigenze in fatto di sicurezza.

Il Tetra per come è stato definito unisce i vantaggi dei sistemi radio PMR analogici tradizionali a quelli delle moderne reti cellulari digitali. Caratteristiche tipiche delle radio PMR sono ad esempio la possibilità di effettuare chiamate di gruppo e di operare a canale aperto mentre funzionalità peculiari delle reti cellulari invece sono la

capacità di effettuare chiamate verso la rete telefonica e la possibilità di veicolare sulla stessa rete sia voce che dati.

Una delle caratteristiche salienti del sistema Tetra che lo contraddistingue dai sistemi PMR analogici e che ne costituisce uno dei principali punti di forza è quello di essere un sistema digitale [4].

L'impiego di segnali digitali offre numerosi vantaggi:

- Migliore copertura radio: i segnali digitali sono più robusti di quelli analogici nei confronti di rumore ed interferenze quindi a parità di potenza dei trasmettitori è possibile garantire un maggior raggio di copertura.
- Possibilità di utilizzare tecniche di rilevazione e correzione degli errori al fine di migliorare la qualità della trasmissione.
- Possibilità di ridurre l'impiego di banda utilizzando tecniche di compressione dei dati.
- Maggiore sicurezza in quanto risulta semplice applicare ai segnali digitali tecniche di crittografia per la protezione dei dati.
- Possibilità di veicolare voce e dati sulla stessa rete.
- Riduzione dei costi grazie alla possibilità di utilizzare tecnologie già consolidate nell'ambito della trasmissione dati e al fatto che dati e voce non necessitano di infrastrutture differenti.
- Buona qualità dell'audio nelle comunicazioni vocali anche in condizioni di basso segnale.

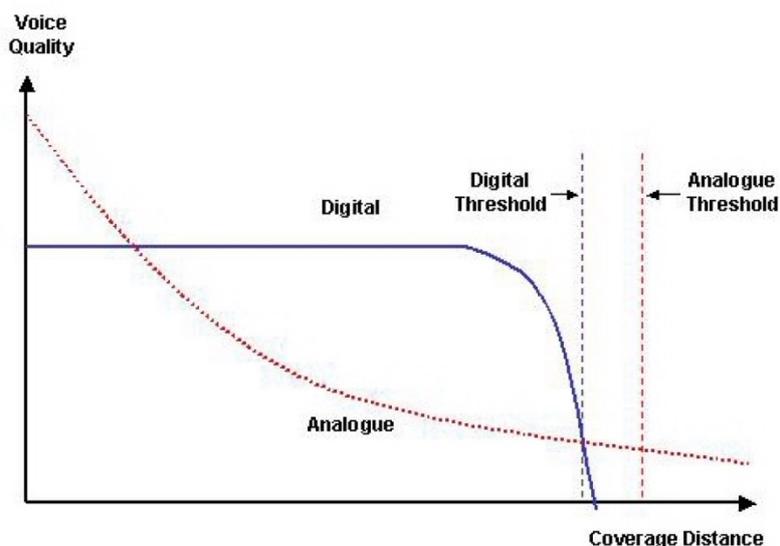


Figura 1: confronto tra sistemi radio analogici e digitali [4]

Un'altra peculiarità del Tetra è quello di essere un sistema radio di tipo trunked. Il concetto di trunking si riferisce ad una modalità particolarmente efficiente di gestione delle risorse radio nella quale i canali radio invece di essere assegnati in maniera fissa ai terminali, cosa che risulta decisamente poco efficiente se si pensa al fatto che essi non trasmettono in maniera continua nel tempo ma solo quando hanno necessità di scambiarsi informazioni, vengono allocati in maniera dinamica ai vari dispositivi solo quando questi necessitano effettivamente di comunicare, il che permette di risparmiare risorse che altrimenti rimarrebbero occupate inutilmente. L'assegnazione dei canali ai vari terminali avviene in maniera automatica: i terminali che necessitano di comunicare inviano le richieste su un canale di controllo, sulla base delle quali la rete assegna loro dei canali di traffico, i quali rimangono allocati solo per il tempo strettamente necessario per la trasmissione e ritornano disponibili per una nuova assegnazione non appena essa termina.

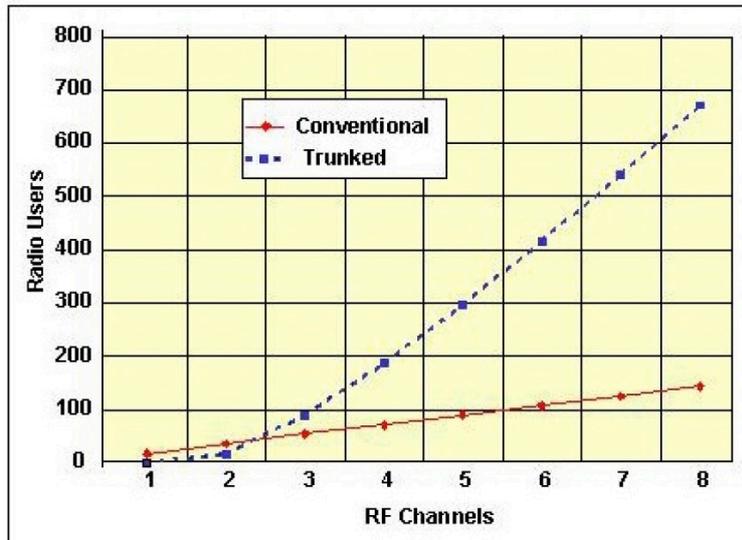


Figura 2: confronto tra sistemi radio trunked e tradizionali [4]

Un altro punto di forza del Tetra è l'alta efficienza spettrale, il che significa che a parità di banda occupata è possibile inviare una quantità maggiore di dati. Questo è reso possibile grazie all'utilizzo di una tecnica di accesso multiplo alle risorse radio a divisione di tempo (TDMA – Time Division Multiple Access). L'utilizzo della tecnica TDMA comporta un ulteriore vantaggio che è quello di avere trasmettitori più semplici rispetto ai sistemi FDMA, in quanto in questi ultimi è necessario avere un trasmettitore fisicamente distinto per ogni frequenza utilizzata, mentre nel TDMA venendo utilizzata una sola frequenza basta un singolo trasmettitore.

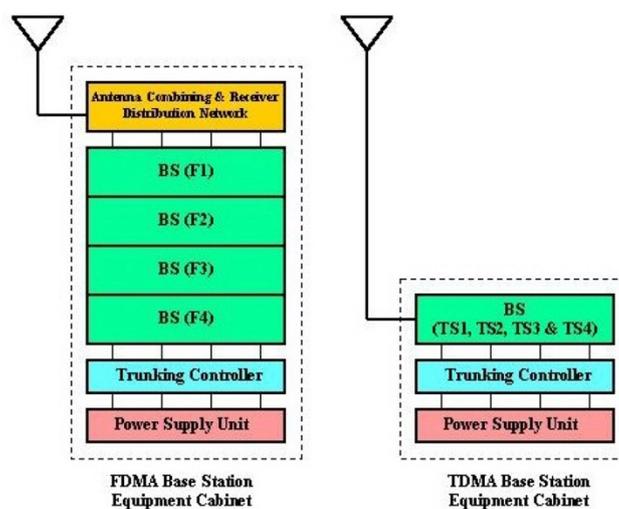


Figura 3: confronto tra un trasmettitore FDMA e uno TDMA [4]

La caratteristica che più di ogni altra distingue il Tetra sia dai sistemi PMR classici che dai normali sistemi cellulari pubblici è la possibilità di effettuare comunicazioni in maniera diretta tra i terminali il che rende possibile comunicare anche quando l'infrastruttura di rete non è disponibile perché le radio si trovano fuori dal raggio di copertura delle stazioni base oppure ci sono stati dei guasti alla rete.

Un'altra interessante funzionalità è la possibilità di definire all'interno della rete Tetra varie reti private grazie alla tecnologia VPN, in questa maniera è possibile con un'unica infrastruttura di rete servire contemporaneamente più organizzazioni in maniera tale che il traffico di ciascuna di esse sia completamente indipendente da quello delle altre, senza la necessità di avere tanti reti fisiche distinte.

1.2 Interfacce del sistema Tetra

Gli elementi che costituiscono una rete Tetra sono i dispositivi mobili che possono essere radio portati o veicolari, le stazioni radio-base (BTS – Base Transceiver Station) che sono quelle infrastrutture fisse dotate di antenne atte a fornire la copertura radio ad una determinata area, l'infrastruttura di rete, che comprende i collegamenti tra i vari siti fissi e i nodi di commutazione, e i siti di controllo della rete [9]. L'insieme di tutte le infrastrutture fisse, cioè stazioni radio-base, collegamenti di rete, nodi di commutazione e siti di controllo, viene denominato SwMI (Switching and Management Interface). Non esistono delle regole comuni che determinino come sia realizzata al suo interno la SwMI, il che lascia ai vari costruttori la massima libertà di progetto.

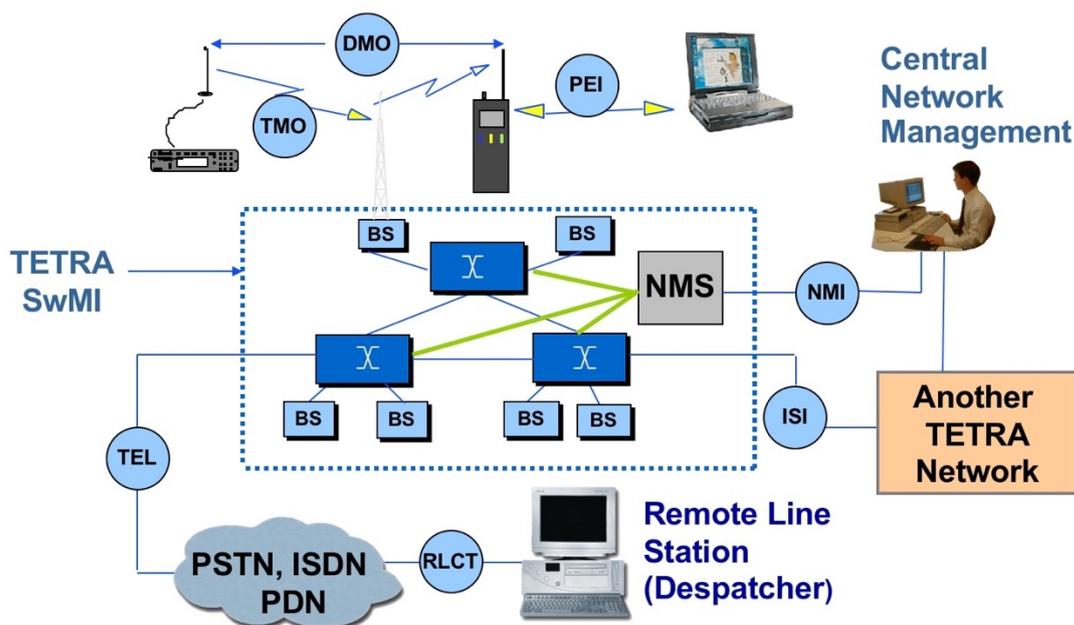


Figura 4: interfacce di un sistema Tetra [13]

Lo standard Tetra prevede numerose interfacce di collegamento tra gli elementi della rete Tetra ed il mondo esterno, alcune delle quali standardizzate, che permettono di interfacciare il sistema con altri sistemi di comunicazione sia dati che voce [13]. Le interfacce previste dallo standard sono:

- Interfaccia aerea TMO (Trunked Mode Operation): è il collegamento radio tra le stazioni radiobase e i dispositivi mobili siano essi portatili o veicolari, rappresenta il punto di contatto tra dispositivi mobili e infrastruttura di rete fissa.
- Interfaccia aerea DMO (Direct Mode Operation): è il collegamento radio tra due dispositivi mobili che operano in maniera diretta senza il coinvolgimento dell'infrastruttura fissa.
- Man Machine Interface (MMI): rappresenta l'interfaccia tra un terminale mobile e l'utente della rete Tetra.
- Peripheral Equipment Interface (PEI): è un'interfaccia standard che permette la connessione tra un terminale mobile Tetra e componenti esterni quali ad esempio computer o dispositivi similari.

- Inter-System Interface (ISI): rappresenta l'interfaccia di collegamento tra due diverse reti Tetra, questo è possibile solo se sono stati soddisfatti tutti i requisiti di interoperabilità.
- Interfaccia PSTN/ISDN/PABX: è una interfaccia standard che permette il collegamento della rete Tetra con una rete telefonica esterna pubblica (PSTN o ISDN) o privata (PABX).
- Network Management Interface (NMI): è una interfaccia non standardizzata che permette la gestione da remoto dei vari elementi della rete Tetra.
- Remote Line Connected Terminal (RLCT): interfaccia che doveva permettere il collegamento di un terminale esterno tramite linea ISDN, ma dato lo scarso interesse non è mai stata definita.

1.2.1 TMO Air Interface

L'interfaccia Aria TMO (Trunked Mode Operation) rappresenta il collegamento radio tra i terminali mobili Tetra, siano essi portatili o veicoli, e l'infrastruttura di rete fissa. L'Interfaccia Aria TMO è un'interfaccia standardizzata e deve rispettare le indicazioni presenti nello standard ETSI EN 300 392-2 [46].

1.2.1.1 Trunking

Il Tetra è un sistema di comunicazione di tipo trunked, il che significa che i canali di comunicazione non vengono assegnati in maniera esclusiva ai vari terminali, il che comporterebbe uno spreco di risorse in quanto è poco probabile che essi abbiano bisogno di trasmettere in maniera continuata nel tempo, ma sono attribuiti ai vari terminali in maniera dinamica solo per il tempo in cui essi necessitano effettivamente di trasmettere il che comporta un notevole risparmio di risorse specie quando queste sono limitate come nel caso delle comunicazioni radio.

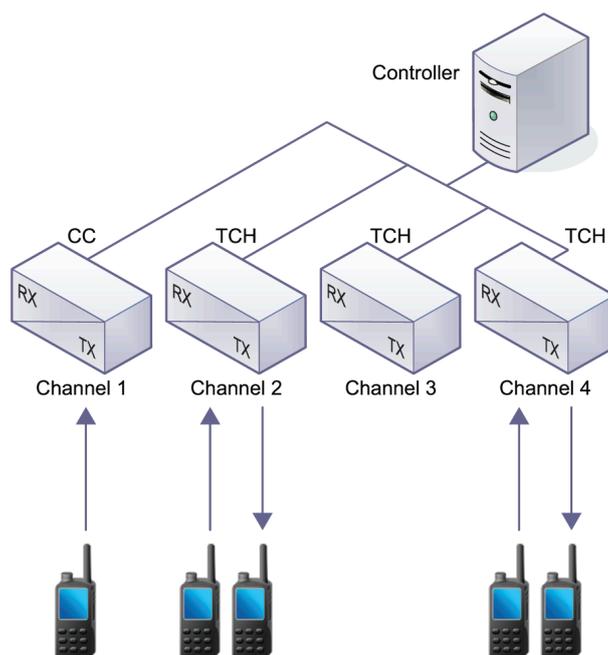


Figura 5: funzionamento di un sistema radio trunked [34]

Il Trunking all'interno della rete Tetra può avvenire in diverse modalità a seconda del criterio con il quale vengono assegnati e rilasciati i canali di comunicazione [45]:

- **Message Trunking:** in questa modalità il canale rimane allocato per tutta la durata della chiamata e non viene rilasciato finché essa non viene chiusa esplicitamente. Lo svantaggio di questa modalità è dato dal fatto che il canale rimane allocato alla chiamata anche quando nessuno dei partecipanti sta effettivamente trasmettendo comportando di fatto uno spreco di risorse. Per contro il vantaggio principale risiede nel fatto che quando uno dei terminali vuole trasmettere essendoci un canale già assegnato alla chiamata l'instaurazione della chiamata è immediata.
- **Transmission Trunking:** in questa modalità il canale rimane assegnato solo per il tempo in cui i terminali stanno effettivamente trasmettendo e viene rilasciato non appena essi cessano di trasmettere. Il vantaggio di questa modalità è dato dal fatto che il canale rimane assegnato ai terminali solo per il tempo effettivamente necessario alla trasmissione quindi si ha la massima efficienza nell'impiego delle risorse radio. L'aspetto negativo è dato invece dal fatto che quando i

terminali necessitano di trasmettere nuovamente è necessario ripetere l'assegnazione del canale il che potrebbe introdurre un certo ritardo.

- Quasi-Transmission Trunking: costituisce un compromesso tra le due modalità precedentemente illustrate, in tale modalità il canale viene assegnato solo quando uno dei terminali necessita effettivamente di trasmettere, non viene però rilasciato immediatamente non appena la trasmissione cessa ma solo dopo un dato intervallo di tempo denominato "hang-time". Questa modalità permette di raggiungere un buon compromesso tra efficienza e tempo di instaurazione della comunicazione.

1.2.1.2 Comunicazioni Full/Half-Duplex

Un canale di comunicazione tra due dispositivi viene detto Simplex quando le informazioni possono viaggiare solo in un dato verso, ad esempio una trasmissione televisiva è definibile simplex in quanto i televisori ricevono informazioni dai ripetitori ma non possono a loro volta rispondere. Un canale viene invece detto Duplex quando permette comunicazioni bidirezionali quindi le informazioni possono fluire in entrambe le direzioni, come avviene ad esempio in una chiamata telefonica in cui è possibile sia parlare che ascoltare cosa dice l'interlocutore. A sua volta i canali Duplex si possono dividere in canali Half-Duplex che sono in grado di trasportare informazioni in entrambi i versi ma non in contemporanea, in modo tale che i due terminali in un dato istante possono o solamente ricevere o solamente trasmettere, e canali Full-Duplex che sono in grado di trasportare contemporaneamente informazioni in entrambe le direzioni, in modo tale che entrambi i terminali possono allo stesso tempo sia trasmettere che ricevere. L'Interfaccia Aria Tetra TMO permette di effettuare comunicazioni bidirezionali tra i terminali sia in modalità Half-Duplex che Full-Duplex, nel primo caso è sufficiente assegnare un unico canale radio alla volta a ciascuna comunicazione, mentre nel secondo occorrono due canali fisici separati, uno per l'uplink e uno per il downlink. In particolare, le chiamate private tra due dispositivi possono essere effettuate sia in modalità half-duplex che full-duplex

mentre le chiamate di gruppo avvengono sempre in modalità half-duplex, questo perché nel caso ipotetico in cui fosse possibile effettuarle in modalità full-duplex occorrerebbe un canale per ogni terminale il che diventerebbe esageratamente esoso in termini di risorse radio. Nel caso delle chiamate half-duplex chi intende trasmettere deve segnalare l'intenzione di occupare il canale tramite un apposito pulsante PTT (Push-to-Talk), questo non è invece necessario nelle chiamate full-duplex.

1.2.1.3 Stack protocollare Tetra TMO

Lo standard che viene adottato per definire le varie funzionalità di un sistema di telecomunicazioni è costituito dal modello ISO-OSI (International Standard Organization – Open Systems Interconnection) il quale definisce sette livelli logici, i cosiddetti layers, ognuno dei quali rappresenta un aspetto della comunicazione tra due nodi della rete. I sette livelli sono:

- 1- Fisico (Physical Layer): descrive le caratteristiche dei segnali e i dettagli fisici del mezzo e degli eventuali connettori.
- 2- Collegamento (Data Link Layer): si occupa innanzitutto di organizzare i dati da inviare sul mezzo fisico in frame, inoltre si occupa della rilevazione e correzione degli errori, del controllo di flusso e di gestire le modalità di accesso multiplo al canale.
- 3- Rete (Network Layer): si occupa dell'instradamento dei dati all'interno della rete.
- 4- Trasporto (Transport Layer): si occupa di garantire un collegamento trasparente e affidabile tra due host, garantisce il corretto funzionamento del collegamento ed effettua il controllo della congestione.
- 5- Sessione (Session Layer): controlla la comunicazione tra le applicazioni, si occupa quindi di instaurare, mantenere e abbattere le connessioni.
- 6- Presentazione (Presentation Layer): si occupa della corretta formattazione dei dati provenienti dalle applicazioni, può offrire anche funzionalità di compressione e di crittografia.

7- Applicazione (Application Layer): ha l'obiettivo di interfacciare utente e macchina.

I livelli da 1 a 3 sono detti lower layers o network-oriented layers ed operano in maniera hop-by-hop cioè nodo per nodo, i livelli da 4 a 7 sono detti upper layers o application-oriented layers ed operano in modalità end-to-end coinvolgendo cioè solo i due terminali tra cui avviene la comunicazione senza interessare i nodi intermedi.

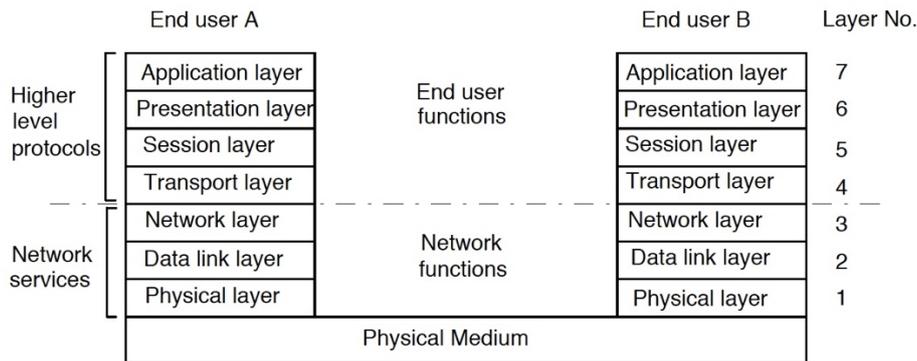


Figura 6: modello ISO-OSI

Spesso il livello di collegamento viene a sua volta diviso in due ulteriori sotto livelli:

- Il sottolivello inferiore denominato MAC (Medium Access Control) si interfaccia direttamente con lo strato fisico e si occupa delle procedure di accesso multiplo al canale di comunicazione, della codifica dei dati e delle funzionalità di controllo e correzione degli errori
- Il sottolivello superiore denominato LLC (Logical Link Control) si interfaccia con lo strato di rete e si occupa del controllo di flusso, della gestione degli indirizzi fisici e di moltiplicare su un unico collegamento più flussi di dati

Le specifiche ETSI riguardanti lo standard Tetra definiscono solamente le funzionalità relative ai livelli da 1 a 3 del modello ISO-OSI [46]:

- Livello fisico: vengono specificati la modulazione da adottare, le frequenze da utilizzare, la larghezza di banda disponibile per la trasmissione, i livelli di potenza da utilizzare, le sensibilità degli apparati radio.

- Livello collegamento: vengono definite le procedure di accesso multiplo al canale, il formato delle trame, gli indirizzi fisici dei dispositivi, le tecniche di codifica da adottare per la trasmissione dei dati, i parametri per valutare la qualità della trasmissione.
- Livello di rete: vengono specificati vari protocolli che forniscono le funzionalità di instradamento dei dati, la registrazione e la de-registrazione dei terminali mobili presso le stazioni radio-base, inoltre vengono specificate le procedure di segnalazione e quelle necessarie a permettere la mobilità dei terminali mobili tra varie celle.

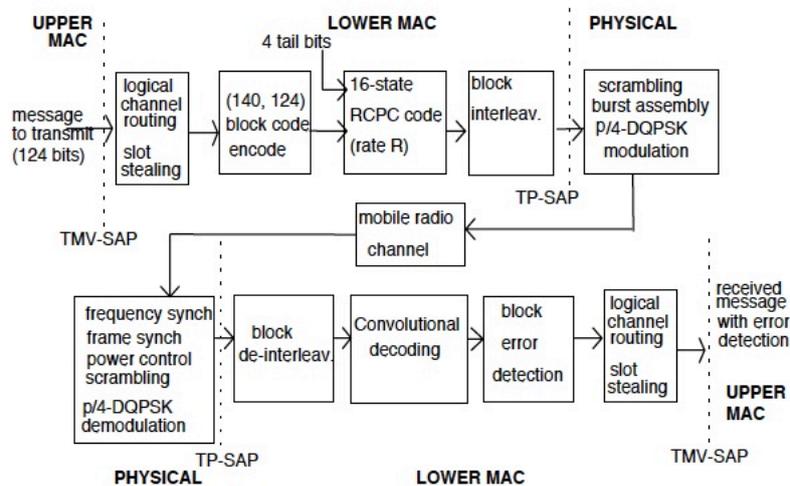


Figura 7: schema a blocchi di un trasmettitore e di un ricevitore Tetra [46]

È utile effettuare una distinzione tra i dati di controllo e segnalazione, che costituiscono il cosiddetto piano di controllo (Control Plane) e i dati degli utenti, che costituiscono il piano di utente (User Plane). Questa distinzione avviene al di sopra del sottolivello MAC nello strato di collegamento.

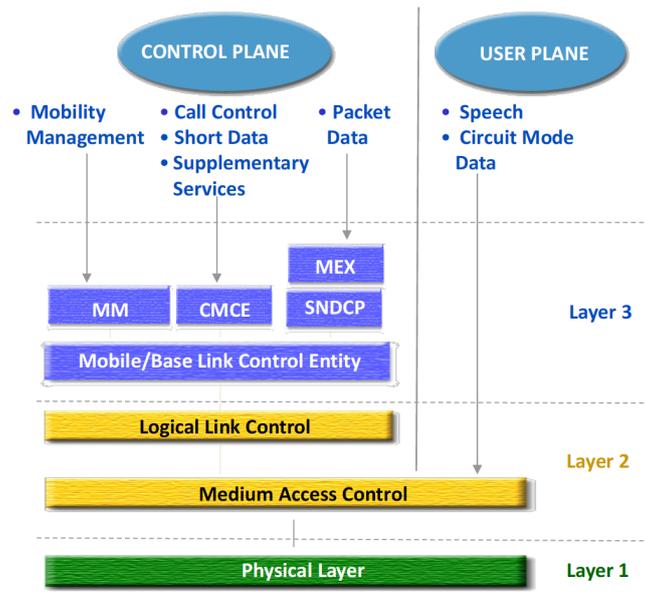


Figura 8: stack protocollare Tetra TMO [9]

1.2.1.4 Frequenze assegnate al servizio

Il sistema Tetra è progettato per funzionare nella banda UHF (Ultra-High Frequency) in un intervallo di frequenze che va dai 380 ai 920 MHz [40]. Le frequenze effettivamente utilizzabili dipendono dai regolamenti dei vari stati, in particolare alcune bande di frequenze potrebbero essere dedicate ad utilizzi specifici quali ad esempio servizi di emergenza o di pubblica sicurezza. In Italia l'utilizzo dello spettro radio è regolamentato dal Piano Nazionale di Ripartizione delle Frequenze (PNRF) e l'utilizzo delle frequenze deve essere autorizzato dal Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) che richiede il pagamento di apposite licenze.

Gli intervalli di frequenza tipicamente assegnate al Tetra sono:

- 380 – 400 MHz: servizi di pubblica sicurezza
- 410 – 430 MHz: servizi pubblici
- 470 – 470 MHz: sistemi PMR pubblici e privati
- 870 – 876/915 – 921 MHz: frequenze utilizzate fuori dall'Unione Europea

Lo standard Tetra prevede una canalizzazione in bande di 25 KHz, la differenza di frequenza tra la banda di uplink e quella di downlink (duplexing space) è di 10 MHz (45 MHz per le bande a 800 e 900

MHz). Ciascuna banda di frequenza ospita 4 canali in quanto viene adottato una tecnica di accesso multiplo a divisione di tempo (TDMA).

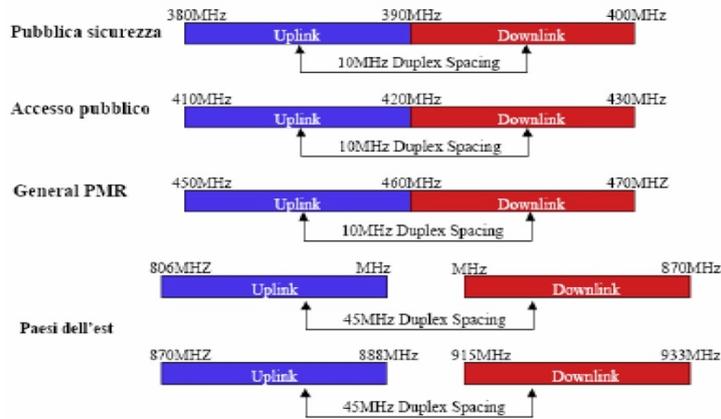


Figura 9: Frequenze assegnate ai sistemi Tetra [40]

Facendo un confronto con le altre tecnologie si nota che il sistema Tetra è caratterizzato da un'ottima efficienza spettrale, infatti in 200 KHz, contando che si adotta una canalizzazione di 25 KHz e che ogni portante è in grado di fornire 4 canali, si hanno ben 32 canali mentre il sistema GSM permette di averne a parità di occupazione di frequenza, solo 8 in caso di codifica full-rate o 16 in caso di codifica half-rate, e anche con i sistemi PMR tradizionale si riescono avere solo 8 canali nel caso di bande di 25 KHz e 16 canali nel caso di bande di 12,5 KHz.

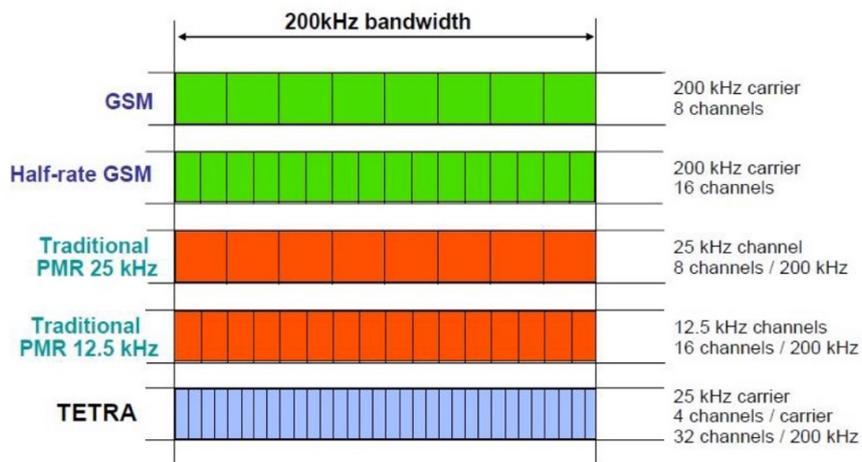


Figura 10: efficienza spettrale del sistema Tetra a confronto con le altre tecnologie [40]

1.2.1.5 Accesso multiplo al canale

Il sistema Tetra adotta una tecnica di accesso multiplo al canale a divisione di tempo (TDMA – Time Division Multiple Access) che prevede per ciascuna frequenza assegnata al servizio 4 canali realizzati organizzando la trasmissione in frame ciascuno dei quali è divisa in 4 time-slot [46].

La tecnica TDMA presenta numerosi vantaggi rispetto ad altre tecniche di accesso multiplo quali quelle a divisione di frequenza (FDMA – Frequency Division Multiple Access). Innanzitutto, la tecnologia TDMA permette di ottenere un'ottima efficienza spettrale grazie anche al fatto che non sono necessarie bande di guardia, come accade invece nell'FDMA, quindi le frequenze assegnate al servizio vengono utilizzate al massimo delle loro potenzialità. Con il TDMA inoltre risulta enormemente semplificata la circuiteria a radiofrequenza dei dispositivi in quanto è sufficiente un unico trasmettitore dato che viene impegnata un'unica banda di frequenza, mentre nell'FDMA la banda disponibile per il servizio viene divisa in sotto-bande ciascuna delle quali necessita di un trasmettitore dedicato. L'assenza delle sotto-bande evita inoltre di dover utilizzare filtri passa-banda a banda stretta che sono problematici e costosi da realizzare. Un'altra interessante caratteristica dei sistemi TDMA è la possibilità di variare in maniera dinamica la banda disponibile per una data comunicazione variando in maniera dinamica il numero di slot temporali assegnati ad essa.

La tecnica TDMA presenta però anche dei punti deboli, infatti innanzitutto necessita di una accurata sincronizzazione tra i dispositivi affinché gli slot temporali rimangano correttamente allineati, ed inoltre è particolarmente sensibile al problema dei cammini multipli, infatti varie copie di segnale provenienti da cammini diversi potrebbero arrivare con ritardi diversi il che può comportare delle interferenze tra le comunicazioni che viaggiano su slot diversi che vengono in tal modo a sovrapporsi.

Il primo canale di almeno una delle frequenze assegnate al servizio, che viene indicata come portante principale (Main Carrier), viene di norma riservato come canale di controllo principale (MCCH – Main

Control Channel). Quando i terminali vogliono effettuare una chiamata inoltrano una richiesta su questo canale, a seguito della quale, compatibilmente con le risorse disponibili, l'infrastruttura assegna loro un canale di traffico (TCH – Traffic Channel). Nel caso il sistema comprenda molti terminali è possibile definire ulteriori canali di controllo (ECCH – Extended Control Channel).

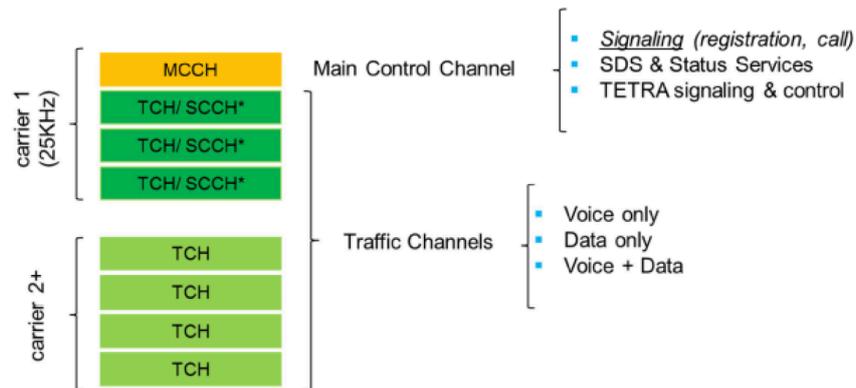


Figura 11: canali di controllo e canali di traffico [24]

Dato che tutti i terminali possono inviare le loro richieste sul canale di controllo, è necessario adottare un meccanismo che disciplini l'accesso multiplo al canale, in modo da evitare che le richieste provenienti dai vari dispositivi entrino in collisione tra loro. A questo scopo si adotta un protocollo di accesso multiplo a contesa denominato Slotted Aloha; in questo protocollo tutti i dispositivi che vogliono trasmettere lo possono fare in corrispondenza di determinati istanti, senza la necessità di verificare che il canale sia libero, questo comporta il fatto che potrebbero verificarsi delle collisioni se più dispositivi decidono di trasmettere contemporaneamente, quando ciò si verifica i dispositivi provano a ritrasmettere dopo un certo intervallo di tempo aleatorio diverso per ogni dispositivo in modo tale da minimizzare la probabilità di avere di nuovo una collisione.

1.2.1.6 Struttura dei frame

Lo standard Tetra organizza le trasmissioni in frame della durata di 56,67 ms, ciascuno dei quali è diviso in 4 slot temporali identici lunghi 14,167 ms che portano ciascuno 510 bit di modulazione i quali hanno ognuno una durata di 27,78 μ s [48]. I frame sono poi organizzati in gruppi di 18 denominati multi-frame che hanno una

durata di 1,08 s; di questi frame il diciottesimo è sempre riservato al trasporto di informazioni di controllo e segnalazione. A loro volta i multi-frame sono organizzati in gruppi di 60 chiamati hyper-frame della durata di 61,2 s. Solo in uplink inoltre gli slot temporali possono essere divisi in due sotto-slot di 7,08 ms in grado di trasportare ciascuno 255 bit di modulazione.

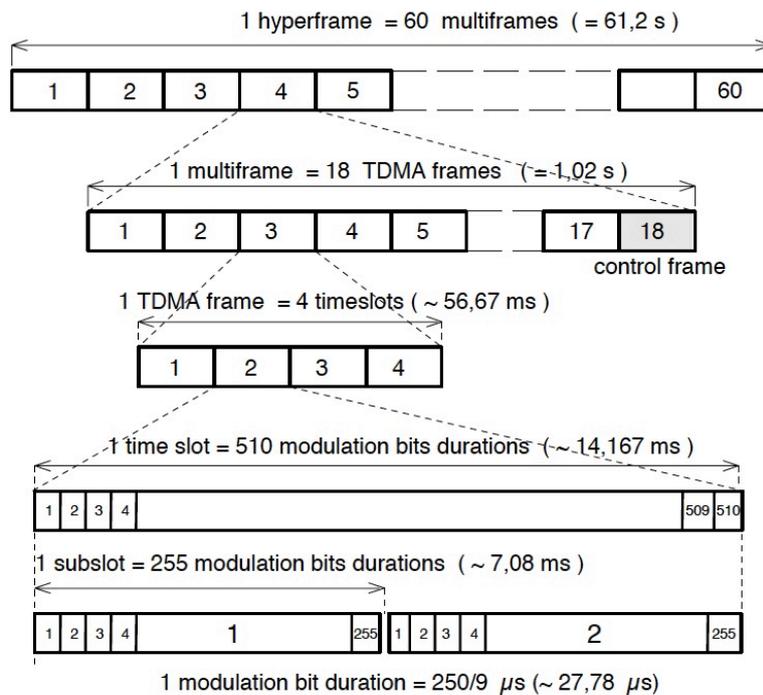


Figura 12: formato dei frame e degli slot temporali [48]

La struttura dei frame è identica sia in ricezione che in trasmissione, però la numerazione degli slot dal lato della stazione radiobase è sfalsata rispetto alla numerazione dal lato del terminale mobile, questo avviene per poter permettere l'effettuazione di chiamate in modalità full-duplex.

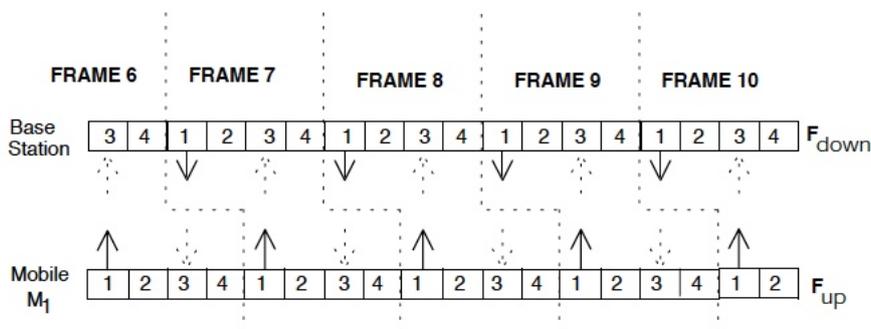


Figura 13: numerazione degli slot temporali [48]

1.2.1.7 Descrizione dei burst e maschera di trasmissione

Con il termine burst si indica tutto ciò che viene trasmesso all'interno di un time-slot. Affinché la trasmissione avvenga in maniera corretta i burst devono rispettare determinati requisiti per quanto riguarda i valori di potenza utilizzati e le temporizzazioni [48]. Si distinguono vari tipi di burst a seconda delle loro funzioni ciascuno dei quali ha diverse caratteristiche:

- Normal Burst: utilizzati per trasportare i dati degli utenti
- Control Burst: trasportano i dati di controllo e segnalazione
- Linearization Burst: servono per la procedura di linearizzazione necessaria al fine di tarare correttamente i trasmettitori
- Synchronization Burst: servono a sincronizzare tra loro i dispositivi

In generale comunque i burst sono costituiti da una zona centrale in cui il livello di potenza deve essere mantenuto ad un determinato valore prefissato e che costituisce il periodo in cui vengono effettivamente trasmessi i dati utili, preceduto da una rampa ascendente in cui il dispositivo aumenta la sua potenza da zero fino al livello desiderato, e seguito da una rampa discendente in cui la potenza viene fatta calare fino a tornare a zero per lasciare poi libero lo slot successivo per la trasmissione seguente. È necessario riservare una particolare attenzione a come sono fatte le rampe, talvolta indicate anche con il termine di intervalli di guardia (Guard Periods), perché esse devono essere sufficientemente ripide per non rubare troppo tempo utile per la trasmissione e per non rischiare di sfiorare al di fuori dei limiti temporali del burst, ma non devono neppure essere eccessivamente ripide perché ciò provocherebbe un'eccessiva dilatazione dello spettro. In particolare, per i burst di tipo normale i requisiti impongono una durata minima di 12,8 secondi, sui 14,2 della durata dell'intero burst, per l'intervallo centrale in cui avviene la trasmissione dei dati, di conseguenza le rampe ascendente e discendente devono essere opportunamente dimensionate [2]. Solitamente si usa rappresentare in maniera grafica i limiti che devono essere rispettati in un grafico potenza-tempo noto come maschera di trasmissione (o Power Profile Mask).

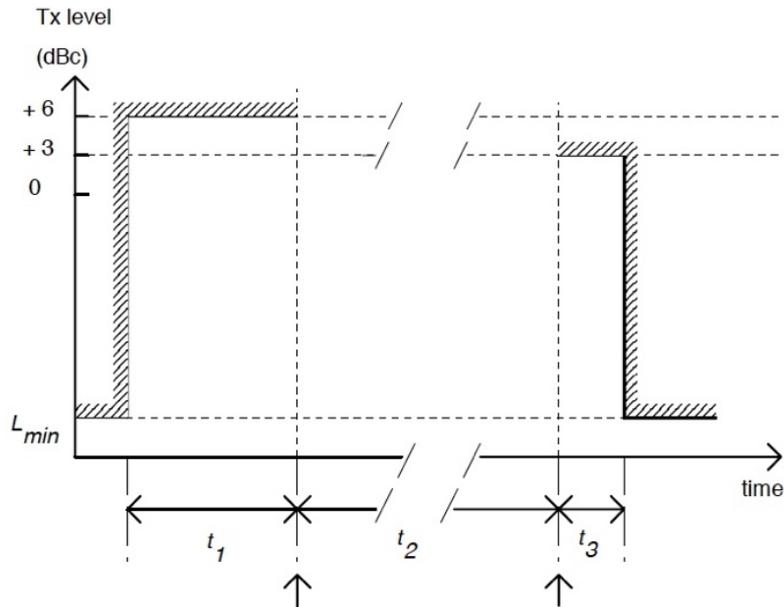


Figura 14: maschera di trasmissione [48]

1.2.1.8 Modulazione

Lo scopo della modulazione è quello di trasformare un segnale in banda base in un segnale a radiofrequenza in modo tale che sia possibile trasmetterlo sul mezzo radio.

La Release 1 dello standard Tetra prevede l'utilizzo della modulazione $\pi/4$ DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) con una rate di modulazione di 36 kbit/s [39]. Si tratta di una modulazione digitale di fase di tipo differenziale, quindi l'informazione non è codificata nel valore assoluto della fase del simbolo di modulazione ma nella differenza di fase rispetto al simbolo precedente. Il termine quadratura è dovuto al fatto che le possibili variazioni di fase sono 4. Il $\pi/4$ sta ad indicare che ai simboli viene aggiunto uno sfasamento di 45° (cioè $\pi/4$ radianti) che serve ad evitare che nel passaggio tra un simbolo il valore dell'ampiezza si annulli, questo fa sì che invece di 4 possibili simboli di modulazione ce ne siano in realtà 8. Ciascun simbolo di modulazione può trasportare due bit di informazione ($\log_2 4 = 2$).

Variazione di fase	Bit codificati
$+\pi/4$	00
$+3\pi/4$	01
$-3\pi/4$	11
$-\pi/4$	10

Rappresentando gli 8 possibili valori che possono essere assunti dai simboli di modulazione in un diagramma cartesiano che ha per ascisse i valori della componente in fase e per ordinate quelli della componente in quadratura (diagramma I-Q), la distanza tra l'origine e il punto che rappresenta ciascun simbolo è l'ampiezza di quest'ultimo e l'angolo con l'asse delle ordinate è la sua fase; questo grafico è la cosiddetta costellazione della modulazione.

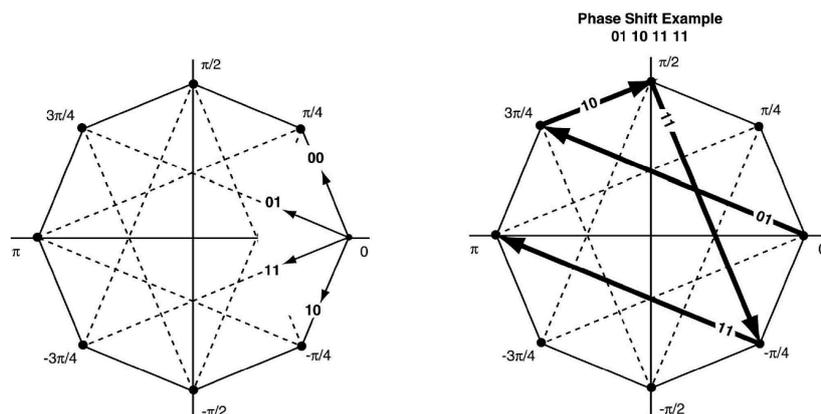


Figura 15: costellazione della modulazione $\Pi/4$ DQPSK [46]

La presenza di un'eventuale componente continua residua (Residual Carrier Power) in ingresso al modulatore comporta un errore che provoca una deviazione dal valore teorico, questo errore deve essere inferiore al 5% e può essere corretto attraverso specifiche procedure di linearizzazione.

La presenza del rumore fa sì che i simboli di modulazione differiscano da quelli ideali, il parametro che quantifica la qualità della modulazione è l'accuratezza di modulazione (Modulation Accuracy) che quantifica quanto un simbolo reale si discosti dal suo valore ideale, il massimo scostamento ammesso è del 30% per quanto

riguarda il valore di picco degli errori, e del 10% per quanto riguarda il loro valore efficace.

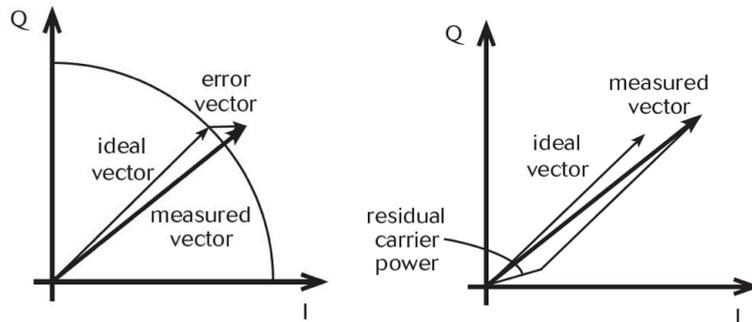


Figura 16: misura dell'accuratezza della modulazione [46]

L'operazione di modulazione avviene fisicamente in quattro diversi passaggi [46]:

- Generazione della transizione di fase: in base ai bit da codificare viene generato il corrispondente valore di differenza di fase.
- Generazione del simbolo di modulazione: la differenza di fase appena generata viene applicata al simbolo di modulazione precedente per creare il prossimo simbolo di modulazione.
- Filtraggio di modulazione: il simbolo così ottenuto viene filtrato tramite un filtro del tipo a radice di coseno rialzato.
- Traslazione di frequenza: il simbolo di modulazione viene applicato alla portante ottenendo così il segnale a radiofrequenza.

Di questi quattro passaggi i primi costituiscono la cosiddetta codifica differenziale, gli ultimi due invece costituiscono la modulazione vera e propria.

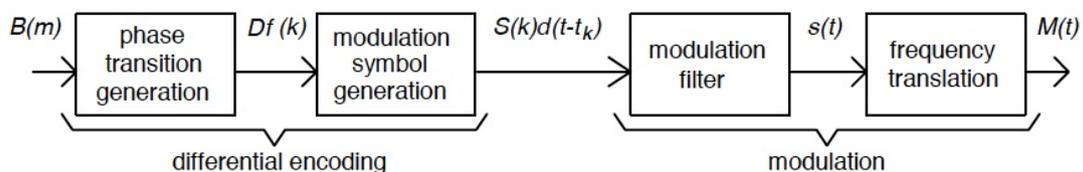


Figura 17: schema a blocchi del modulatore [46]

1.2.1.9 Codifica di canale

La codifica di canale è un insieme di processi che servono a proteggere le informazioni trasmesse in un sistema di telecomunicazioni.

La codifica di canale adottata nello standard Tetra si compone di 4 passaggi [46]:

- codifica a blocco
- codifica convoluzionale
- interleaving
- scrambling

Per capire meglio che cosa avviene in questi passaggi conviene dividere i bit di informazioni in 5 categorie:

- bit di tipo 1: sono i bit non codificati che vanno in ingresso al codificatore a blocco.
- bit di tipo 2: sono i bit a cui è stata applicata la codifica a blocco e vanno in ingresso al codificatore convoluzionale.
- bit di tipo 3: sono i bit che escono dal codificatore convoluzionale e vanno in ingresso all'interleaver.
- bit di tipo 4: sono i bit che escono dall'interleaver e vanno in ingresso allo scrambler.
- bit di tipo 5: sono i bit codificati che escono dallo scrambler e sono pronti per essere trasmessi.

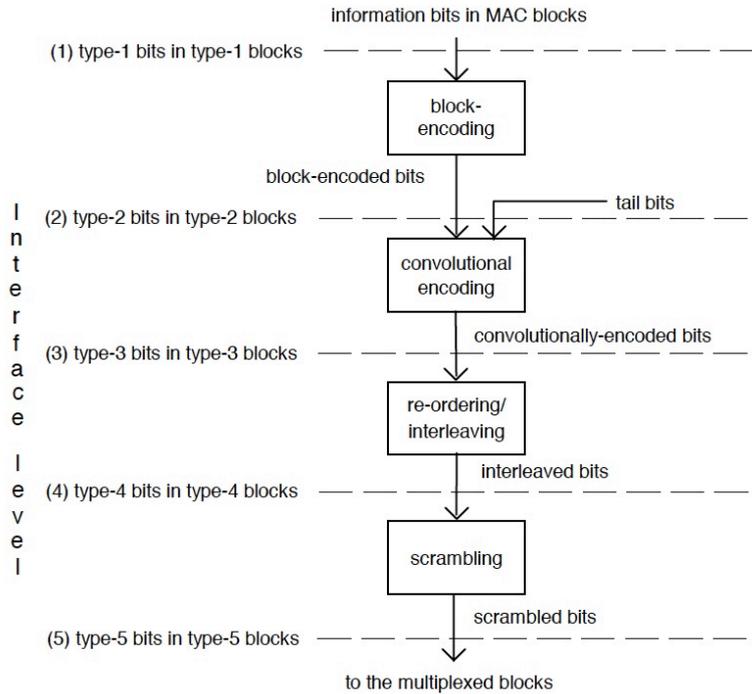


Figura 18: schema a blocchi del codificatore di canale [46]

Il primo passaggio della codifica è costituito da un codice a blocco (K_1, K_1+16) il che significa che prende in ingresso K_1 bit di tipo 1 e produce in uscita K_1+16 bit di tipo 2. I 16 bit aggiunti vengono chiamati tail-bits [40].

La codifica per prima cosa prevede la costruzione di un polinomio $M(X)$ che ha come coefficienti i K_1 bit di tipo 1:

$$M(X) = \sum_{k=1}^{K_1} b_1(k)X^{K_1-k}$$

I K_1+16 bit di tipo 2 in uscita dal codificatore a blocco risultano essere i coefficienti del polinomio:

$$F(X) = \left[\left(X^{16}M(X) + X^{K_1} \sum_{i=0}^{15} X^i \right) \text{mod } G(X) \right] + \sum_{i=0}^{15} X^i$$

dove le operazioni sono tutte in modulo 2 e $G(X)$ è il polinomio generatore del codice definito come:

$$G(X) = X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$$

La codifica convoluzionale prevede l'utilizzo di un codice di tipo RCPC (Rate-Compatible Punctured Convolutional Code). Il codificatore convoluzionale deve produrre K_3 bit di tipo 3 a partire da K_2 bit di tipo 2, per fare ciò si impiega un codice madre a 16 stati

con tasso di 1/4 dal quale si ottiene poi per punturazione un codice convoluzionale con tasso K_2/K_3 . Lo standard prevede di adottare dei tassi di codifica differenti in base al tipo di informazioni che si stanno trasmettendo (dati, voce, segnalazione) e al grado di protezione prescelto.

I bit in uscita al codificatore convoluzionale sono definiti da:

$$V(4(k-1) + i) = \sum_{j=0}^4 b_2(k-j)g_{i,j}$$

usando come polinomi generatori:

$$\begin{aligned} G_1(D) &= 1 + D + D^4 \\ G_2(D) &= 1 + D^2 + D^3 + D^4 \\ G_3(D) &= 1 + D + D^2 + D^4 \\ G_4(D) &= 1 + D + D^3 + D^4 \end{aligned}$$

Lo scopo dell'interleaving è quello di riordinare i bit codificati in modo tale da rendere il segnale maggiormente resistente nel confronto di errori multipli.

Nel Tetra a seconda del tipo di dato che si sta codificando l'interleaving può avvenire su singoli blocchi di dati o su gruppi di N blocchi di dati.

Dato che l'interleaver ha la sola funzione di riordinare i bit, il numero di bit in ingresso sarà uguale a quello dei bit in uscita.

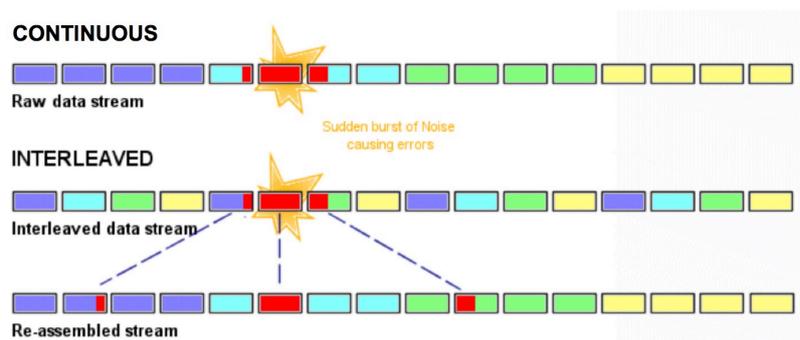


Figura 19: funzionamento dell'interleaving

La funzione dello scrambling (o randomizzazione) è quello di prendere in ingresso una sequenza di bit caratterizzata da una certa distribuzione di 0 e 1 e riordinarli in maniera tale che la sequenza che ne risulti sia il più vicino possibile ad una sequenza casuale e sia il

più possibile scorrelata rispetto ai dati in ingresso, questo fa sì che non ci siano mai lunghe sequenze di bit tutti a 0 o tutti a 1 che risultano problematici nelle trasmissioni. Il numero di bit in ingresso è ovviamente uguale a quello dei bit in uscita, dato che i dati vengono semplicemente riordinati.

1.2.1.10 Set di canali logici

Lo standard Tetra definisce, a seconda del tipo di dati che trasportano, vari tipi di canali logici, i quali devono essere poi mappati nei canali fisici [48].

Innanzitutto, si effettua una prima distinzione tra:

- Canali di traffico (TCH): trasportano informazioni cioè dati o voce.
- Canali di controllo (SCH): trasportano dati di controllo e segnalazione.

I canali di traffico si dividono in:

- Canali di traffico vocali (TCH/S): trasportano le chiamate vocali.
- Canali di traffico dati (TCH/D): trasportano i dati a commutazione di circuito, ne esistono di tre tipi in base alla bit-rate che può essere di 7,2, 4,8 o 2,4 Kbit/s a seconda del livello di protezione dei dati adottato.

I canali di controllo si dividono in:

- Canali di linearizzazione (LCH): utilizzati per tarare i trasmettitori radio.
- Canali di sincronizzazione (SCH/S): utilizzati per sincronizzare i dispositivi.
- Canali di segnalazione: servono per trasportare i dati di segnalazione, possono occupare un intero slot (SCH/F) o solo mezzo (SCH/H).
- Stealing Channel (STCH): consiste nell'utilizzare parte della capacità di un canale di traffico per inviare informazioni di segnalazione prioritarie.

A seconda del tipo di canale vengono adottati degli schemi di codifica differenti.

1.2.1.11 Funzionalità dello strato di rete

Lo standard Tetra definisce per quanto riguarda lo strato di rete diversi protocolli che si occupano di fornire numerose funzionalità.

Innanzitutto, lo strato di rete viene diviso in due sottostrati, nello strato inferiore troviamo un unico protocollo denominato Mobile Link Entity (MLE) che offre le funzionalità di instradamento e indirizzamento di base che sono comuni per tutti i servizi; nello strato superiore invece si trovano numerosi protocolli ognuno dei quali ha delle funzionalità specifiche [48]:

- Mobility Management (MM): si occupa della registrazione e della de-registrazione dei terminali mobili presso le stazioni radio-base e delle procedure di mobilità dei terminali mobili tra celle diverse.
- Call Control (CC): si occupa dell'instaurazione, del mantenimento e del rilascio delle chiamate vocali.
- Circuit Mode Control Entity (CMCE): si occupa dell'apertura e della chiusura delle comunicazioni in modalità commutazione di circuito.
- SNDCP (Sub-Network Dependent Convergence Protocol): si occupa di adattare i pacchetti IP relativi al servizio dati a pacchetto per la trasmissione via radio.

1.2.2 DMO Air Interface

Una delle caratteristiche peculiari del sistema Tetra, che lo contraddistingue dalle altre tecnologie di comunicazioni radio, è la possibilità di effettuare trasmissioni in modalità diretta tra i dispositivi mobili senza il supporto dell'infrastruttura di rete fissa, questa funzionalità è nota con il nome di Direct Mode Operation (DMO) [10-11].

La modalità DMO permette di poter effettuare comunicazioni tra i dispositivi mobili in tutte quelle situazioni in cui per varie ragioni non vi sia copertura radio da parte delle stazioni radiobase:

- Fuori dal raggio di copertura delle stazioni radiobase
- All'interno di edifici
- In zone in cui a causa di ostruzione della tratta radio il segnale è assente o troppo scarso
- In caso di guasto dell'infrastruttura fissa
- In caso di congestione della rete

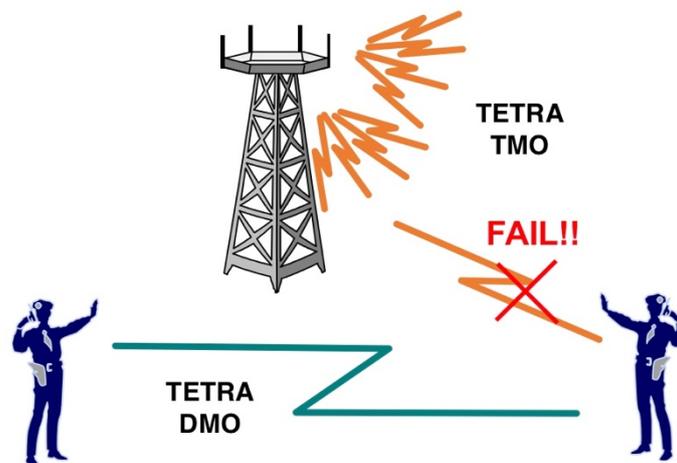


Figura 20: la modalità diretta permette di comunicare anche quando l'infrastruttura di rete non è disponibile

Le comunicazioni in modalità diretta possono avvenire in due diversi modi:

- Free Direct Mode: in questa modalità le comunicazioni tra i dispositivi mobili non vengono regolamentate da nessuna infrastruttura o dispositivo esterno ma sono gli stessi dispositivi che gestiscono la comunicazione.
- Managed Direct Mode: in questa modalità i dispositivi mobili comunicano direttamente tra di loro ma le comunicazioni vengono regolamentate da un dispositivo che funge da stazione di controllo, questo dispositivo può essere sia una stazione base fissa quando i dispositivi si trovano sotto copertura radio oppure un terminale mobile opportunamente configurato a tale scopo.

L'accesso al mezzo radio avviene in maniera pressoché identica al caso TMO, infatti viene adottata per l'accesso al canale la stessa tecnica TDMA con 4 slot per portante radio; l'unica differenza consiste nel fatto che nel DMO solitamente si utilizza una sola frequenza per entrambe le direzioni della comunicazione mentre nel TMO si utilizzano due diverse frequenze per uplink e downlink.

Andando ad analizzare la pila protocollare del DMO si nota che è molto simile a quella del TMO, risulta però semplificata rispetto ad esso, infatti pur restando identici i due strati inferiori, al terzo livello dove nel TMO vi è una moltitudine di protocolli che gestiscono vari aspetti della comunicazione nel DMO vi è il solo protocollo DMCC (Direct Mode Call Control) che offre tutte le funzionalità di rete necessarie [49]. Questo è facilmente comprensibile pensando al fatto che quando i dispositivi mobili comunicano direttamente tra di loro non vi è necessità di fornire tutte le funzionalità di registrazione, deregistrazione e mobilità che erano necessarie invece per poter comunicare tramite l'infrastruttura Tetra fissa.

Il protocollo DMCC si occupa di varie funzionalità quali [49]:

- Attivare, mantenere e chiudere le chiamate
- Gestire il servizio di trasmissione di dati a pacchetto
- Gestire il servizio SDS (Short Data Service)
- Decide come gestire nuove chiamate in relazione ad altre chiamate già in atto

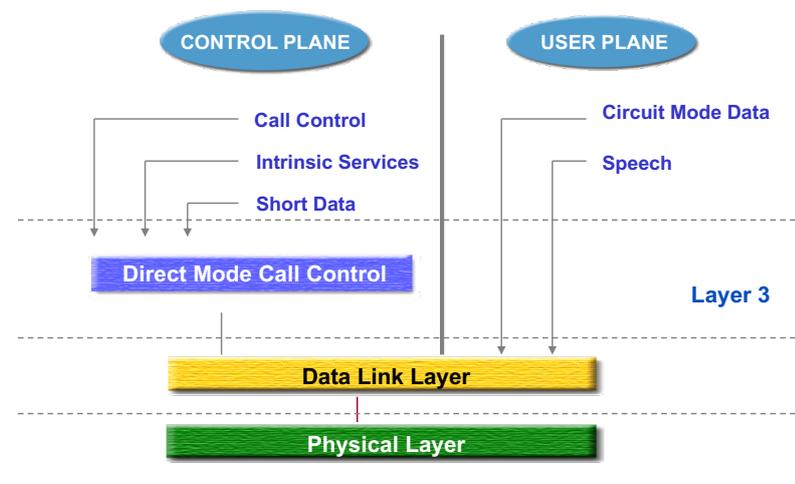


Figura 21: stack protocollare Tetra DMO [13]

Oltre ad offrire la semplice possibilità di far comunicare due o più dispositivi mobili tra di loro (Back-to-back) la tecnologia Tetra DMO prevede anche altre funzionalità più evolute [16]:

- Dual Watch: i dispositivi comunicano in modalità diretta ma allo stesso tempo rimangono in ascolto anche in modalità TMO in attesa di eventuali comunicazioni provenienti dall'infrastruttura fissa.
- DM Repeater: un dispositivo mobile può funzionare da repeater per gli altri dispositivi mobili al fine di estenderne la copertura.
- DM Gateway: un dispositivo mobile che si trovi sotto copertura radio della stazione radiobase può fare da gateway verso di essa per altri terminali mobili che si trovino fuori copertura.

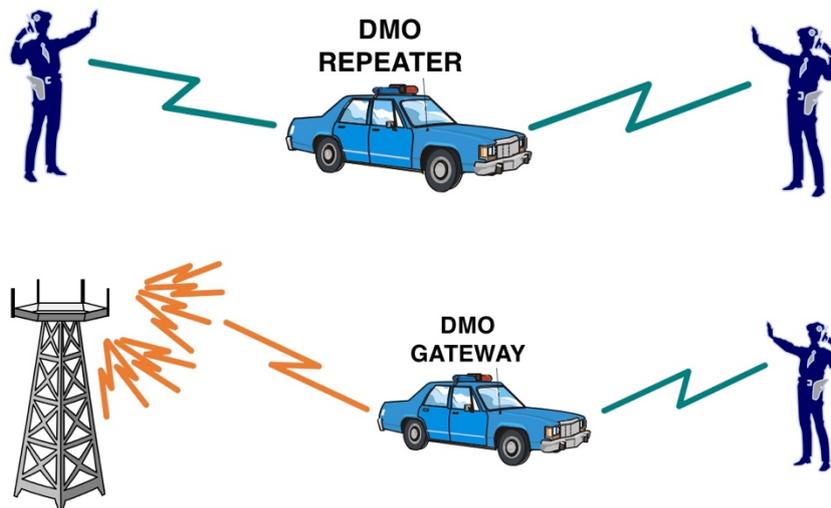


Figura 22: utilizzo di una radio veicolare come DMO-Repeater e come DMO-Gateway

Per quanto riguarda la modalità Repeater sono possibili tre possibili varianti di funzionamento:

- Modalità 1A: una sola chiamata per repeater, una sola frequenza utilizzata sia per il trasmettitore che per il ricevitore.
- Modalità 1B: una sola chiamata per repeater, due frequenze utilizzate, una per il trasmettitore e una per il ricevitore.
- Modalità 2: sono possibili due chiamate contemporaneamente sullo stesso repeater.

1.2.3 Peripheral Equipment Interface

La Peripheral Equipment Interface (PEI) è un'interfaccia standard che permette la connessione di un terminale esterno con un dispositivo mobile Tetra. Il terminale esterno, che viene detto DTE (Data Terminal Equipment) utilizza il dispositivo mobile, che viene detto DCE (Data Circuit-terminating Equipment) come modem verso la rete Tetra [51].

Analizzando nel dettaglio la pila protocollare prevista dallo standard per l'interfaccia PEI troviamo:

- Al livello fisico un'interfaccia di trasmissione dati seriale di tipo RS232.
- Al livello di collegamento il protocollo PPP (Point-to-Point Protocol).
- Al livello di rete i protocolli IP e TNP1.

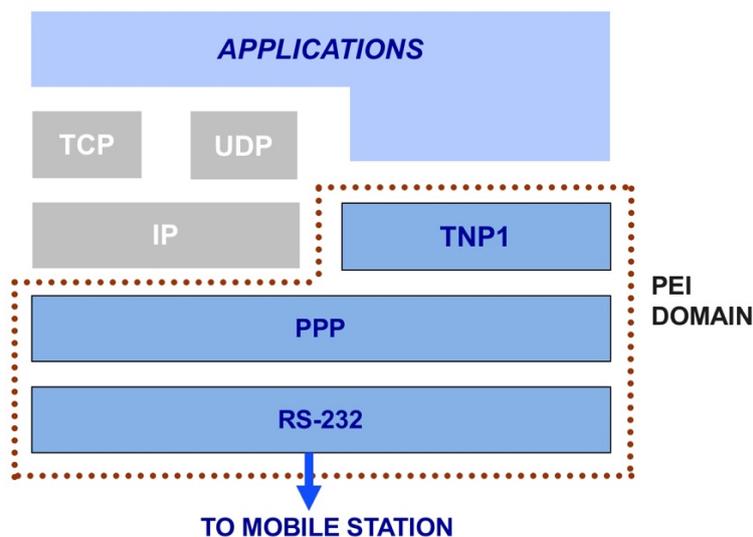


Figura 23: stack protocollare dell'interfaccia PEI [9]

Come protocollo di livello fisico lo standard Tetra prevede l'utilizzo di un collegamento dati di tipo RS232 (noto anche come ITU-T V.24). Si tratta di un collegamento dati seriale a bassa velocità progettato per la comunicazione tra un computer e un dispositivo esterno quale ad esempio un modem.

Per la trasmissione vengono utilizzati di norma 8 cavi, ognuno dei quali svolge una determinata funzione [32]:

- TD (circuit 103): trasporta i dati che viaggiano dal terminale esterno al dispositivo mobile.
- RD (circuit 104): trasporta i dati che viaggiano dal dispositivo mobile al terminale esterno.
- DSR (circuit 107): viene utilizzato dal dispositivo mobile per indicare quando è disponibile per ricevere connessioni.
- DCD (circuit 109): viene utilizzato dal dispositivo mobile per indicare che la connessione è attiva.
- DTR (circuit 108/2): viene utilizzato dal terminale esterno per indicare al dispositivo mobile che è connesso.
- RTS (circuit 105): viene utilizzato dal terminale esterno per indicare che ha dei dati da trasmettere.
- CTS (circuit 106): viene utilizzato dal dispositivo mobile per regolare l'arrivo dei dati dal terminale esterno.
- RI (circuit 125): non utilizzato.

In taluni casi vengono utilizzate connessioni con solo 4 cavi, in tal caso DCD, DSR e DTR non vengono utilizzati.

I connettori utilizzati possono essere di vario tipo quali ad esempio connettori tipo D a 9 o 25 poli oppure jack RJ11 o RJ45.

Per quanto riguarda il formato dei dati trasmessi si adotta una data-rate di 9.600 bps con trame di 8 bit, 1 bit di start, 1 bit di stop e nessun bit di parità.

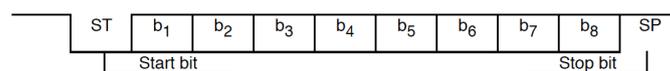


Figura 24: formato dei bit sul collegamento PEI [32]

Al livello di collegamento è previsto l'utilizzo del protocollo PPP (Point-to-Point Protocol) che è un protocollo derivato dall'HDLC specifico per l'utilizzo nelle linee punto-punto.

Il PPP è un protocollo di tipo byte-oriented, il che significa che le trame in cui è organizzata la trasmissione contengono un numero intero di byte.

La struttura delle trame PPP si compone di vari campi:

- Flag: ha la funzione di delimitatore di trama, consiste di un byte i cui bit valgono sempre 01111110.

- Address: è un byte che in teoria contiene l'indirizzo del dispositivo destinatario della comunicazione, ma dato che la comunicazione è di tipo punto-punto e il possibile destinatario è solo uno in realtà è sempre composto da 8 bit tutti posti a 1.
- Control: è un byte i cui bit portano sempre il valore 00000011.
- Protocol: campo di 1 o 2 bit che indica il protocollo di rete utilizzato dai dati che viaggiano nella trama PPP.
- Info: campo di lunghezza variabile che contiene i dati da trasmettere, deve sempre contenere un numero interno di byte e la massima lunghezza ammessa è di 1500 byte
- Check: contiene il codice CRC (Cyclic Redundancy Check) per il controllo dell'errore.

Per evitare che la comparsa di una sequenza 01111110 all'interno del campo dati venga erroneamente interpretata come flag delimitatore di trama, viene adottata la tecnica del byte stuffing, che consiste nell'aggiungere, ogni volta che tale sequenza compare nei dati, davanti ad essa un byte (detto escape byte) i cui bit valgono 0111101. Per inizializzare e configurare un collegamento PPP viene utilizzato il protocollo LCP (Link-Control Protocol).

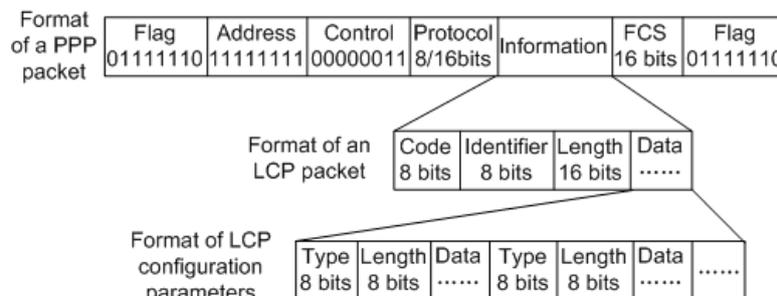


Figura 25: formato dei pacchetti PPP

Per quanto riguarda il livello di rete i protocolli che vengono impiegati sono IP che si occupa dell'instradamento dei dati sul collegamento PPP e TNP1 (Tetra Network Protocol 1) che si occupa specificatamente delle procedure di controllo e segnalazione.

Gli indirizzi di rete utilizzati dal protocollo IP sul collegamento PEI sono definiti in maniera statica e sono sempre:

- 10.0.0.100 come indirizzo del terminale esterno verso il dispositivo Tetra.

- 10.0.0.101 come indirizzo dell'interfaccia del dispositivo Tetra verso il terminale esterno.

Il dispositivo Tetra inoltre avrà anche un altro indirizzo, che può essere assegnato in maniera statica o dinamica, per la comunicazione via radio con l'infrastruttura Tetra.

Il protocollo TNP1 è un protocollo specifico dello standard Tetra che permette al terminale esterno di usufruire dei servizi offerti dal sistema Tetra quali la gestione delle chiamate, le procedure di mobilità, il servizio SDS ecc.

L'interfaccia PEI ammette 3 possibili stati di funzionamento:

- AT Command Mode: è uno stato iniziale in cui il dispositivo Tetra e il terminale esterno si scambiano informazioni di configurazione.
- AT Circuit Data Mode: in questo stato il dispositivo Tetra e il terminale esterno possono scambiarsi dati in modalità commutazione di circuito.
- TNP1/Packet Data Mode: in questa modalità tra il dispositivo Tetra e il terminale esterno risulta instaurata una connessione PPP sulla quale possono viaggiare dati a pacchetto, chiamate vocali e segnalazione.

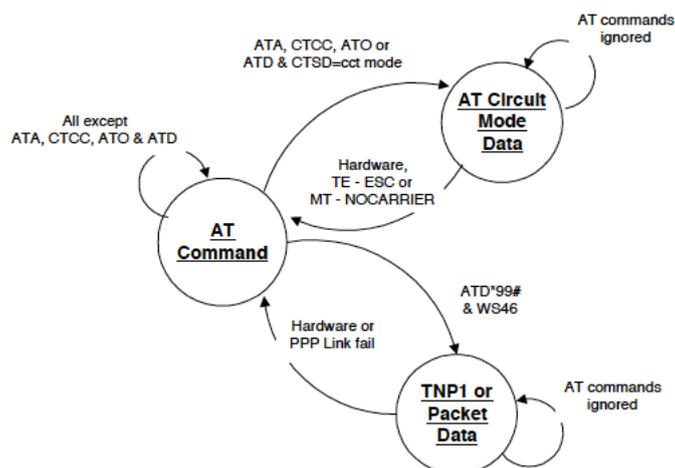


Figura 26: diagramma a stati dell'interfaccia PEI [51]

Quando il collegamento si trova in AT Command Mode il terminale e il dispositivo mobile comunicano tramite i cosiddetti Comandi AT (abbreviazione di Attention); si tratta di un set di comandi creati originariamente per collegare un modem dial-up con un computer e

che permettono l'istaurazione di una comunicazione tra due dispositivi [31].

Il terminale esterno che vuole iniziare una comunicazione in modalità vocale o a commutazione di pacchetto deve comunicare la sua intenzione ad instaurare un collegamento PPP al terminale Tetra il quale risponde con un messaggio di conferma, a questo punto si passa da AT Command Mode a TNP1/Packet Data mode. Occorre però configurare i parametri della connessione PPP, di questa funzione si occupa il protocollo LCP (Link Configuration Protocol); in questa fase qualora necessaria avviene anche l'autenticazione dei terminali. Una volta stabiliti i parametri del link PPP interviene poi il protocollo IPCP (IP Configuration Protocol) che configura i parametri relativi al protocollo IP.

1.2.4 Inter-System Interface

L'interfaccia ISI (Inter-System Interface) permette di mettere in comunicazione due diverse reti Tetra [18].

Tramite l'interfaccia ISI innanzitutto diventa possibile per i dispositivi che si trovino all'interno di una rete Tetra comunicare con terminali che si trovino in una rete diversa.

Inoltre, grazie all'interfaccia ISI diventa possibile per i terminali registrati all'interno di una rete di un operatore funzionare anche su reti di altri operatori, similmente a quanto avviene nelle reti cellulari con il roaming.

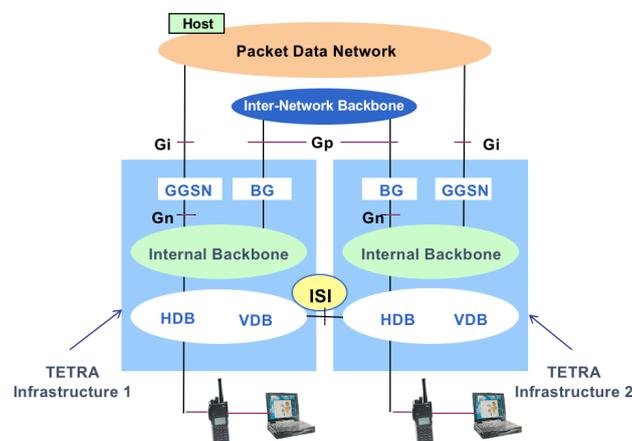


Figura 27: interfaccia tra due reti Tetra [18]

Affinché tutto ciò sia possibile occorre che vengano rispettati determinati requisiti di interoperabilità, a tal fine è necessario che per ciascuna rete venga rilasciato un certificato di interoperabilità che ne attesti la conformità con gli standard, questo certificato viene rilasciato dalla TCCA.

Quando un terminale che appartiene ad una rete Tetra si sposta su un'altra rete per poter continuare a funzionare deve ricevere un indirizzo V-ATSI (Visiting Alias Tetra Subscriber Identity).

Per quanto riguarda lo scambio di informazioni tra le due reti per il traffico voce vengono utilizzate tecnologie derivate dalle linee ISDN mentre per i servizi dati si utilizzano procedure di mobilità derivate dalla tecnologia GPRS (GPRS Tunneling Protocol).

1.2.5 Interfaccia telefonica

L'interfaccia telefonica permette di connettere il sistema Tetra con una rete telefonica pubblica (PSTN o ISDN) o privata (PABX) a fine di poter effettuare chiamate telefoniche tra dispositivi Tetra e normali i telefoni fissi o cellulari.

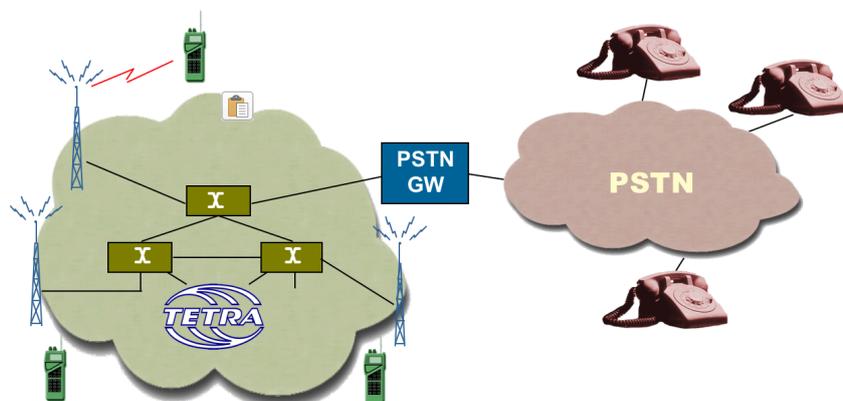


Figura 28: interfaccia tra la rete Tetra e la rete telefonica [9]

A tal fine occorre effettuare una conversione dei segnali audio dal formato in uso sulla rete Tetra, che utilizza una codifica vocale denominata ACELP (Algebraic Code-Excited Linear Prediction) al formato PCM (Pulse Code Modulation) utilizzato dalle normali linee telefoniche. Inoltre, affinché possa scambiare informazioni di segnalazione con la rete telefonica il sistema Tetra deve essere in grado di generare toni DTMF (Dual-Tone Multi-Frequency), che è la

modalità con cui avviene la segnalazione sulle reti telefoniche tradizionali, questa funzionalità viene detta DTMF Overdial.

Siccome la conversione dei segnali audio potrebbe introdurre dei ritardi e causare degli echi nella voce che possono risultare fastidiose solitamente viene previsto nel sistema un dispositivo cancellatore di eco.

La comunicazione tra il sistema Tetra e un centralino telefonico esterno avviene tipicamente tramite il protocollo QSIG, che è uno standard definito dall'ETSI per le linee ISDN. Il protocollo QSIG è in grado di fornire le funzionalità di base per l'instaurazione, il mantenimento ed il rilascio delle chiamate oltre ad una vasta quantità di servizi supplementari tipici delle linee telefoniche come l'identificazione del chiamante e il trasferimento di chiamata.

1.3 Servizi offerti dalla rete Tetra

La tecnologia Tetra è in grado di fornire numerosi servizi di comunicazione, che possono essere sia di tipo dati che di tipo voce. Il fatto che lo standard Tetra si collochi a metà strada tra i sistemi di comunicazione cellulare e i sistemi di comunicazione radio privati analogici fa sì che sia in grado di offrire sia funzionalità tipiche di un tipo di sistema che dell'altro.

A seconda del tipo di funzionalità che forniscono e del tipo di risorse di comunicazione che richiedono i servizi offerti dalla rete Tetra si possono dividere in tre diverse categorie [45]:

- Servizi di trasferimento dati (Bearer Services): si tratta di servizi che offrono unicamente funzionalità di trasferimento dati tra le interfacce di rete dei dispositivi e che non si interfacciano direttamente con l'utente finale. Interessano unicamente i tre livelli inferiori dello standard ISO/OSI.
- Servizi di telecomunicazione (Teleservices): si tratta di servizi che oltre a fornire un servizio di trasferimento dati offrono anche funzionalità all'utente finale tramite la Man-Machine Interface dei dispositivi. Interessano anche i livelli superiori al terzo dello standard ISO/OSI.

- Servizi supplementari (Supplementary Services): si tratta di servizi che hanno lo scopo di fornire funzionalità aggiuntive a supporto di servizi facenti parte degli altri due gruppi.

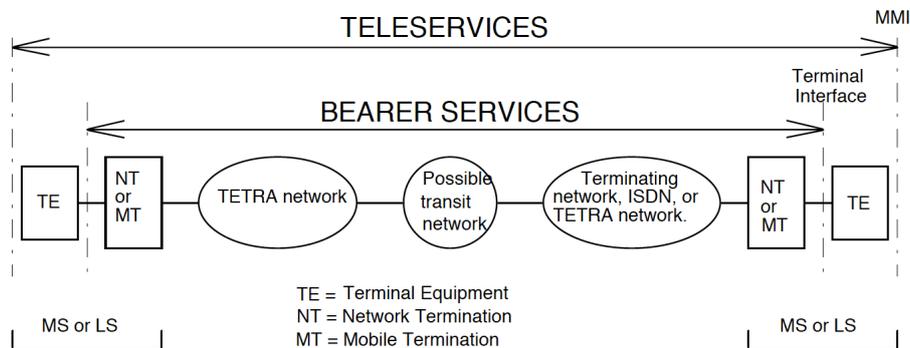


Figura 29: differenza tra Bearer Services e Teleservices [45]

In alternativa è possibile distinguere i servizi in base al tipo di informazione trasportata:

- Servizi Vocali
- Servizi Dati
- Servizi supplementari

1.3.1 Servizi vocali

La rete Tetra offre varie funzionalità per quanto riguarda i servizi vocali [2]:

- Chiamate private: si tratta di chiamate che avvengono tra due utenti della rete Tetra, siano essi due dispositivi mobili oppure un dispositivo mobile ed un posto operatore della centrale operativa. Le chiamate private possono a seconda dei casi essere effettuate in modalità half-duplex o full-duplex. Le chiamate private sono possibili sia in modalità TMO che DMO.
- Chiamate di gruppo: si tratta di chiamate alle quali partecipano più di due utenti della rete Tetra. Le chiamate di gruppo possono avvenire solo in modalità half-duplex, quindi solo uno alla volta dei terminali è autorizzato a trasmettere, mentre gli altri possono solo ricevere. Le chiamate di gruppo sono possibili sia in modalità TMO che DMO.

- Chiamate multi-gruppo o annuncio: si tratta di chiamate alle quali partecipano contemporaneamente utenti facenti parte di più gruppi, i quali vengono quindi riuniti in un multi-gruppo.
- Chiamate telefoniche: si tratta di chiamate tra un dispositivo Tetra e un telefono posto in una rete telefonica esterna. Le chiamate telefoniche avvengono grazie all'interfaccia telefonica presente all'interno della rete Tetra.
- Chiamate di emergenza: si tratta di chiamate che possono essere inviate da qualsiasi dispositivo Tetra in situazioni di emergenza e che hanno la massima priorità in modo tale da garantire che vadano sempre a buon fine.

1.3.1.1 Chiamate private

Una chiamata privata, nota anche come chiamata individuale o chiamata punto-punto, è una chiamata che avviene tra due dispositivi Tetra. L'utente che vuole inviare la chiamata deve indicare il destinatario componendo il suo SSI sulla tastiera del suo terminale.

Le chiamate private si distinguono in half-duplex e full-duplex a seconda del numero di canali che vengono riservati per la chiamata.

Nella modalità half-duplex, che è la modalità di funzionamento standard delle radio PMR, alla chiamata viene assegnato un solo canale di traffico che deve essere utilizzato sia per la trasmissione che per la ricezione, quindi i terminali in un dato istante possono o solo ricevere o solo trasmettere e solo uno dei terminali alla volta può trasmettere, mentre l'altro rimane in ascolto. Quando un utente vuole parlare durante una chiamata half-duplex deve premere un apposito tasto denominato PTT (Push-to-Talk), per indicare che intende impegnare il canale in trasmissione, e deve tenerlo premuto per tutto il tempo in cui continua a parlare, durante tutto questo tempo l'altro utente non può trasmettere ma solo rimanere in ricezione e se prova a trasmettere premendo anche lui il tasto PTT riceve un suono di errore. Per evitare che un utente impegni in maniera continuativa il canale solitamente è presente un talk timer che rilascia il permesso di trasmissione se il pulsante PTT viene tenuto premuto per una durata superiore di un valore preimpostato, tipicamente un minuto.

Nella modalità full-duplex, che è la modalità di funzionamento tipico delle reti telefoniche, vengono assegnati alla chiamata due canali, uno per la trasmissione (uplink) e uno per la ricezione (downlink), in questo modo i due terminali possono trasmettere e ricevere contemporaneamente. Per inviare una chiamata in modalità full-duplex, una volta selezionato il destinatario, un utente deve unicamente premere il tasto SEND per aprire la chiamata, così come avviene in un normale telefono cellulare, mentre per terminare la chiamata occorre premere il tasto END.

Per le chiamate vocali sono disponibili due diverse modalità di segnalazione denominate direct set-up e hook signalling [2].

Nella modalità direct set-up, che è tipica delle radio PMR tradizionali, non è necessario che l'utente destinatario accetti la chiamata affinché possa iniziare la trasmissione, il dispositivo ricevente semplicemente inizia a riprodurre l'audio della chiamata non appena essa viene ricevuta.

In dettaglio i passaggi necessari per l'instaurazione di una chiamata in modalità direct set-up sono i seguenti [45]:

1. Il mittente richiede l'apertura della chiamata alla SwMI (U-SETUP).
2. La SwMI inoltra la richiesta al destinatario (D-SETUP) e invia al mittente una conferma (D-CALL PROCESSING).
3. Il destinatario accetta la connessione (U-CONNECT) in automatico senza l'intervento dell'utente.
4. La SwMI invia al destinatario una conferma (D-CONNECT ACKNOWLEDGE) e avvisa il mittente che la chiamata è stata accettata (D-CONNECT).

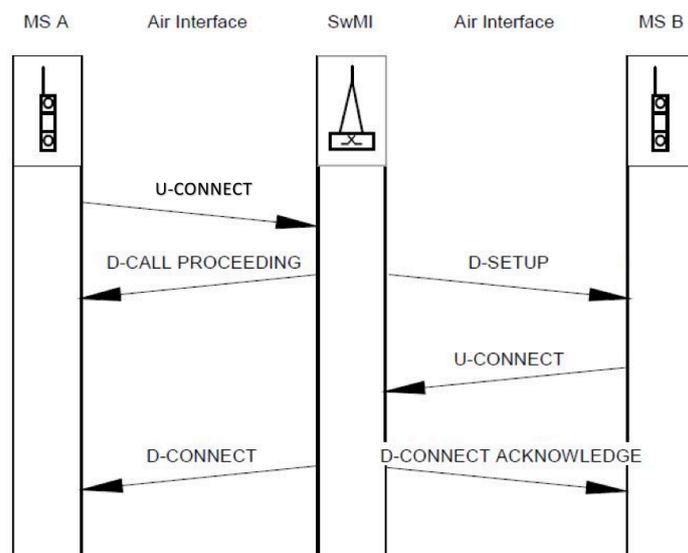


Figura 30: instaurazione di una chiamata in modalità direct set-up [45]

L'assegnazione del canale può avvenire in due modi:

- Early assignment: il canale viene assegnato non appena la SwMI riceve la richiesta di chiamata.
- Late assignment: il canale viene assegnato solo quando il destinatario conferma di aver ricevuto la richiesta.

Nella modalità hook signalling, tipica delle linee telefoniche, invece il dispositivo che riceve la chiamata inizia a squillare e solo quando l'utente destinatario accetta esplicitamente la comunicazione inizia la trasmissione vera e propria.

In dettaglio i passaggi necessari per l'apertura di una chiamata in modalità hook-signalling sono [45]:

1. Il mittente richiede l'apertura della chiamata alla SwMI (U-SETUP).
2. La SwMI inoltra la richiesta al destinatario (D-SETUP) e invia al mittente una conferma (D-CALL PROCESSING).
3. Il destinatario conferma alla SwMI la ricezione della richiesta (U-ALERT) e inizia a squillare.
4. La SwMI conferma al mittente che il destinatario ha ricevuto la richiesta (D-ALERT).
5. Finché l'utente chiamato non risponde possono essere inoltrati altri dati sulla linea.
6. Non appena l'utente chiamato risponde il destinatario conferma alla SwMI che la chiamata è stata accettata (U-CONNECT).

7. La SwMI invia una conferma al destinatario (D-CONNECT ACKNOWLEDGE) e informa il mittente che la chiamata è stata accettata (D-CONNECT).

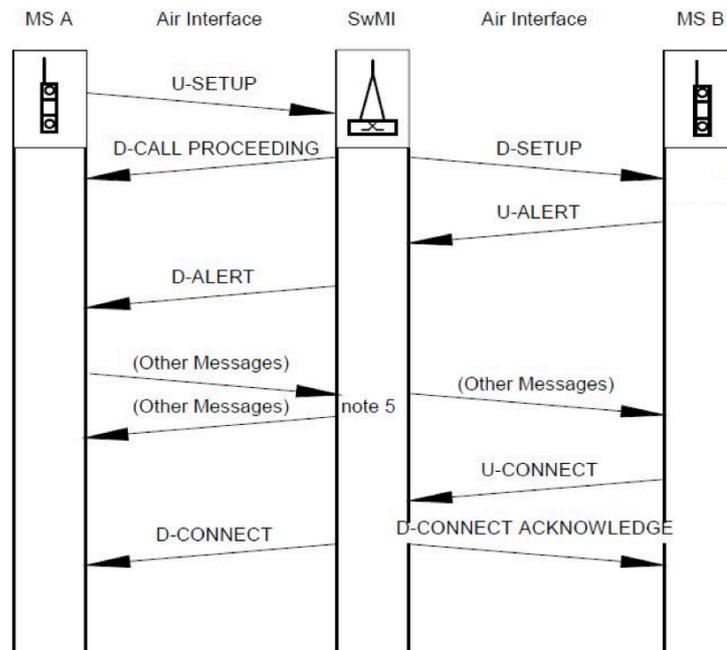


Figura 31: instaurazione di una chiamata in modalità hook signalling [45]

L'assegnazione del canale avviene solo quando il destinatario conferma che la chiamata è stata accettata (late assignment).

In entrambe le modalità la chiusura delle chiamate può essere richiesta da uno dei terminali oppure avvenire in automatico ad opera della SwMI dopo un certo intervallo di tempo. Nel caso la chiusura venga richiesta da uno dei terminali esso invia una richiesta di chiusura alla SwMI (U-DISCONNECT) la quale poi invia un messaggio di disconnessione ad entrambi i partecipanti (D-RELEASE). Nel caso la chiusura sia comandata dalla SwMI questa invia semplicemente un messaggio di disconnessione ai terminali mobili (D-RELEASE) [45].

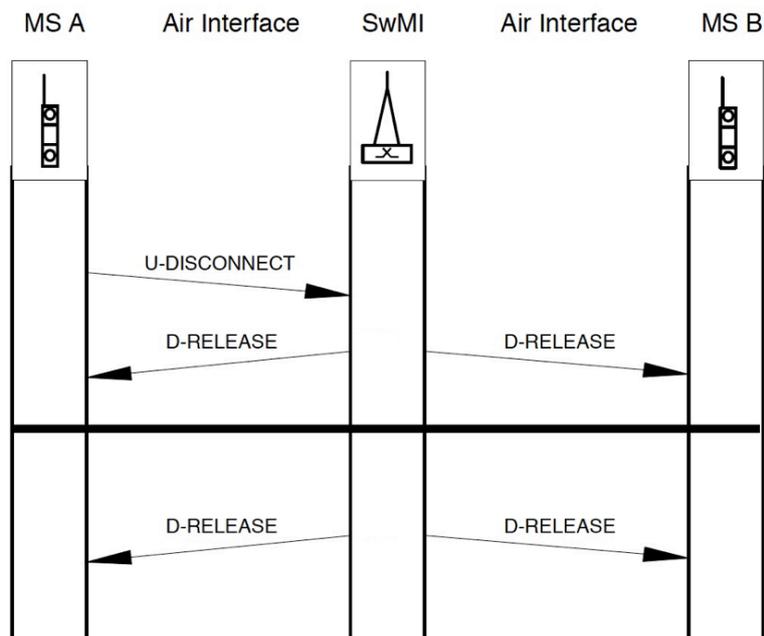


Figura 32: rilascio di una chiamata [45]

1.3.1.2 Chiamate di gruppo

Una chiamata di gruppo è una chiamata che viene iniziata da un terminale registrato all'interno di un gruppo e che comprende tutti i terminali facente parte dello stesso. Le chiamate di gruppo avvengono sempre in modalità half-duplex e utilizzando un segnalamento di tipo direct set-up.

L'apertura di una chiamata di gruppo prevede le seguenti fasi [45]:

1. Il terminale chiamante invia una richiesta alla SwMI (U-SETUP).
2. La SwMI invia una conferma al chiamante (D-CALL PROCEEDING) e inoltra la chiamata ai membri del gruppo (D-SETUP).
3. La SwMI assegna il canale di comunicazione e avvisa il chiamante che può iniziare a trasmettere (D-CONNECT).
4. Opzionalmente la SwMI può indicare al mittente la partecipazione alla chiamata di certi membri del gruppo (D-INFO), in tal caso si parla di acknowledged group call.

L'assegnazione del canale può avvenire in due modalità:

- Early Assignment: il canale viene assegnato immediatamente non appena il mittente richiede l'apertura della chiamata.

- Late Assignment: il canale viene assegnato solo quando almeno uno dei destinatari ha ricevuto la richiesta.

La chiusura della chiamata può avvenire esplicitamente da parte del terminale che l'ha aperta o in automatico dopo un certo tempo ad opera della SwMI.

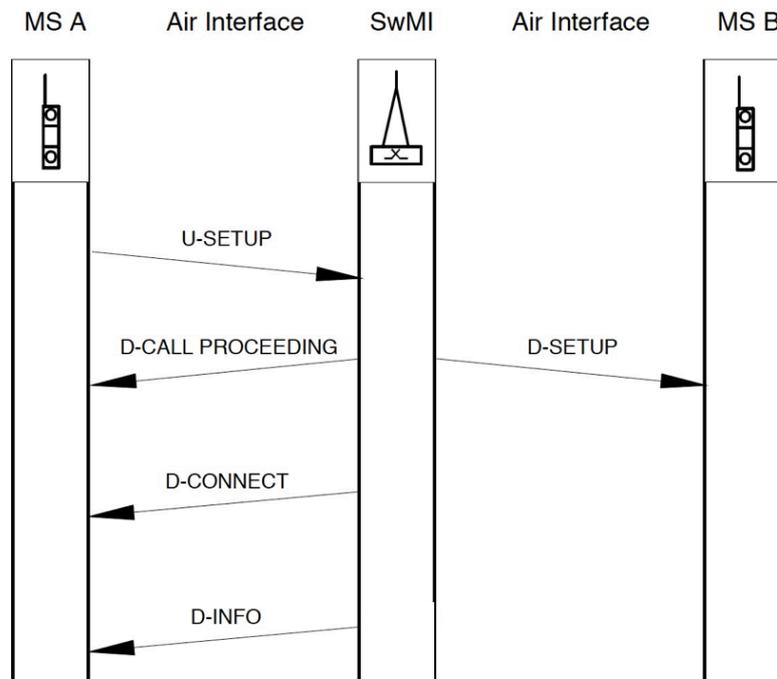


Figura 33: instaurazione di una chiamata di gruppo [45]

1.3.1.3 Chiamate telefoniche

Le chiamate telefoniche avvengono tra un terminale Tetra e un telefono in una rete telefonica esterna.

Le chiamate telefoniche devono avvenire sempre in modalità full-duplex e con segnalazione di tipo hook-signalling per motivi di compatibilità con la rete telefonica esterna.

Questa funzionalità richiede la presenza di una interfaccia telefonica che metta in comunicazione la rete Tetra con la rete telefonica effettuando la conversione dell'audio dalla codifica ACELP utilizzata nel sistema Tetra alla codifica PCM utilizzata dai telefoni tradizionali, tale interfaccia deve essere anche in grado di generare i toni DTMF necessari per la segnalazione sulla rete telefonica.

1.3.1.4 Chiamate di emergenza

Le chiamate di emergenza sono particolari chiamate che possono essere inviate da qualsiasi dispositivo Tetra in situazioni di emergenza tipicamente attraverso la pressione di un pulsante dedicato.

Le chiamate di emergenza hanno la caratteristica di avere una priorità più elevata delle altre chiamate e quindi possono essere inviate anche nel caso in cui tutte le risorse di rete siano occupate, in tal caso per permettere la chiamata di emergenza viene abbattuta una chiamata che ha una priorità inferiore liberando così le risorse necessarie.

L'invio di una chiamata di emergenza non richiede la selezione di un destinatario da parte dell'utente che la invia, perché all'interno del terminale sono già programmati uno o più destinatari atti a ricevere le chiamate di emergenza.

Sui terminali è anche possibile programmare determinate procedure da eseguire qualora da essi vengano inviate chiamate di emergenza come ad esempio l'attivazione della modalità microfono aperto, tramite la quale i destinatari della chiamata possono ascoltare tutto ciò che avviene nei pressi del terminale che ha inviato la chiamata senza la necessità di nessun intervento da parte dell'utente.

1.3.1.5 Codifica ACELP

La codifica ACELP (Algebraic Code-Excited Linear Prediction) è la codifica audio adottata per le chiamate vocali nel sistema Tetra [47].

Si tratta di una tecnologia ampiamente utilizzata nell'ambito della codifica audio, è stata sviluppata nel 1989 alla Université de Sherbrooke in Canada e risulta soggetta a brevetto da parte della VoiceAge Corporation.

Il procedimento prevede innanzitutto un filtraggio tramite un doppio filtro predittivo che elimina i silenzi e la ridondanza intrinseca del segnale audio alla quale segue una codifica tramite dizionario.

Questa tecnica di codifica lavora su blocchi di 30 ms di segnale audio e permette di ottenere una bit-rate di 8 kbit/s.

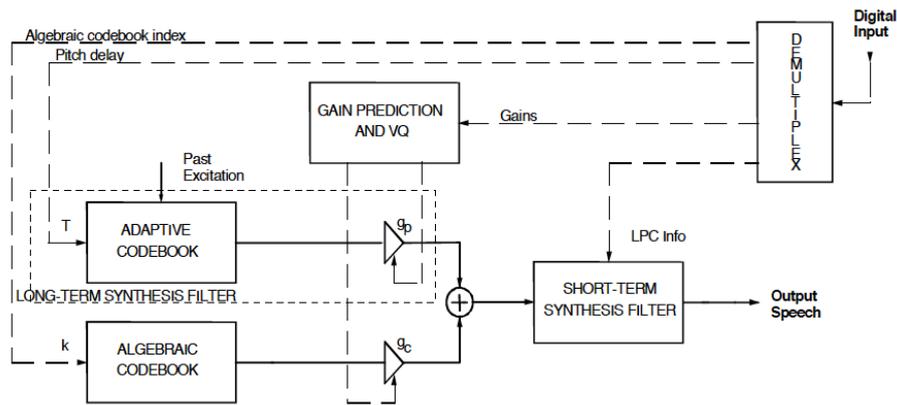


Figura 34: schema a blocchi di un codificatore ACELP [47]

1.3.2 Servizi Dati

Il sistema Tetra offre numerosi servizi di trasferimento dati che possono essere utilizzati per svariati scopi [19]:

- Messaggi di stato: si tratta di brevi stringhe numeriche di 16 bit che possono essere opportunamente codificate in modo tale da permettere lo scambio di brevi messaggi tra i terminali. Data la loro leggerezza possono essere inviati senza congestionare il traffico della rete, infatti vengono trasportati direttamente sul canale di controllo senza occupare nessun canale di traffico.
- Short Data Service (SDS): si tratta di un servizio di trasmissione di pacchetti dati di piccole dimensioni che possono essere utilizzati per trasportare messaggi di testo o altri tipi di informazioni. Esistono 4 tipi di messaggi SDS a seconda della quantità di dati in essi contenuta.
- Circuit Data Service (CDS): si tratta di un servizio di trasmissione dati in modalità commutazione di circuito in cui un canale di traffico viene assegnato in maniera esclusiva al trasporto di dati tra due terminali, indipendentemente dal traffico effettivamente scambiato tra di essi.
- Packet Data Service (PDS): si tratta di un servizio di trasmissione dati in modalità commutazione di pacchetto che sfrutta il protocollo IP per l'instradamento dei dati. Questa modalità di trasmissione dati risulta essere efficiente perché

l'assegnazione dei canali di traffico avviene in maniera dinamica in modo tale che un canale rimane assegnato solo per l'effettiva durata di una trasmissione e torna disponibile per una nuova assegnazione non appena essa termina. Anche in questo caso è possibile utilizzare, grazie alla modalità multislotted, più canali contemporaneamente per aumentare la banda disponibile per la trasmissione. È possibile inoltre definire 8 livelli di priorità (da 0 a 7) per i dati in base al TOS (Type of Service).

1.3.2.1 Messaggi di stato

I messaggi di stato sono brevi stringhe numeriche di 16 bit che possono essere utilizzate, opportunamente codificate, per trasportare determinati messaggi tra i terminali Tetra.

Con 16 bit è possibile codificare 65536 stringhe, di queste però solo la 32768 sono effettivamente utilizzabili per codificare dei messaggi definiti dall'utente, i rimanenti sono riservati per funzioni di sistema.

I messaggi di stato possono essere inviati sia a singoli destinatari che a gruppi e sfruttano per l'indirizzamento gli indirizzi TSI [1].

La caratteristica che rende questo servizio particolarmente interessante è il fatto che questi messaggi essendo estremamente leggeri occupano pochissima banda e possono essere inviati senza congestionare la rete e senza impiegare risorse che possono servire per altre comunicazioni voce o dati.

1.3.2.2 Short Data Service

Il servizio Short Data Service (SDS) permette la trasmissione di pacchetti dati di piccole dimensioni che possono essere utilizzati per trasportare contenuti di vario genere, come messaggi di testo, informazioni di localizzazione, chiavi di cifratura o altro.

Lo standard Tetra prevede quattro tipi di messaggi SDS a seconda della quantità di dati che trasportano:

- SDS-1: 16 bit

- SDS-2: 32 bit
- SDS-3: 64 bit
- SDS-4: lunghezza variabile fino a 1278 bit

I messaggi SDS possono essere inviati ad utenti singoli o gruppi e l'indirizzamento avviene sulla base dell'indirizzo TSI.

È possibile accedere al servizio SDS sia dal lato del dispositivo mobile, direttamente tramite l'interfaccia MMI o attraverso un terminale esterno tramite interfaccia PEI, sia dal lato dell'infrastruttura tramite uno Short Data Router (SDR) che permette di inoltrare i messaggi SDS su una LAN esterna incapsulandoli su una connessione TCP/IP per mezzo di un apposito strato di adattamento.

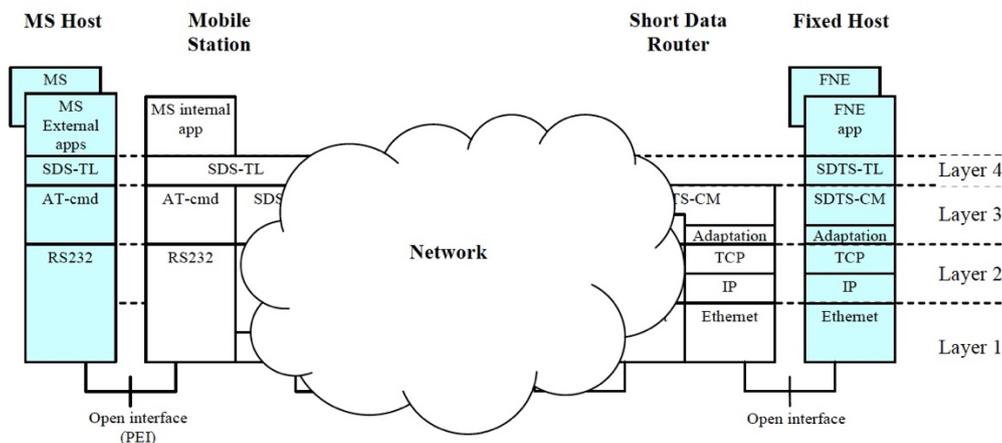


Figura 35: protocolli coinvolti nel servizio SDS [33]

I messaggi vengono trasferiti sfruttando i canali di controllo quindi non richiedono l'assegnazione di specifici canali di traffico comportando un notevole risparmio di risorse rispetto ai servizi di trasferimento dati a commutazione di circuito o di pacchetto.

Ciascun pacchetto SDS possiede un header che contiene i campi [33]:

- Indirizzo sorgente
- Indirizzo destinazione
- Tipo di SDS
- Numero di riferimento del messaggio
- Tipo di applicazione
- Lunghezza del messaggio (solo SDS-4)

Il tipo di applicazione viene indicato tramite un numero denominato Protocol Identifier (PI) che può assumere i valori compresi tra 0 e

255. In particolare, si distinguono due gruppi di applicazioni: quelle che hanno un PI compreso tra 0 e 127 che non necessitano delle funzionalità dello strato di trasporto e quelli con PI compreso tra 128 e 255 che invece sfruttano tali funzionalità. Il protocollo che implementa le funzionalità di trasporto, per quelle applicazioni che ne necessitano, assume il nome di SDS-TL (Short Data Service – Transport Layer) dal lato del terminale mobile e di SDTS-TL (Short Data Service Transport Service – Transport Layer) dal lato dell'infrastruttura fissa [33].

Alcune implementazioni del sistema Tetra supportano la concatenazione di più pacchetti SDS, ad esempio per trasportare messaggi di testo lunghi, in tal caso nell'header dei pacchetti vengono aggiunti due campi che indicano uno il numero totale di messaggi e uno il numero di sequenza del messaggio corrente.

1.3.2.3 Circuit Data Service

Il servizio di trasmissione dati a commutazione di circuito permette di assegnare uno o più canali di traffico in maniera esclusiva per il trasporto di dati tra due terminali. Si tratta di una modalità di trasmissione dati estremamente poco efficiente perché i canali di traffico rimangono assegnati al collegamento tra i due terminali ai quali sono stati assegnati anche quando questi in realtà non stanno trasmettendo nulla, comportando quindi uno spreco di risorse.

Questo servizio, proprio perché risulta poco efficiente, viene utilizzato piuttosto raramente, solo per particolari servizi che richiedono basse latenze e banda di trasmissione garantita, come ad esempio i servizi di videosorveglianza.

Sono possibili vari valori per la bit-rate in base al numero di canali che vengono assegnati per la comunicazione e al livello di protezione scelto per i dati, quindi al tipo di codici scelti per la rilevazione e la correzione degli errori, più è alto il livello di protezione scelto minori sono gli errori sul canale al prezzo però di una minor banda disponibile per la trasmissione.

Time slot utilizzati	1	2	3	4
Bassa Protezione	7,2	14,4	21,6	28,8
Media Protezione	4,8	9,6	14,4	19,2
Alta Protezione	2,4	4,8	7,2	9,6

1.3.2.4 Packet Data Service

Il servizio PDS permette il trasferimento di dati in modalità commutazione di pacchetto tramite l'utilizzo del protocollo IP in maniera pressoché identica a quanto avviene nelle reti LAN o in internet.

Questa modalità di trasmissione dati risulta essere particolarmente efficiente in quanto, a differenza di quanto avviene nel servizio di trasmissione dati a commutazione di circuito, i canali di traffico rimangono assegnati ad una determinata comunicazione solo per il tempo effettivamente necessario per il trasferimento dei dati e ritornano immediatamente disponibili per una nuova assegnazione non appena la trasmissione cessa, in questo modo non si ha nessuno spreco di risorse in quanto esse possono essere utilizzate al pieno delle loro potenzialità.

La trasmissione dei dati a pacchetto sull'interfaccia radio avviene in maniera simile a quanto accade nelle reti cellulari con il sistema GPRS (General Packet Radio Service), in particolare i datagrammi IP vengono incapsulati nelle trame Tetra tramite il protocollo SNDCP (Sub Network Dependent Convergence Protocol) che fa parte della famiglia di protocolli previsti per lo strato di rete dallo standard.

All'interno dell'infrastruttura della rete Tetra per poter fornire il servizio di dati a pacchetto devono essere presenti due router denominati Packet Data Gateway (PDG) e GGSN (Gateway GPRS Support Node) che si interfacciano rispettivamente con le stazioni radiobase e con la rete locale. Come è possibile intuire dal nome il

GGSN svolge la stessa funzione del dispositivo omonimo presente nelle reti cellulari, mentre il PDG svolge la funzione che in tale reti è assegnata al SGSN (Serving GPRS Support Node).

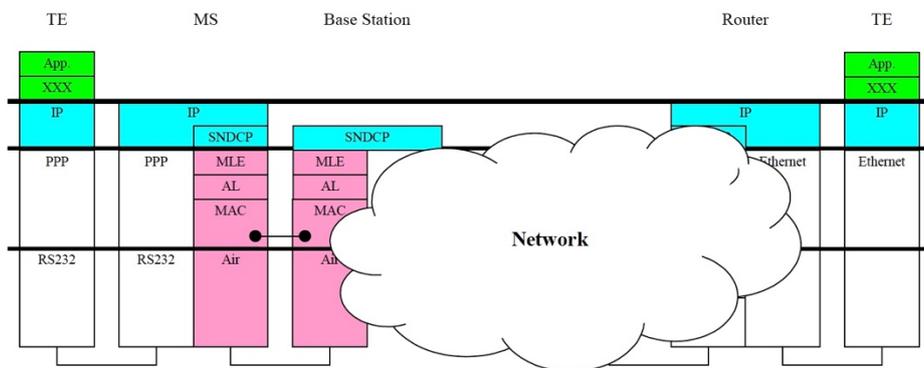


Figura 36: protocolli coinvolti nel servizio dati a pacchetto [32]

L'instradamento dei dati a pacchetto avviene sulla base degli indirizzi IP, quindi ad ogni nodo della rete Tetra che sfrutta questo servizio deve essere assegnata in maniera statica o dinamica un indirizzo IP. L'accesso al servizio dati a pacchetto può avvenire sia dal lato dei terminali mobili tramite un terminale connesso all'interfaccia PEI sia dal lato dell'infrastruttura fissa grazie ad un Border Router che mette in comunicazione la rete Tetra con una rete aziendale esterna e con internet.

Come protocollo di trasporto è possibile utilizzare sia TCP che UDP ma è fortemente consigliato l'utilizzo di quest'ultimo [32]. Il protocollo TCP infatti risulta poco efficiente per l'utilizzo su reti radio dove i ritardi di trasmissione possono essere anche piuttosto elevati e molto variabili nel tempo. Il protocollo TCP innanzitutto, essendo un protocollo di tipo connection-oriented, richiede delle fasi di instaurazione e chiusura delle connessioni che aggiungono un overhead decisamente maggiore dell'UDP che invece opera in modalità connectionless, cosa che potrebbe essere problematica nel caso della rete Tetra dove la banda è molto limitata. Il TCP poi è dotato di un sistema di ritrasmissione basato su di un timeout di trasmissione (RTO) calcolato dinamicamente in base al Round Trip Time (RTT), ma siccome il RTT in una rete radio è altamente variabile potrebbe accadere che il TCP erroneamente possa ritrasmettere pacchetti credendoli perduti quando invece essi non sono ancora arrivati a destinazione a causa di un ritardo aleatorio.

Infine il TCP possiede un sistema di controllo di congestione che serve a rallentare l'invio dei pacchetti quando vede che la rete è congestionata, quindi tende a rallentare la trasmissione quando vede che molti pacchetti vanno persi, nelle reti radio però la perdita dei pacchetti si verifica molto di frequente a causa di momentanee cadute del collegamento, in tali casi il TCP, convinto che le perdite siano dovute alla congestione, inizia a rallentare in modo eccessivo la trasmissione quando ciò non è assolutamente necessario e basterebbe semplicemente ritrasmettere i pacchetti persi.

1.3.3 Servizi supplementari

Oltre ai servizi vocali e di trasferimento dati lo standard Tetra prevede numerosi servizi supplementari che non costituiscono delle modalità di comunicazione a sé stanti ma offrono delle funzionalità complementari ai servizi voce e dati:

- Identificazione del chiamante: i terminali sono in grado di visualizzare l'indicativo del chiamante quando arriva una chiamata.
- Assegnazione dinamica dei numeri di gruppo: gli operatori della centrale operativa possono creare o modificare i gruppi in maniera dinamica.
- Scansione gruppi di conversazione: un terminale che appartiene a più gruppi qualora sia impegnato in una chiamata di gruppo controlla che non arrivino chiamate più prioritarie da parte degli altri gruppi.
- Accodamento chiamate: nel caso non ci siano risorse disponibili per la chiamata il terminale viene messo in coda finché non si liberano le risorse necessarie, le chiamate vengono gestite in base alla loro priorità e, qualora abbiano tutte la stessa priorità, secondo il criterio FIFO.
- Chiamata generale di sito: gli operatori della centrale operativa possono inviare una chiamata broadcast a tutti gli utenti registrati su un determinato sito.

- Accesso successivo a chiamata di gruppo attiva: è possibile l'accesso ad una chiamata di gruppo quando essa è già stata iniziata da parte di terminali facenti parte del gruppo che prima erano spenti o fuori copertura.
- Accodamento se occupato e richiamata: il sistema consente di accodare le chiamate inoltrate ad un terminale qualora questo si trovi già impiegato in una chiamata e di avvisare il chiamante quando il chiamato torna disponibile.
- Priorità di accodamento: il sistema di accodamento assegna alle chiamate una priorità da 2 a 10 (1 sono le chiamate di emergenza), in base alla quale verranno servite. Nel caso di una chiamata di gruppo la priorità è la più alta tra quella del terminale e del gruppo.
- Priorità utente recente: viene assegnata una priorità maggiore agli utenti che hanno utilizzato di recente il servizio, questo avviene perché un utente che stava comunicando e che è incorso in una caduta della comunicazione possa riprendere la comunicazione prima che altri utenti impegnino la rete.
- Controllo radio: è possibile visualizzare se la radio è registrata nel sistema, quale gruppo è selezionato e il sito a cui è registrato.
- Scansione con priorità: è possibile impostare certi gruppi o multi-gruppi come prioritari in modo tale che l'utente riceva la chiamata anche se è già impegnato in una chiamata meno prioritaria.
- Chiamata prioritaria con prelazione: gli utenti, se autorizzati, possono inviare delle chiamate prioritarie alle quali viene assegnato immediatamente un canale di traffico anche quando i canali sono tutti occupati interrompendo altre chiamate meno prioritarie.
- Chiamata prioritaria con prelazione su utente occupato: gli utenti, se autorizzati, possono inviare una chiamata prioritaria ad un utente già impegnato in una chiamata meno prioritaria che viene interrotta.

- Ascolto ambientale: gli operatori della centrale operativa possono attivare il microfono dei terminali mobili in modo da permettere l'ascolto ambientale, ciò avviene senza che l'utente mobile se ne accorga.
- Identificativo di linea esterna: è possibile visualizzare l'identificativo del chiamante di una chiamata telefonica.
- Dual tone multi frequency over dial (DTMF): consente di generare i toni DTMF necessari per poter inviare chiamate verso una linea telefonica esterna.
- Blocco delle chiamate telefoniche in uscita o in ingresso: l'amministratore di rete può impedire chiamate telefoniche provenienti o dirette verso certe numerazioni.
- Assegnazione dinamica dei siti: l'assegnazione dei canali per le chiamate di gruppo avviene in modalità dinamica, l'assegnazione del canale in un certo sito avviene solo se in quel canale ci sono effettivamente utenti del gruppo chiamato
- Siti validi: è possibile definire in quali siti i dispositivi possono effettuare chiamate
- Avvio totale/parziale: nella modalità di avvio totale le risorse radio necessarie vengono assegnate solo quando tutti i partecipanti di una chiamata di gruppo sono disponibili in modo tale che tutti ricevano la chiamata. Nella modalità di avvio parziale l'assegnazione delle risorse avviene immediatamente anche se qualche utente non è disponibile.
- Assegnazione sito critico: è possibile stabilire dei siti che devono essere coinvolti obbligatoriamente in una chiamata di gruppo affinché possa essere instaurata.
- Mobilità: tutti gli apparati sono in grado di effettuare la funzione di handover, cioè possono muoversi da un sito ad un altro senza che la comunicazione venga interrotta. Gli apparati a tale scopo si registrano su un database, la registrazione avviene all'accensione, al cambio cella e al cambio gruppo, la de-registrazione avviene quando l'apparato viene spento o va fuori copertura per lungo tempo.

1.3.4 Numerazione, composizione ed indirizzamento

Affinché sia possibile far comunicare tra di loro vari dispositivi su una rete occorre che essi siano dotati di indirizzi univoci che permettano di identificare quali sono la sorgente e il destinatario di ciascun flusso di informazioni in modo tale da poter instradare in maniera corretta i dati.

È utile a tale proposito dare tre definizioni [15]:

- Indirizzamento (Addressing): consiste nello scambio di informazioni di identità tra terminali al fine di determinare il corretto instradamento dei dati; si basa sull'attribuzione ad ogni terminale di un indirizzo che ne definisca in maniera univoca l'identità.
- Numerazione (Numbering): è la rappresentazione in formato numerico decimale degli indirizzi dei dispositivi in maniera tale da renderli comprensibili ed utilizzabili dagli utenti del servizio.
- Composizione (Dialling): rappresenta l'atto con il quale un utente comunica ad un terminale l'identità del destinatario della comunicazione che intende effettuare.

Tutti i dispositivi Tetra escono di fabbrica con un indirizzo fisico chiamato Tetra Equipment Identity (TEI) che rappresenta in maniera univoca ciascun apparato così come avviene ad esempio nelle reti internet con gli indirizzi MAC. Il TEI è un numero composto da 15 cifre esadecimali divise in 4 campi [50]:

- Type Approval Code (TAC): 6 cifre esadecimali o 24 bit che indicano uno specifico modello di dispositivo.
- Final Assembly Code (FAC): 2 cifre esadecimali o 8 bit che indicano lo stabilimento che ha prodotto il dispositivo.
- Electronic Serial Number (ESN): 6 cifre esadecimali che identificano in maniera univoca lo specifico dispositivo.
- Spare (SPR): 4 bit, cioè una cifra esadecimale, che devono essere tutti posti a zero.

24 bits or 6 hexa digits	8 bits or 2 hexa digits	6 hexa digits	1 hexa digit
Type Approval Code (TAC)	Final Assembly Code (FAC)	Electronic Serial Number (ESN)	Spare (SPR)

Figura 37: formato di un indirizzo TEI [50]

Affinché i dispositivi possano comunicare tra loro all'interno della rete devono essere loro assegnati degli indirizzi da utilizzare per le operazioni di indirizzamento dei dati. Ciascun dispositivo in fase di programmazione riceve una famiglia di indirizzi denominati Tetra Subscriber Identities (TSI) [50]:

- 1 ITSI (Individual-TSI): indirizzo individuale
- 1 ATSI (Alias-TSI): indirizzo alias facoltativo
- N GTSI (Group-TSI): indirizzi dei gruppi di cui il dispositivo fa parte

Inoltre, quando un dispositivo accede come ospite ad una rete che non è la propria riceve anche un V-ATSI (Visiting-ATSI) che gli permette di comunicare in essa.

Gli indirizzi TSI hanno una lunghezza fissa di 48 bit, così come definito dall'ITU-T nella Recommendation E.218, dei quali i primi 24 bit identificano la rete (MNI – Mobile Network ID) e gli ultimi 24 bit indicano il dispositivo (SSI – Short Subscriber ID). Dei 24 bit del MNI i primi 10 poi indicano lo stato in cui si trova la rete (MCC – Mobile Country Code) e i restanti 14 lo specifico operatore di rete (MNC – Mobile Network Code). Questi indirizzi possono essere rappresentati in formato decimale al fine di essere facilmente utilizzabili dagli utenti della rete: il MCC è rappresentato da 3 o 4 cifre decimali, il MNC da 4 o 5 cifre decimali e il SSI da 7 o 8 cifre decimali [52].

10 bits	14 bits	24 bits
Mobile Country Code (MCC)	Mobile Network Code (MNC)	network specific Short Subscriber Identity (SSI)

Figura 38: formato di un indirizzo TSI [50]

Data una certa rete la parte relativa al MNI è fissata mentre il SSI può essere deciso dal gestore della rete, sia per quanto riguarda gli indirizzi individuali che quelli dei gruppi, e può essere uno qualsiasi

dei valori compresi tra 0 e 16777215, tra questi però solitamente vengono utilizzati solo i numeri compresi tra 0 e 999999 per indicare i dispositivi e i gruppi mentre i numeri rimanenti vengono riservati ad utilizzi particolari.

Siccome gli indirizzi risultano particolarmente lunghi potrebbe essere scomodo per un utente che vuole effettuare una chiamata digitare per intero il numero del destinatario perciò sono state definite due tecniche che permettono di velocizzare l'operazione di composizione del numero [15]:

- **Composizione relativa (Relative Dialling):** l'utente digita solamente le ultime cifre del numero da chiamare, come parte iniziale dell'indirizzo vengono utilizzate le prime cifre del TSI del dispositivo da cui viene effettuata la chiamata.
- **Composizione abbreviata (Shortened Dialling):** l'utente digita solamente le ultime cifre del numero da chiamare, le cifre iniziali vengono prese da un TSI predefinito preimpostato nel dispositivo.

Per motivi di gestione l'operatore che gestisce una rete Tetra potrebbe voler assegnare oltre agli indirizzi TSI anche degli indirizzi privati, validi unicamente all'interno della singola rete. Dato che questi indirizzi hanno validità solo all'interno della singola rete gli stessi numeri possono essere riutilizzati senza problemi in reti diverse. Lo standard Tetra prevede due possibili tipi di indirizzi privati:

- **Fleet Specific Short Number (FSSN):** sono indirizzi privati che fanno parte dello stesso spazio di numerazione dei TSI, in particolare si tratta dei numeri compresi tra 15000000 e 15999999.
- **Radio User Number (RUN):** è un numero che identifica lo specifico utente piuttosto che il singolo dispositivo. Quando si sceglie di adottare questo tipo di numerazione ciascun utente prima di poter utilizzare il dispositivo deve digitare il suo identificativo, il quale viene poi mappato dal sistema nel corrispondente TSI dell'apparato che sta utilizzando.

Oltre alle numerazioni specifiche delle reti Tetra i dispositivi possono avere assegnati anche un numero telefonico (rispondente alla normativa ITU-T E.164) qualora siano abilitati ad effettuare chiamate telefoniche e un indirizzo IP qualora siano abilitati al servizio dati a pacchetto, il quale a seconda dei casi può essere assegnato in maniera statica o dinamica.

1.3.5 Sicurezza della rete Tetra

I principali aspetti riguardanti la sicurezza di un sistema di comunicazioni sono comunemente individuati in:

- **Confidenzialità:** i messaggi inviati possono essere letti unicamente dal mittente e dal destinatario ed è impossibile per parti terze intercettarli.
- **Autenticità:** il mittente ed il destinatario sono veramente chi dicono di essere.
- **Integrità:** il messaggio non è stato alterato.
- **Disponibilità:** i servizi offerti dal sistema di comunicazione sono disponibili quando necessari.
- **Non ripudio:** i messaggi non possono essere disconosciuti dal loro mittente una volta che sono stati inviati.

I principali tipi di minacce alla sicurezza che possono avvenire all'interno di una rete Tetra possono essere sintetizzati in [20]:

- **Intercettazione (Eavesdropping):** consiste nella intercettazione delle comunicazioni da parte di un'utenza che non sia il legittimo destinatario di esse.
- **Furto del servizio (Theft of Service):** consiste nell'utilizzo del sistema da parte di utenti non autorizzati. Può avvenire ad esempio quando un estraneo sia venuto in possesso di un apparecchio rubato o anche quando un utente autorizzato provi ad accedere a funzionalità che eccedano quelle che l'amministratore di rete ha autorizzato.
- **Sedicenza (Spoofing):** consiste nel furto dell'identità di un utente autorizzato da parte di un estraneo. Può avvenire ad

esempio quando un estraneo si finge un utente autorizzato utilizzandone le credenziali.

- Manomissione (Tampering): consiste nella manomissione dei dispositivi al fine di trarne informazioni. Ad esempio, un attacco di questo tipo avviene quando un estraneo provi ad estrarre da un dispositivo password o chiavi di cifratura salvate all'interno di esso.
- Rivelazione di Informazioni (Information Disclosure): consiste nella divulgazione di informazioni riservate quali ad esempio password o chiavi di cifratura.
- Negazione del Servizio (Denial of Service): comprende tutte quelle azioni intraprese da un estraneo al fine di mettere deliberatamente fuori servizio il sistema di comunicazione. Attacchi di questo tipo possono essere ad esempio il tentativo di disturbare le trasmissioni radio con un jammer, il sabotaggio fisico dell'infrastruttura oppure tentativi di saturare le capacità della rete con eccessive richieste.

Le principali contromisure previste dallo standard Tetra per difendersi da possibili attacchi alla sicurezza possono essere riassunte in [20]:

- Autenticazione
- Cifratura dell'interfaccia aria
- Cifratura end-to-end
- Disabilitazione dei terminali

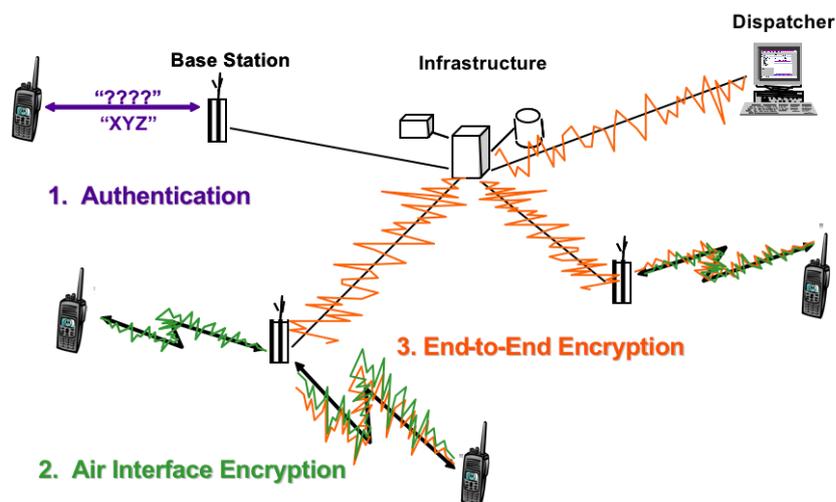


Figura 39: contromisure di sicurezza adottabili in una rete Tetra [20]

Con il termine autenticazione ci si riferisce allo scambio di identità tra i terminali e l'infrastruttura. Ogni volta che un terminale prova ad accedere al servizio l'infrastruttura ne richiede l'autenticazione al fine di verificarne l'identità, facoltativamente anche il terminale può richiedere a sua volta l'autenticazione da parte dell'infrastruttura. La procedura di autenticazione avviene tramite l'utilizzo di chiavi segrete. Per la procedura di autenticazione possono essere adottati vari protocolli per lo scambio delle identità quali ad esempio il PEAP (Protected Extensible Authentication Protocol) e il CHAP (Challenge-Handshake Authentication Protocol). Ulteriori procedure di autenticazione possono essere richieste per accedere a determinati servizi quali ad esempio il servizio dati a pacchetto.

La cifratura dell'interfaccia aria consiste nella cifratura dei dati che transitano sul mezzo radio nella tratta compresa tra il dispositivo mobile e l'infrastruttura. La cifratura protegge sia i dati relativi alla segnalazione che le comunicazioni degli utenti siano esse composte da traffico voce, messaggi di testo o trasmissioni di dati a pacchetto. La cifratura dell'interfaccia aria protegge solo i dati quando viaggiano su mezzo radio quindi essi viaggiano in chiaro all'interno dell'infrastruttura di rete fissa.

Per effettuare la cifratura vengono utilizzate delle chiavi che possono essere statiche, che rimangono quindi uguali per ogni comunicazione, oppure dinamiche, cioè che vengono rinnovate ad ogni trasmissione. Per quanto riguarda la distribuzione delle chiavi di cifratura dei terminali è richiesto il caricamento manuale di una chiave iniziale all'interno dei terminali a partire dalla quale vengono generate le chiavi di cifratura che poi vengono scambiate tra i dispositivi per mezzo di un meccanismo denominato Over The Air Rekeying (OTAR). Lo standard Tetra definisce 4 protocolli di cifratura per l'interfaccia aria (TEA1, TEA2, TEA3 e TEA4), di questi due sono riservati all'utilizzo nei sistemi di comunicazione destinati ad organizzazioni che operano nell'ambito della pubblica sicurezza (TEA2 e TEA3) mentre gli altri sono di libero utilizzo (TEA1 e TEA4).

Lo standard Tetra distingue tre classi a seconda del grado di sicurezza adottato [20].

Classe di sicurezza	Cifratura	Autenticazione
1	nessuna	facoltativa
2	con chiavi statiche	facoltativa
3	con chiavi dinamiche	obbligatoria

La cifratura end-to-end consiste nella cifratura di tutte le comunicazioni lungo tutto il tratto che va dal mittente al destinatario. A differenza che nella cifratura dell'interfaccia aria in questo caso i dati sono protetti non solo nel tratto via radio ma anche quando viaggiano all'interno dell'infrastruttura fissa.

A differenza di quanto avviene per la cifratura dell'interfaccia aria per la cifratura end-to-end lo standard Tetra non indica dei protocolli specifici da adottare ma è possibile scegliere tra numerosi protocolli di cifratura standard universali presenti sul mercato. Molto utilizzati ad esempio sono il protocollo IDEA (International Data Encryption Algorithm) che opera su blocchi di 64 bit e richiede il pagamento di una licenza, e il protocollo AES (Advanced Encryption Standard) che può operare, a seconda della versione (AES-128 o AES-256), su blocchi di 128 o 256 bit e che ha il vantaggio di non necessitare di nessuna licenza.

La funzionalità di disabilitazione dei terminali permette di disabilitare da remoto eventuali dispositivi mobili che siano andati persi o rubati al fine di evitare un possibile utilizzo non autorizzato. È possibile disabilitare i dispositivi in maniera temporanea o definitiva sia sulla base dell'identificativo fisico TEI che sulla base del loro indirizzo TSI.

1.4 Componenti di una rete Tetra

I principali componenti di una rete Tetra consistono in:

- Dispositivi radiomobili

- Stazioni radiobase
- Controllore Centrale
- Posti operatore
- Infrastruttura di rete

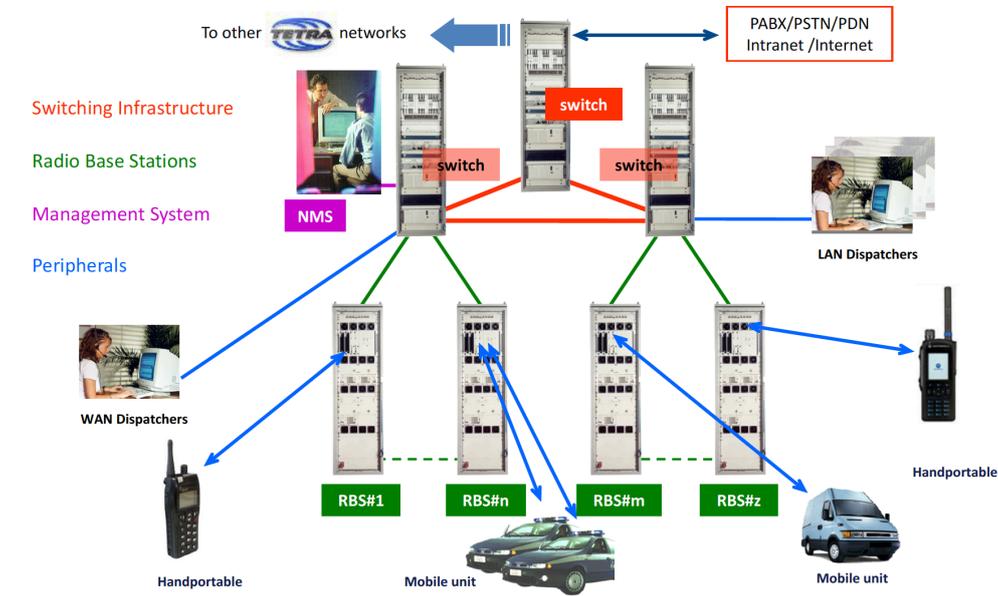


Figura 40: principali componenti di una rete Tetra [25]

1.4.1 Dispositivi radiomobili

I dispositivi radiomobili sono tutti i terminali che permettono agli utenti di un sistema Tetra di poter usufruire dei servizi di comunicazione da esso offerti. Questi dispositivi tipicamente comprendono un microfono e un altoparlante per poter effettuare le chiamate vocali ed inoltre un display e una tastiera che costituiscono un'interfaccia tra l'utente e il sistema (MMI – Man Machine Interface).

I dispositivi mobili Tetra si distinguono sostanzialmente in due categorie:

- Dispositivi portatili (o palmari): si tratta di dispositivi di ridotte dimensioni che come i normali telefoni cellulari possono essere utilizzati dagli utenti tenendoli in mano; sono tipicamente alimentati da una batteria ricaricabile e comunicano tramite un'antenna che è integrata nel dispositivo stesso. A causa dei limiti di potenza imposti dalla batteria, dalle ridotte dimensioni del dispositivo e dal basso guadagno

dell'antenna integrata tipicamente questi terminali sono caratterizzati da potenza e prestazioni limitate.

- Dispositivi veicolari: si tratta di terminali radio installati in maniera fissa all'interno di un veicolo, non possiedono batteria ma vengono alimentati direttamente dalla batteria del mezzo e comunicano tramite un'antenna esterna posta tipicamente sul tetto del veicolo. Questi dispositivi non avendo limitazioni imposte dalle batterie e potendo tipicamente contare su antenne aventi un maggiore guadagno, tipicamente sono caratterizzati da potenze e prestazioni superiori ai dispositivi portatili.

A seconda del livello di potenza i dispositivi mobili Tetra vengono distinti in 5 classi (più 4 intermedie) numerate da 1 a 5 con potenze che vanno dai 30W della classe 1 ai 0,3 della 5.

Power class	Max. power level			Power class	Max. power level		
1	30.0 W	45.0 dBm	V+D only	3L	1.8 W	32.5 dBm	
1L	17.5 W	42.5 dBm		4	1.0 W	30.0 dBm	
2	10.0 W	40.0 dBm		4L	0.56 W	27.5 dBm	
2L	5.6 W	37.5 dBm		5	0.3 W	25.0 dBm	DMO
3	3.0 W	35.0 dBm					

Figura 41: classificazione dei dispositivi mobili in base alla potenza

Lo standard inoltre determina dei valori minimi per la sensibilità dei dispositivi mobili: -112 dBm in condizioni statiche e -103 dBm in condizioni dinamiche.

In Italia il gestore di una rete Tetra deve comunicare al Ministero dello Sviluppo Economico il numero di serie di ogni dispositivo radiomobile che viene immesso all'interno della rete.

1.4.2 Stazioni radiobase

Le stazioni radiobase sono quelle infrastrutture fisse dotate di antenne che forniscono copertura radio ai terminali posti all'interno di una certa area.

Lo standard Tetra differenzia le stazioni radiomobili in diverse 4 diverse classi a seconda della potenza massima irradiata che può andare da 1 a 30 W. Le stazioni però non irradiano sempre la massima

potenza ma sono dotate di un sistema di controllo di potenza che determina momento per momento il livello di potenza ideale.

Power step	Power class 1 (30 W)	Power class 2 (10 W)	Power class 3 (3 W)	Power class 4 (1 W)
1 (45 dBm)	45 dBm \pm 2 dB	40 dBm \pm 2 dB	35 dBm \pm 2 dB	30 dBm \pm 2 dB
2 (40 dBm)	40 dBm \pm 2.5 dB	40 dBm \pm 2 dB	35 dBm \pm 2 dB	30 dBm \pm 2 dB
3 (35 dBm)	35 dBm \pm 2.5 dB	35 dBm \pm 2.5 dB	35 dBm \pm 2 dB	30 dBm \pm 2 dB
4 (30 dBm)	30 dBm \pm 2.5 dB	30 dBm \pm 2.5 dB	30 dBm \pm 2.5 dB	30 dBm \pm 2 dB
5 (25 dBm)	25 dBm \pm 2.5 dB	25 dBm \pm 2.5 dB	25 dBm \pm 2.5 dB	25 dBm \pm 2.5 dB
6 (20 dBm)	20 dBm \pm 2.5 dB	20 dBm \pm 2.5 dB	20 dBm \pm 2.5 dB	20 dBm \pm 2.5 dB
7 (15 dBm)	15 dBm \pm 2.5 dB	15 dBm \pm 2.5 dB	15 dBm \pm 2.5 dB	15 dBm \pm 2.5 dB

Figura 42: classificazione delle stazioni radiobase in base alla potenza

I valori minimi di sensibilità imposti dallo standard sono di -115 dBm in condizioni statiche e di -106 dBm in condizioni dinamiche.

I componenti essenziali di una stazione radiobase sono:

- Antenne: possono essere a seconda dei casi antenne omnidirezionali o antenne direttive. È possibile utilizzare per la trasmissione e per la ricezione antenne diverse oppure una unica antenna tramite l'utilizzo di un duplexer. Al fine di migliorare le prestazioni del sistema è possibile adottare tecniche di diversità che utilizzano più antenne.
- Controllore di sito: si occupa di assegnare i canali di comunicazioni ai vari dispositivi connessi alla stazione in base a quanto deciso del controllore centrale.
- Ricetrasmittitori radio: si occupano di convertire i segnali in banda base provenienti dell'infrastruttura in segnali a radiofrequenza atti ad essere trasmessi via radio ai terminali, e in maniera simmetrica di convertire i segnali a radiofrequenza ricevuti in segnali in banda base.
- Sistema di combinazione a radiofrequenza: si occupa sia di combinare i segnali a radiofrequenza provenienti da vari ricetrasmittitori radio per poterli inviare su una singola antenna in trasmissione e parallelamente permette di combinare i segnali provenienti da più antenne in ricezione in un segnale unico da inviare ai ricetrasmittitori radio.
- Unità di alimentazione: fornisce l'alimentazione alla stazione radiobase convertendo la tensione proveniente dalla rete

elettrica ad un valore adatto ad alimentare gli apparati, solitamente è presente anche una batteria tampone che permette di mantenere gli apparati in funzione in caso di ammanchi di corrente dalla rete.

Come già anticipato molto spesso in ricezione si utilizzano antenne multiple che permettono di adottare delle tecniche di diversità. Queste tecniche si basano sul presupposto che i segnali possono arrivare al ricevitore tramite diversi cammini ciascuno dei quali ha caratteristiche differenti, perciò al ricevitore dello stesso segnale arrivano tante copie ognuna delle quali è contraddistinta da un diverso rapporto segnale-rumore (SNR). Combinando in maniera opportuna le varie copie dello stesso segnale ricevute è possibile ottenere un guadagno aggiuntivo detto guadagno di diversità. Le principali tecniche di diversità che possono essere adottate sono:

- Selection Combining: consiste semplicemente nel selezionare la copia del segnale che ha il miglior rapporto segnale rumore.
- Equal Gain Combining: consiste nel sommare le varie copie del segnale tutte con lo stesso peso, l'SNR risultante è la media tra quelli delle varie copie.
- Maximum Ratio Combining: consiste nel sommare le varie copie dei segnali con dei pesi che dipendono dal loro SNR, l'SNR risultante è dato dalla somma degli SNR delle varie copie.

Negli ultimi due casi siccome le varie copie del segnale potrebbero essere sfasate tra di loro occorre anche un'operazione di rifasamento.

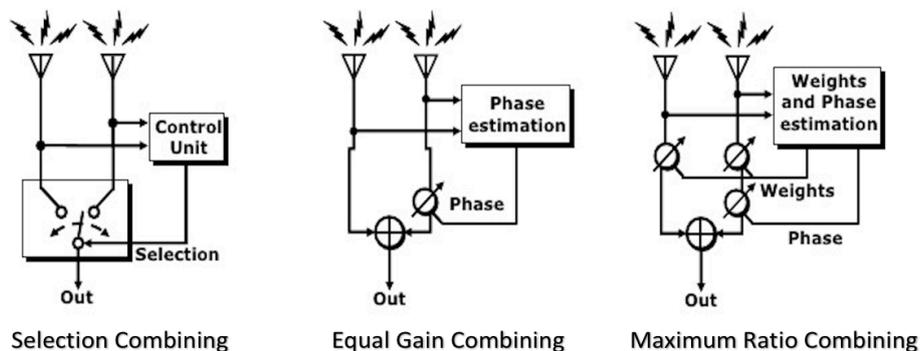


Figura 43: possibili tecniche di diversità

1.4.3 Controllore centrale

Il controllore centrale è il fulcro principale della rete Tetra. Si occupa di coordinare i vari componenti della rete e gestisce l'assegnazione delle risorse agli utenti della rete.

L'implementazione del controllore centrale non è standardizzata ma dipende dalle scelte dei vari costruttori e dalle funzionalità che si intendono implementare.

Il controllore centrale può comprendere una grande varietà di apparati, che possono essere raggruppati in sottosistemi ciascuno dei quali si occupa di una determinata funzione, ad esempio ci possono essere sottosistemi che si occupano delle chiamate vocali, del servizio dati a pacchetto, dell'autenticazione, della cifratura, eccetera.

1.4.4 Posti operatore

I posti operatore sono le postazioni dalle quali gli operatori possono gestire le varie funzionalità della rete Tetra.

Ci possono essere postazioni operatore di tipo tradizionale che sono in pratica dei terminali radio fissi con alcune funzionalità in più o anche posti operatore di tipo evoluto che sono dei veri e propri computer con appositi software che permettono di gestire in maniera dettagliata ogni aspetto della configurazione della rete.

L'interfaccia verso i posti operatore non è standardizzata quindi è realizzata a discrezione del costruttore.

1.4.5 Infrastruttura di rete

L'infrastruttura di rete comprende tutti i collegamenti tra i vari dispositivi presenti all'interno della rete fissa Tetra, quali il controllore centrale, le stazioni radiobase e i posti operatore.

L'implementazione specifica dei collegamenti di rete è a discrezione del costruttore non essendo standardizzata.

L'infrastruttura di rete può essere realizzata tramite tecnologie di tipo tradizionale basate su di un funzionamento a commutazione di circuito oppure grazie ad una tecnologia più innovativa, denominata Tetra over IP che sfrutta collegamenti TCP/IP e si basa sulla commutazione di pacchetto.

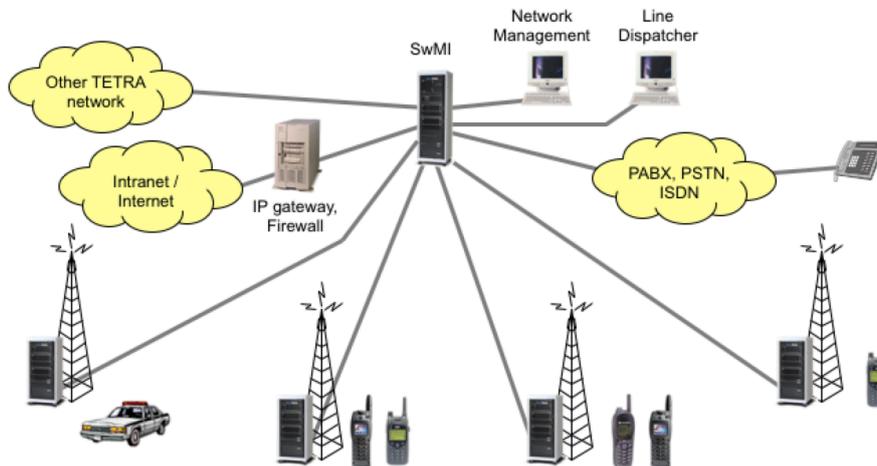


Figura 44: infrastruttura di rete Tetra di tipo tradizionale [17]

1.4.6 Tetra-over-IP

Con Tetra-over-IP si indica una tecnologia per la realizzazione dell'infrastruttura di rete Tetra basata sul protocollo IP e sulla commutazione di pacchetto. In una rete Tetra realizzata con questa tecnologia tutte le comunicazioni che viaggiano sulla rete, siano esse chiamate vocali, trasmissioni dati o informazioni di segnalazione, vengono trasportate tramite pacchetti IP [17].

A differenza delle reti tradizionali a commutazione di circuito che sono organizzate in maniera gerarchica con un nodo di commutazione principale e vari altri nodi secondari, le reti IP sono reti di tipo flat dove tutti i nodi si trovano allo stesso livello e sono indipendenti uno dall'altro.

I vari collegamenti tra i nodi della rete possono essere realizzati teoricamente con qualsiasi tecnologia in grado di trasportare pacchetti IP, sia via cavo che via radio, sia sfruttando reti locali (LAN) che geografiche (WAN), occorre però che vengano garantiti dei requisiti in termini di latenza e larghezza di banda tali da garantire una qualità soddisfacente per le comunicazioni, in modo particolare per le chiamate vocali.

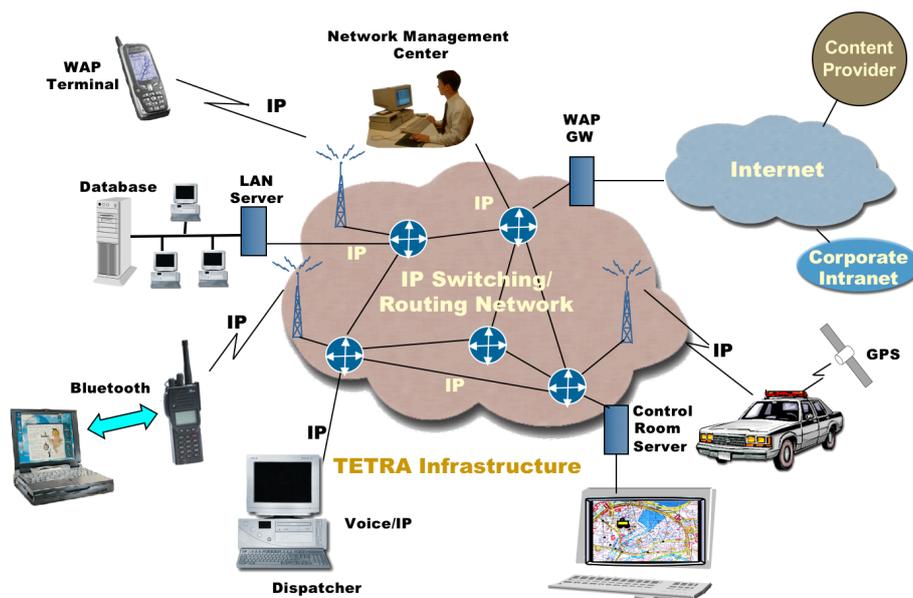


Figura 45: infrastruttura di tipo Tetra-over-IP [9]

La tecnologia Tetra-over-IP offre numerosi vantaggi rispetto alle tecnologie tradizionali:

- Chiamate vocali, dati e segnalazione possono essere trasportati facilmente sulla stessa rete.
- Possibilità di utilizzare apparati commerciali per realizzare i nodi della rete.
- Possibilità di realizzare facilmente varie topologie di rete.
- Risulta più facile gestire collegamenti multipli per garantire ridondanza e ripartizione del traffico.
- Facilità di espansione della rete.
- Facilità di connessione con altre reti esterne.

D'altra parte, però bisogna tener conto di alcuni possibili aspetti negativi:

- Maggior occupazione di banda a causa dell'overhead introdotto dal protocollo IP.
- Ritardi dovuti all'accodamento dei pacchetti nei nodi della rete.
- Possibilità che alcuni pacchetti vadano persi o che arrivino fuori sequenza causando errori.

Inoltre, bisogna tener conto che sebbene per realizzare i nodi in teoria potrebbe essere utilizzato qualsiasi tipo di apparato in grado di gestire pacchetti IP in realtà per garantire livelli soddisfacenti di

prestazioni e affidabilità occorre utilizzare apparati di tipo professionale che potrebbero avere costi elevati. Potrebbe poi essere necessario implementare dei meccanismi di priorità che permettano di garantire il soddisfacimento dei requisiti temporali che possono avere certi tipi di comunicazioni come le chiamate vocali.

1.4.7 Multicast Routing

I tradizionali router delle reti IP funzionano in modalità unicast cioè instradano dei pacchetti provenienti da un mittente e diretti ad un unico destinatario caratterizzato da uno specifico indirizzo IP. Questa modalità di funzionamento è adatta per comunicazioni private punto-punto ma risulta poco efficiente per quanto riguarda le comunicazioni di gruppo, infatti qualora un mittente voglia inviare lo stesso messaggio non ad un unico destinatario ma ad un gruppo, occorre che esso invii tante copie identiche del messaggio ciascuna per ogni membro del gruppo.

Un router multicast invece è un dispositivo che è in grado di ricevere un messaggio da un mittente e inviarlo a molteplici destinatari facenti parte di un gruppo semplicemente effettuando tante copie del messaggio quanti sono i destinatari [34]. Questa modalità di funzionamento risulta particolarmente efficiente per quanto riguarda le comunicazioni di gruppo, infatti quando un mittente vuole inviare lo stesso messaggio ad un gruppo basta che invii un singolo messaggio sulla rete, ci sarà poi un router multicast che si occuperà di effettuare delle copie del messaggio da inviare a tutti i destinatari.

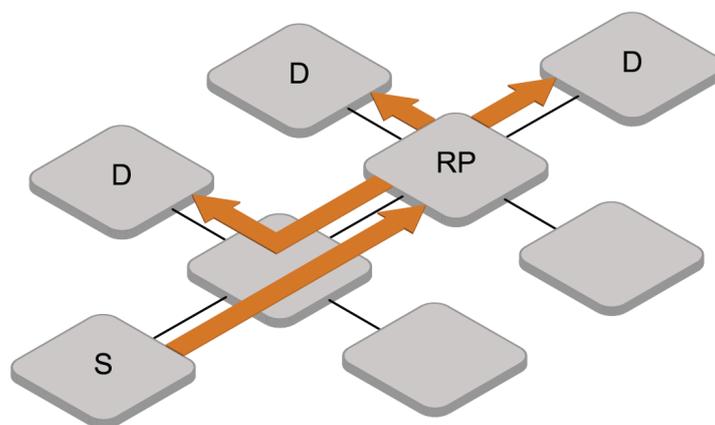


Figura 46: multicast routing [34]

Il multicast all'interno delle reti IP è reso possibile dal protocollo IGMP (Internet Group Management Protocol). In una rete IP multicast gli utenti che vogliono fare parte di un gruppo inviano un messaggio tramite il protocollo IGMP al router multicast al quale afferiscono, che prende il nome di Rendezvous Point (RP). Il RP si costruisce, grazie alle informazioni raccolte, un multicast-tree grazie al quale ogni volta che riceve un messaggio destinato ad un gruppo capisce a quali utenti deve inoltrarne una copia. Ad ogni gruppo viene assegnato un indirizzo IP che viene scelto all'interno di uno specifico intervallo di indirizzi detti di classe D, che sono quelli compresi tra 224.0.0.0 e 139.255.255.255 e che sono riservati specificatamente per le comunicazioni di tipo multicast.

1.5 Pianificazione in un sistema Tetra

Per quanto riguarda la pianificazione il sistema Tetra risulta equivalente ad un sistema cellulare tradizionale a canali limitati nel quale l'area di copertura del servizio risulta divisa in celle con un dato raggio, a ciascuna delle quali sono assegnati un certo numero di canali, che sono raggruppate in gruppi detti cluster, all'interno di ciascuno dei quali vengono utilizzati tutti i canali disponibili. I canali utilizzati all'interno di un cluster possono essere riutilizzati in un altro purché in celle che non siano attigue e che distino tra di loro più di una certa distanza detta distanza di riuso, questo è possibile grazie al cosiddetto filtraggio spaziale cioè all'attenuazione dei segnali radio con la distanza dalla sorgente.



Figura 47: ripartizione dell'area di servizio in celle e cluster

La pianificazione in una rete cellulare a canali limitati si sviluppa sostanzialmente in due passaggi [44]:

- Pianificazione in base alla copertura
- Pianificazione in base all'interferenza

Il primo passo di pianificazione in base alla copertura consiste sostanzialmente nel determinare la massima estensione delle celle tale da garantire che all'interno di ciascuna di esse la potenza ricevuta da un ipotetico ricevitore posto in un punto qualunque della cella sia maggiore di un dato valore di sensibilità che rappresenta il livello minimo di potenza necessario per garantire una determinata qualità della comunicazione in termini di rapporto segnale-rumore.

L'estensione massima delle celle viene determinata tramite una procedura denominata bilancio di tratta che permette di calcolare il raggio massimo della stessa a partire dalle caratteristiche del ricevitore, del trasmettitore e del mezzo radio. Il calcolo deve essere ripetuto sia per la tratta in uplink che per la tratta in downlink e tra i due risultati bisogna considerare il caso peggiore che solitamente risulta essere quello dell'uplink a causa delle ridotte potenze dei dispositivi mobili. Bisogna inoltre tenere conto del fatto che la copertura radio è soggetta a delle fluttuazioni aleatorie (fading) dovute alla presenza di ostacoli lungo la tratta (fading lento o shadowing) e alla presenza di cammini multipli (fading rapido o multipath fading) che devono essere tenute in conto tramite dei margini aggiuntivi; la copertura radio risulta quindi definita in termini non deterministici ma statistici. Solitamente per semplicità si usa tenere conto in maniera statistica solo del fading lento perché ha un effetto più rilevante, mentre per il fading rapido, i cui effetti possono essere efficacemente ridotti adottando opportune tecniche di codifica e di diversità in ricezione, si usa considerare un margine fisso.

Per effettuare il bilanciamento di tratta conviene porsi nella condizione peggiore, cioè a bordo cella, in tal caso la potenza in dB ricevuta da un ricevitore, che dipende dalla potenza del trasmettitore, dai guadagni delle antenne e dall'attenuazione subita lungo la tratta radio, è data dalla formula [44]:

$$P_R = P_{sens} = P_T + G_T + G_R - L_{TOT} [dB]$$

L'attenuazione totale L_{TOT} può a sua volta essere scomposta in una componente media più un margine di fading che deve essere determinato in maniera statistica, oltre ad eventuali margini opzionali che possono essere aggiunti per tener conto del fading rapido e per delle perdite introdotte dai cavi di alimentazione:

$$L_{TOT} = \bar{L} + M_F (+L_c + M_i)$$

La componente media dell'attenuazione \bar{L} può essere espressa con una formula del tipo Hata-Like, nella quale compaiono un primo termine che è l'attenuazione di spazio libero, che varia con la frequenza, e un secondo che dipende dalla distanza tramite un fattore α :

$$\bar{L}(R) = L_0 + 10\alpha \log R$$

In particolare, l'ETSI consiglia l'utilizzo di due possibili formule di tipo Hata-like, una per il calcolo della copertura in ambito urbano dove sono presenti potenzialmente molti ostacoli e una per il calcolo in ambito rurale, dove gli ostacoli sono in media in numero minore [45].

Per calcolare il margine di fading lento si considera l'attenuazione L come una variabile aleatoria gaussiana a valor medio \bar{L} e deviazione standard σ , la cui densità di probabilità è espressa da [44]:

$$p_L(L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(L-\bar{L})^2}{2\sigma^2}}$$

Quindi la probabilità che ad una data distanza R la potenza sia maggiore della sensibilità (Location Probability) è data da:

$$P_C(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^L e^{-\frac{(L-\bar{L})^2}{2\sigma^2}} dx = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{M_f}{\sqrt{2}\sigma}\right)$$

Invertendo quest'ultima formula si ricava il valore M_f da utilizzare per il margine di fading tale da garantire la copertura con una data probabilità P_C .

Il fatto che all'interno di cluster diversi si riutilizzino le stesse frequenze fa sì che ci possano essere interferenze tra celle che utilizzano gli stessi canali, tale interferenze sono tanto minori tanto

più le celle co-canale sono distanti tra loro, quindi tanto più è grande la dimensione dei cluster (cluster-size).

Nel secondo passo di pianificazione in base all'interferenza si calcola la dimensione minima per il cluster-size tale da garantire che il rapporto tra il segnale utile e il segnale interferente (Signal-to-Interference – SIR) sia superiore ad un dato valore di soglia [44].

Per poter effettuare il calcolo in maniera agevole si introducono alcune ipotesi semplificative: innanzitutto si ipotizza che le celle siano di forma esagonale e abbiano tutte la stessa dimensione (e quindi lo stesso raggio R), si considerano solo le interferenze dovute alle celle della prima cerchia (che distano D da quella che si sta considerando), si ipotizza che i mobili abbiano tutti la stessa potenza e si trovino al centro delle rispettive celle e infine si assume che il territorio sia ad attenuazione uniforme di tipo Hata-like. Sotto queste ipotesi il segnale interferente può essere espresso come:

$$C = \frac{P_{MS}}{L(r)} = \frac{P_{MS}}{L(r_0)} \left(\frac{r_0}{R}\right)^\alpha$$

E il segnale interferente:

$$I = \frac{6P_{MS}}{L(r_0)} \left(\frac{r_0}{D}\right)^\alpha$$

Per cui si ricava che il rapporto tra segnale utile ed interferente vale:

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{6} \left(\frac{D}{R}\right)^\alpha$$

E siccome vale la seguente relazione tra il cluster size m e il rapporto D/R :

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3m}$$

Si può anche scrivere:

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{6} (3m)^{\alpha/2}$$

Da cui si ricava il valore minimo del cluster-size dato un certo valore C/I desiderato:

$$m = \frac{1}{3} \left(6 \frac{C}{I}\right)^{2/\alpha}$$

Assumendo $\alpha = 4$ si ottiene:

$$m = \sqrt{\frac{2C}{3I}}$$

Per il Tetra si assume soddisfacente un valore del SIR di 19 dB da cui si ricava un valore minimo del cluster-size pari a 7, invece nel GSM in cui si considera un valore del SIR di 9 dB è sufficiente un cluster-size pari a 3.

Questo metodo di effettuare la pianificazione tramite calcoli analitici ha il pregio di essere molto semplice e veloce però necessita di effettuare numerose semplificazioni che possono portare a risultati che non rispecchiano perfettamente la situazione reale in cui le celle non sono tutte esattamente identiche ma possono avere caratteristiche anche molto diverse tra di loro.

Per effettuare una pianificazione che rispecchi in maniera più dettagliata la situazione reale spesso si ricorre a software di pianificazione automatica che a partire dai dati presenti in un database geografico tramite degli algoritmi di ottimizzazione euristici permettono di determinare in maniera ottima la posizione dei siti e lo schema di assegnazione da adottare per le frequenze, tenendo conto anche del traffico previsto per il sistema.

Per quanto riguarda l'assegnazione automatica delle frequenze esistono due possibili scelte progettuali:

- Pianificazione a banda fissa: il numero di frequenze da assegnare al servizio è fissato a priori e il software le assegna tutte in maniera tale da ottenere le migliori prestazioni possibili in termini di SIR.
- Pianificazione a banda non fissa: il numero di frequenze da assegnare al servizio non è stabilito a priori, il software determina il minimo numero di portanti necessario a garantire il valore di qualità minimo imposto in termini di SIR.

1.6 TETRA Release 2

Nel 2005 dopo alcuni anni di lavoro, grazie al lavoro dell'ETSI, della Tetra MoU (ora TCCA) e dei vari produttori di apparati Tetra, è stata rilasciata la Release 2 dello standard Tetra, meglio nota come TEDS

(Tetra Enhanced Data Service) che ha lo scopo di introdurre nuove funzionalità che migliorando la tecnologia permettendo di superare alcuni dei limiti della prima versione [12].

La prima novità riguarda l'estensione della copertura nella modalità TMO, prima limitata a 58 km e ora estesa fino a 83 km, ottenuta grazie alla riprogettazione della struttura interna dei burst.

Vengono poi introdotti nuove tecnologie per la codifica delle chiamate vocali, oltre alla codifica ACELP prevista dalla prima versione dello standard, risulta possibile utilizzare anche i codec AMR (Adaptive Multi Rate) e MELPe (Mixed Excitation Linear Predictive), quali permettono di ridurre la bit-rate delle trasmissioni vocali rendendole quindi più efficienti.

La nuova versione dello standard introduce anche la possibilità di utilizzare uno schema di modulazione adattativo che permette di scegliere il tipo di modulazione più adatta in base alla situazione. Le modulazioni che sono permesse sono:

- $\pi/4$ DQPSK: per i canali di controllo
- $\pi/8$ DQPSK: utilizzata durante le fasi di migrazione
- 4 QAM: ai limiti della zona di copertura
- 16 QAM: per velocità di trasmissione moderate
- 64 QAM: per velocità di trasmissione elevate

Infine, viene introdotta la possibilità di utilizzare per i canali bande di frequenza più ampie al fine di aumentare la velocità delle trasmissioni dati e poter utilizzare il sistema per applicazioni più impegnative quali a trasmissione video. Sono previste bande di frequenza di 25, 50, 100, 150 KHz a seconda della velocità di trasmissione dati necessaria.

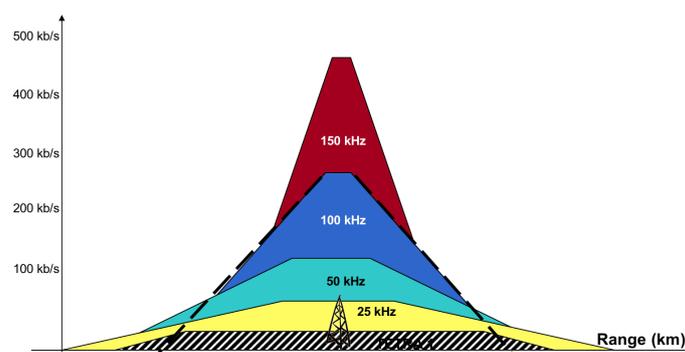


Figura 48: possibili bande per il Tetra release 2 [12]

Capitolo 2: La rete Tetra di TPER

2.1 La rete TETRA di Tper

Nel 2007 l'allora ATC di Bologna bandisce una gara d'appalto per la progettazione e realizzazione di un'infrastruttura radio digitale privata che copra tutta l'area urbana di Bologna e i comuni limitrofi di Casalecchio e di San Lazzaro di Savena, con lo scopo di sostituire il precedente sistema radio analogico MPT1327 diventato ormai obsoleto. Il sistema deve essere in grado di offrire servizi di comunicazione sia voce che dati a circa 600 terminali veicolari da installare in altrettanti autobus urbani e suburbani che circolano nell'area urbana di Bologna e nelle immediate vicinanze oltre che a circa 60 terminali portatili destinati ad essere utilizzati dagli operatori sul campo quali i verificatori di titoli di viaggio (VTV) e gli addetti all'esercizio (AE), cioè i responsabili del controllo della regolarità del servizio pubblico di linea. Il sistema deve potersi interfacciare con i computer di bordo già installati a bordo degli autobus e con il sistema di monitoraggio della flotta già attivo presso l'azienda. Deve essere inoltre previsto un sistema automatico che sugli autobus sia in grado di commutare in automatico dal sistema radio privato ad una connessione cellulare GSM/GPRS in modo tale da garantire la continuità delle comunicazioni anche quando i mezzi escono dal raggio di copertura del sistema. Non è prevista invece l'installazione della radio veicolare Tetra sui mezzi extraurbani sui quali le comunicazioni avvengono unicamente via rete cellulare GSM/GPRS in quanto operando su linee periferiche si trovano quasi sempre fuori dal raggio previsto per la rete radio privata. Si richiede poi che il sistema preveda una centrale di controllo e gestione sita presso la sede dell'ATC in via Di Saliceto a Bologna e che la copertura sia garantita tramite tre stazioni radiobase da collocare in opportuni siti da determinarsi [55].

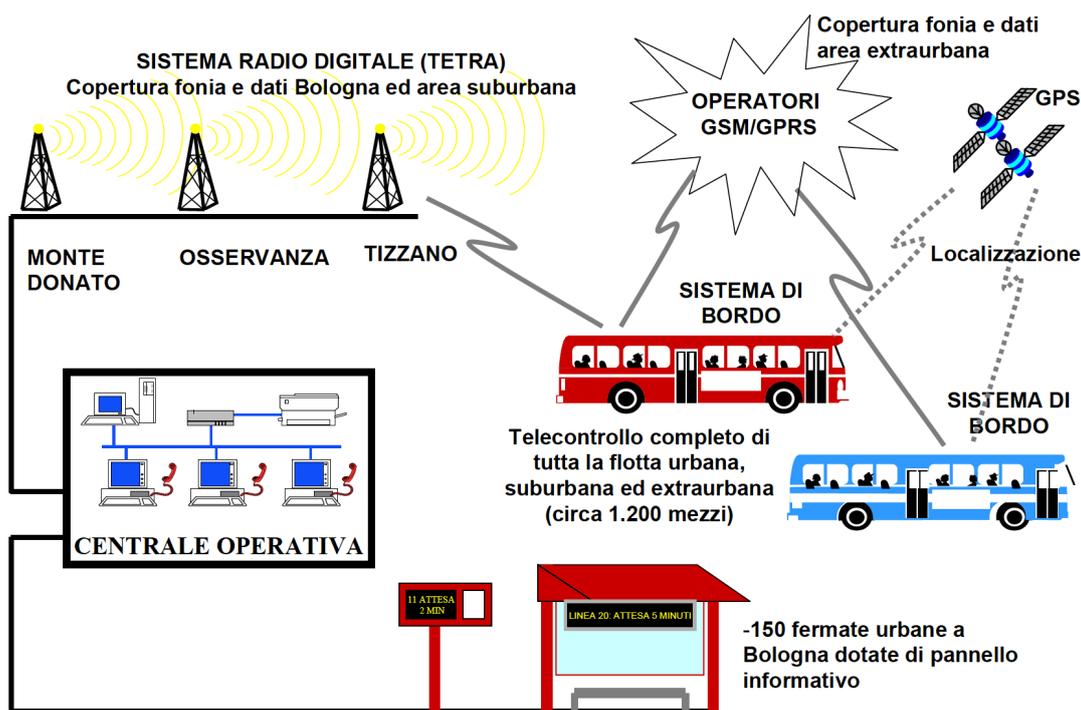


Figura 49: rete Tetra di Tper e interfaccia con il sistema di telecontrollo [35]

La gara è stata vinta da un'associazione temporanea di imprese (ATI) guidata da Motorola, azienda leader nel campo delle comunicazioni radio, e comprendente le società Eurocom s.n.c. e Saitel s.r.l., aziende operanti nel mondo delle telecomunicazioni e concessionarie autorizzate di Motorola rispettivamente per il centro e nord Italia, la quale propone l'installazione di un sistema radio in tecnologia Tetra realizzato con la moderna tecnologia Motorola Dimetra IP Compact nella sua versione più completa [55].

Il sistema Tetra viene installato e messo in servizio nel corso del 2008, nel frattempo Motorola vince anche la gara indetta da ATC per la fornitura di 650 terminali veicolari e 50 terminali portatili.

La centrale di controllo del sistema trova collocazione come previsto presso la sede di ATC all'interno della stessa saletta che ospita gli apparati del sistema di telecontrollo, le tre stazioni radiobase invece vengono collocate sui colli bolognesi nelle località di Monte Donato, Colle Osservanza e Tizzano e sono dotate di ricetrasmittitori in grado di erogare fino a 10W di potenza. Il collegamento tra le stazioni radiobase e la centrale di controllo viene realizzato tramite linee telefoniche di tipo CDN (Circuito Diretto Numerico) noleggiate da Telecom Italia.

2.1.1 Pianificazione della rete Tetra di TPER

La pianificazione della rete Tetra di TPER è stata realizzata da Motorola in maniera automatizzata tramite l'utilizzo del software Motorola Netplan che è in grado di svolgere tutte le funzioni necessarie per la corretta progettazione di una rete radiomobile [55]:

- **Calcolo della propagazione:** il software Netplan è in grado di modellare i fenomeni di propagazione elettromagnetica in una determinata area di territorio sulla base dei dati contenuti all'interno di un database geografico come elevazione, presenza di ostacoli (clutter) e posizione delle stazioni radiobase e di dati tecnologici quali le caratteristiche delle antenne, le frequenze assegnate al servizio e la tipologia di tecnologia utilizzata. I risultati sono costituiti da mappe di copertura che indicano con vari colori il valore della potenza del segnale ricevuto in ogni punto dell'area di copertura del servizio, in modo tale da poter facilmente valutare le prestazioni del sistema.
- **Analisi del traffico:** il software è in grado di dimensionare correttamente il sistema sulla base del traffico previsto assegnando le risorse necessarie per garantire un determinato livello di servizio.
- **Pianificazione frequenziale:** il software permette di realizzare in maniera automatizzata un piano frequenziale che indica come devono essere assegnate le frequenze alle varie stazioni radiobase al fine di garantire il rispetto dei requisiti imposti dalla tecnologia e dal livello di servizio desiderato.
- **Generazione della lista delle adiacenze:** il software è in grado di indicare punto per punto in base alle caratteristiche del sistema radio quali celle siano le migliori candidate per effettuare l'operazione di handover.

Le informazioni geografiche utilizzate da Motorola per la pianificazione sono costituite da una serie di dati geografici vettoriali che rappresentano la città di Bologna e le zone limitrofe e da un

database geografico con una risoluzione di 25x25 metri che contiene due tipologie di informazioni:

- Altimetria: per ogni pixel è fornito un valore dell'altezza media del terreno sul livello del mare.
- Clutter: per ogni pixel è fornito un valore che identifica la classe morfologica del terreno a cui esso appartiene. Ad ogni valore è associata un'altezza virtuale degli ostacoli presenti all'interno del pixel della quale bisogna tenere conto nel calcolo della propagazione.

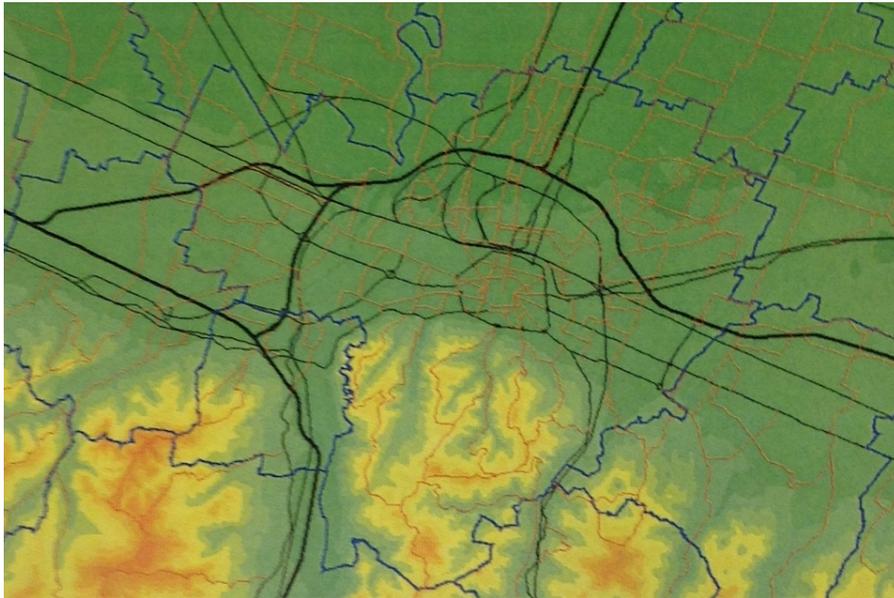


Figura 50: altimetria dell'area urbana di Bologna [55]

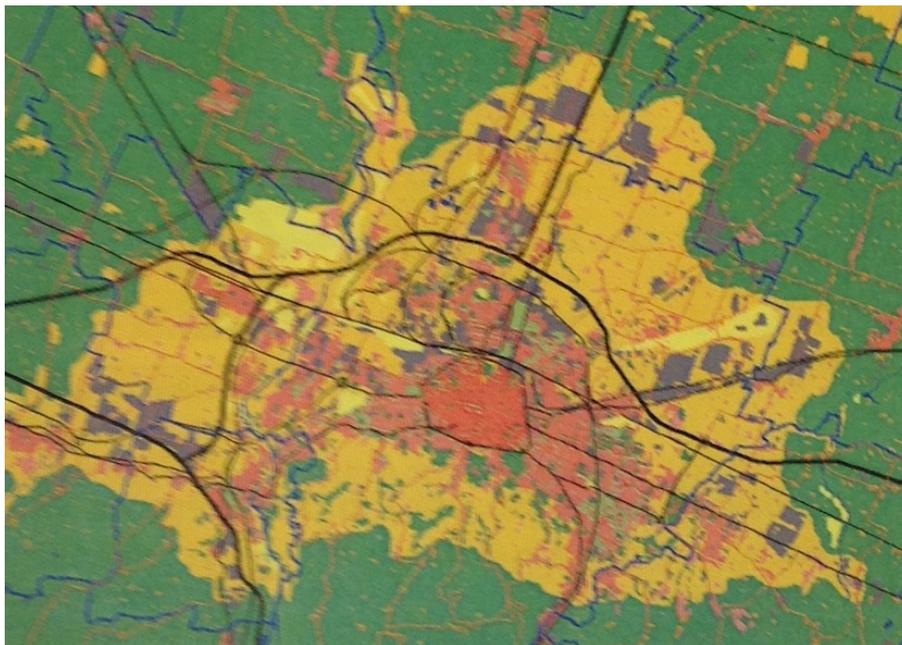


Figura 51: classi di clutter nell'area urbana di Bologna [55]

Lo strumento fondamentale su cui si basa il dimensionamento di un sistema di comunicazione radiomobile però rimane sempre il bilancio di tratta che permette di calcolare, date le potenze degli apparati, i guadagni delle antenne, la frequenza utilizzata e le caratteristiche del mezzo, l'estensione massima del raggio delle celle tale da permettere di soddisfare i requisiti e di conseguenza il numero approssimato di celle richieste per servire tutta l'area di copertura desiderata per il servizio. Il calcolo deve sempre essere ripetuto sia per la tratta per in uplink che per quella in downlink, ed è il caso peggiore tra i due che deve essere tenuto in conto per il dimensionamento [55].

I parametri caratteristici adottati per il bilanciamento di tratta sono:

- Sensibilità di ingresso statica (BER 4%):
 - Stazione radiobase: -120 dBm
 - Terminale veicolare: -112 dBm
 - Terminale portatile: -112 dBm
- Sensibilità di ingresso dinamica:
 - Stazione radiobase: -113,5 dBm
 - Terminale veicolare: -103 dBm
 - Terminale portatile: -103 dBm
- Potenza in trasmissione:
 - Stazione radiobase: 10W
 - Terminale veicolare: 1W
 - Terminale portatile 1W
- Guadagno delle antenne
 - Stazione radiobase: 8,5 dBi
 - Terminale veicolare: trascurabile
 - Terminale portatile: trascurabile
- Perdite aggiuntive:
 - Stazione radiobase: 1,9 dB per cavi e connettori e 2 dB per combinatore e duplexer
 - Terminale veicolare: 1 dB per cavi e connettori

Occorre inoltre aggiungere un margine di shadowing per tenere conto delle fluttuazioni aleatorie nell'attenuazione del canale radio dovute

ad ostruzioni temporanee. Assumendo una Location Probability del 95% si ottiene un margine di shadowing di 8 dB.

Per quanto riguarda il guadagno della stazione radiobase occorre specificare che esso cambia tra il caso della ricezione e quello della trasmissione:

- In trasmissione si utilizza un'unica antenna omnidirezionale del modello Kathrein K742155 caratterizzata da un guadagno di 8,5 dBi.
- In ricezione si adotta una soluzione a tripla diversità nella quale la prima antenna è la stessa che viene utilizzata in trasmissione alla quale viene applicato un duplexer per poterla utilizzare anche per ricevere mentre le altre due sono antenne a pannello del modello Kathrein K731291. Questa soluzione permette di ottenere un guadagno complessivo di 9 dBm.

Per quanto riguarda il dispositivo portatile bisogna inoltre considerare dei margini aggiuntivi rispettivamente di 6 dB qualora esso venga utilizzato all'interno di un veicolo (margine di copertura in-car) e di 4 dB qualora venga collegato alla cintura di un operatore a causa dell'attenuazione dovuta al corpo umano.

In particolare, ai fini del calcolo della copertura sono stati analizzati tre casi cioè quelli in cui la stazione radiobase comunichi rispettivamente con un dispositivo veicolare (caso veicolare), con un dispositivo portatile utilizzato all'interno di un'autovettura (caso portatile in-car) e con un dispositivo portatile attaccato alla cintura di un operatore (caso portatile outdoor). I valori per la probabilità di copertura ottenuti per i tre casi all'interno dell'area prevista per il servizio sono:

- Caso veicolare: copertura 99,4%
- Caso portatile in-car: copertura 97,4%
- Caso portatile outdoor: copertura 95,0 %

In tutti questi casi è risultato che a causa della configurazione del sistema, la tratta in downlink risulta essere sfavorita rispetto a quella in uplink.

L'analisi di copertura ha permesso di individuare tre siti, posti sui colli bolognesi, nei quali posizionare le stazioni radiobase in modo

tale da garantire un'ottima copertura radio su tutta l'area urbana di bologna e sulle zone limitrofe.

Codice	Località	Latitudine	Longitudine	Altitudine
BO-01	Colle Osservanza	44°28'51,6" N	11°19'27,3" E	227 m
BO-02	Monte Donato	44°27'15,5" N	11°20'57" E	302 m
BO-03	Tizzano (Monte Castellano)	44°27'51,28" N	11°14'43,48" E	292 m



Figura 52: posizioni delle stazioni radiobase

Tutti i siti sono dotati di una stazione radiobase con una potenza massima di 10W e della configurazione di antenne precedentemente illustrata, le quali sono installate su tralicci alti 15 metri.

A ciascun sito è assegnata una frequenza per l'uplink ed una per il downlink, inoltre è presente un'ulteriore frequenza riservata alle comunicazioni dirette tra i terminali mobili (DMO) [56].

Sito	Colle Osservanza	Monte Donato	Tizzano	DMO
Frequenza TX (MHz)	468,925	468,950	468,975	445,300
Frequenza RX (MHz)	458,925	458,950	458,975	

2.1.2 Collegamento tra le stazioni radiobase e la centrale

Il collegamento tra le stazioni radiobase e il controllore centrale è garantito da collegamenti punto-punto dedicati CDN (Circuito Diretto Numerico) noleggiati da Telecom Italia costituiti da due coppie di doppini in rame che garantiscono una banda di trasmissione di 128 kbit/s.

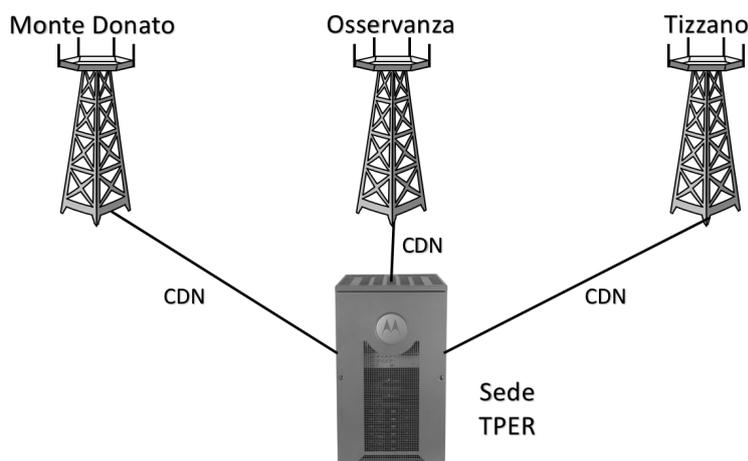


Figura 53: collegamenti tra le stazioni radiobase e la centrale

La trasmissione dei dati sulle linee CDN si basa sulla tecnica di accesso multiplo a divisione di tempo (Time Division Multiplexing – TDM) nella quale il tempo di utilizzo del canale viene organizzato in frame temporali tutti della stessa durata ciascuno dei quali è costituito da un determinato numero di slot, ognuno dei quali può essere assegnato ad una particolare comunicazione. Più specificatamente le linee CDN sfruttano una tecnologia denominata PDH (Plesiocronous Digital Hierarchy) in cui i nodi della rete sono plesiocroni, cioè lavorano nominalmente tutti alla stessa frequenza di

cifra ma non possono essere considerati perfettamente sincroni in quanto utilizzano come riferimento degli oscillatori locali che pur avendo teoricamente la stessa frequenza di clock sono soggetti a delle variazioni aleatorie. Per compensare queste variazioni aleatorie vengono aggiunti degli slot aggiuntivi composti da bit non significativi, detti bit di giustificazione (justification) o di riempimento (stuffing), che servono a compensare gli eventuali anticipi o ritardi [7].

Questi collegamenti operano secondo la modalità a commutazione di circuito in cui alla comunicazione tra trasmettitore e ricevitore viene assegnato un canale in maniera esclusiva, questo permette di ottenere una elevata affidabilità e bassi ritardi a discapito di una bassa efficienza, infatti dato che il canale rimane assegnato al collegamento anche quando non vi è nessuna trasmissione si ha uno spreco di banda trasmissiva. Un altro aspetto negativo della commutazione di circuito è dato dal fatto che con essa risulta molto complicato gestire i collegamenti multipli e quindi garantire un'eventuale ridondanza dei collegamenti.

In Europa le trasmissioni di tipo PDH si basano sullo standard E1 che prevede dei frame che portano ciascuno 2.048 Mbit divisi in 32 time-slot da 64 Kbit ciascuno numerati da 0 a 31. Di questi time-slot solo 30 sono effettivamente utilizzabili per la trasmissione dei dati mentre gli altri due sono riservati alla trasmissione di informazioni di controllo, in particolare lo slot 0 oltre a svolgere la funzione di delimitatore di trama trasporta le informazioni relative al codice CRC per la verifica degli errori mentre lo slot 16 è dedicato alle informazioni di segnalazione.

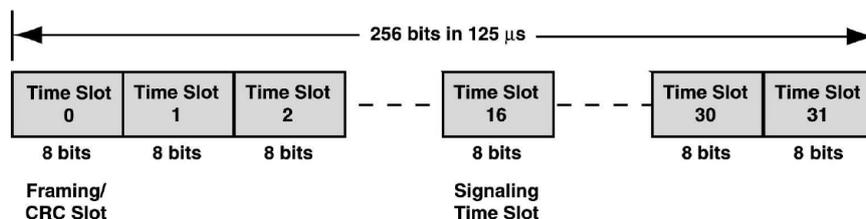


Figura 54: formato di una trama E1 [7]

Lo standard E1 prevede che i bit siano trasmessi adottando la codifica di linea HDB3 (High Density Bipolar Code a 3 livelli), si tratta di un

codice del tipo Alternated Mark Inversion (AMI) in cui per ogni zero logico viene sempre trasmesso uno 0 mentre per gli uno logici si alterna tra +1 e -1, per un totale di tre possibili livelli di segnale, inoltre siccome sequenze di più di tre zeri non permettono una corretta decodifica del clock di trasmissione da parte del ricevitore il codice aggiunge dopo ogni gruppo di tre zeri una violazione bipolare cioè un impulso +1 o -1 che non risponde alla corretta alternanza tra i due simboli e che può quindi facilmente essere escluso dal ricevitore.

Sulle tre linee CDN sono stati installati degli apparati per la protezione dalle sovratensioni del modello Saiset TZ-DSL, si tratta di dispositivi realizzati tramite dei varistori che permettono di scaricare a terra eventuali eccessi di tensione che potrebbero danneggiare gli apparati della stazione radiobase.

2.1.3 Dispositivi Mobili

Allo stato attuale sulla rete di Tper sono autorizzati ad operare in totale 55 radio portatili e 655 dispositivi veicolari, tutti questi dispositivi sono stati forniti da Motorola in quanto vincitrice della gara di appalto per l'acquisto dei dispositivi mobili che è stata indetta nel 2008 [55].

I dispositivi radio portatili sono tutti del modello Motorola MTH800 (codice radioelettrico PT511FR19 per il ministero), si tratta di radio portatili compatte e robuste in grado di garantire tutte le principali funzionalità di comunicazione previste dallo standard Tetra quali chiamate private, di gruppo, telefoniche, di emergenza, trasmissione dati in modalità a commutazione di pacchetto, scambio di messaggi di testo in tecnologia SDS e comunicazioni in modalità diretta anche tramite dispositivi repeater o gateway. È inoltre presente un ricevitore GPS in grado di fornire funzionalità di localizzazione.

Per quanto riguarda le caratteristiche tecniche le radio MTH800 sono in grado di funzionare su un intervallo di frequenze tra i 380 e i 470 MHz, sono caratterizzate da una sensibilità dinamica nominale di -105 dBm (minima -103 dBm) e da una sensibilità statica nominale di

-116 dBm (minima -112) e sono in grado di erogare fino a 1W (30 dBm) di potenza, corrispondenti alla classe 4 dello standard, con un sistema di controllo di potenza che prevede 3 step da 5 dBm ciascuno. L'interfaccia utente è costituita da un display a colori e da una tastiera numerica alla quale si aggiungono un tasto laterale dedicato alla funzione PTT, un pulsante per le chiamate di emergenza posto nella parte superiore del dispositivo e una rotella configurabile che può essere utilizzata per regolare il volume o per la selezione dei gruppi di conversazione.

La radio è dotata di un altoparlante da 1W di potenza e di una batteria standard da 800 mAh o opzionalmente di una batteria ad alta capacità da 1500 mAh [54].



Modello	Motorola MTH800
Codice radioelettrico	PT511FR19
Dimensioni	141x55x33 mm
Peso	192g (solo radio), 247g (con batteria)
Batteria	800 mAh (opzionale 1500 mAh)
Potenza altoparlanti	1W
Potenza RF	1W (classe 4)
Sensibilità statica	-112 dBm minima, -115 dBm tipica

Sensibilità dinamica	-102 dBm minima, -107 dBm tipica
Bande di frequenza	380-430/450-470 MHz
Gruppi	2048 in TMO e 1024 in DMO

Le radio veicolari sono del modello Motorola MTM800 Databox (codice radioelettrico MT512M), si tratta di radio veicolari che non possiedono una interfaccia utente con display e tastiera ma sono progettate per essere controllate tramite porta seriale da un terminale esterno che nel caso di Tper è il computer di bordo presente sugli autobus. Sulla parte frontale della radio si trovano la porta seriale PEI per la connessione con il computer di bordo costituita da un connettore D a 9 poli e una porta seriale a 25 poli per la connessione di un eventuale frontalino di controllo remoto, sul retro invece i connettori per l'alimentazione a 12V, per il cavo dell'antenna esterna da collocare sul tetto del veicolo (Kathrein K70 23230) e per gli accessori audio quali cornetta, microfono e altoparlante, questi ultimi vengono utilizzati anche per il GSM e lo switch tra i due sistemi è realizzato tramite un relè pilotato dal computer di bordo.

Per quanto riguarda le caratteristiche tecniche le radio MTM800 Databox sono caratterizzate da una sensibilità dinamica nominale di -114 dBm (minima -112) e da una sensibilità statica di -105 dBm (minima -103) e sono in grado di erogare fino a 3W (35 dBm) di potenza, corrispondente alla classe 3 dello standard, con un controllo di potenza che prevede 4 step da 5 dBm ciascuno [54].



Modello	Motorola MTM800 Databox
Codice radioelettrico	MT512M

Dimensioni	49x170x155 mm
Peso	1370 g
Alimentazione	12V DC
Potenza RF	3W (classe 3)
Sensibilità statica	-112 dBm minima, -114 dBm tipica
Sensibilità dinamica	-103 dBm minima, -105 dBm tipica
Bande di frequenza	350-390/380-430/410-470/806/870 MHz
Gruppi	2048 in TMO e 1024 in DMO

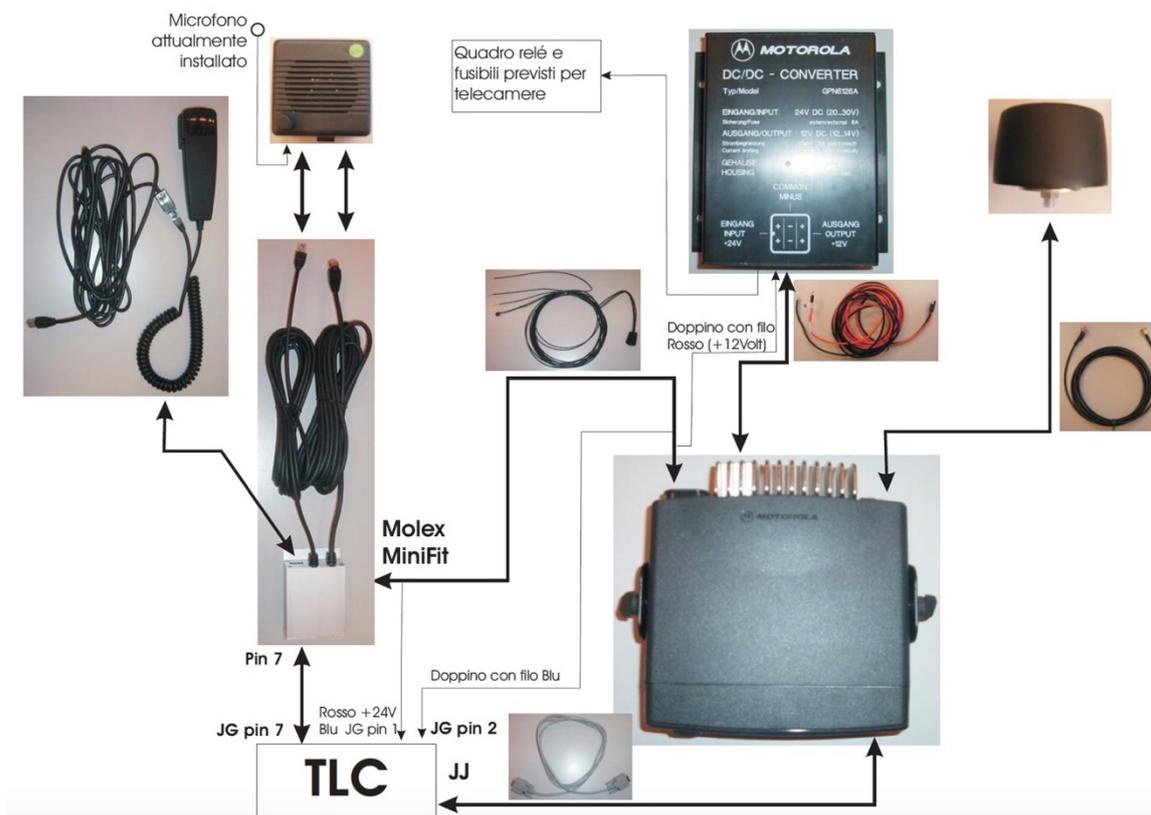


Figura 55: schema di collegamento della radio veicolare a bordo dei mezzi

Sia le radio portatili che quelle veicolari per poter essere utilizzate necessitano di essere programmate tramite il software Motorola Tetra CPS che permette di inserire l'indirizzo assegnato alla radio, le informazioni riguardo alla rete, i gruppi disponibili, gli indirizzi per le chiamate di emergenza e altre impostazioni.

2.1.4 Numerazione dei dispositivi mobili

La prima parte dell'indirizzo TSI (Tetra Subscriber Identity) delle radio facenti parte della rete di Tper è 222 1234 dove 222 è il Mobile Country Code corrispondente all'Italia, mentre 1234 è l'identificativo specifico della rete Tetra di Tper.

Per quanto riguarda l'SSI (Short Subscriber Identity), cioè la parte di indirizzo che identifica i singoli dispositivi, alle radio portatili risulta assegnato un identificativo compreso tra 10001 e 10055, mentre le radio veicolari sono divise in quattro lotti con identificativi compresi all'interno delle serie 2000000, 2001000, 2002000 e 2003000 rispettivamente.

Gli indirizzi dei gruppi sono caratterizzati invece da un GSI (Group Subscriber Identity) compresi all'interno delle serie 1770000 e 1780000.

I gruppi previsti per le radio portatili sono:

- Gruppo VTV: dedicato alle comunicazioni tra le radio dei verificatori di titoli di viaggio.
- Gruppo AE: dedicato alle comunicazioni tra gli addetti all'esercizio, coloro che fanno parte di questo gruppo ascoltano anche le chiamate del gruppo VTV.
- Gruppo Cabine: dedicato alle radio che vengono utilizzate all'interno delle cabine sparse sul territorio dove sostano gli autisti disponibili come riserve.
- Gruppo Depositi: dedicato alle comunicazioni tra gli operatori dei depositi.
- Gruppo Ispettori: può ascoltare le chiamate di tutti gli altri gruppi.
- Gruppo Broadcast: per effettuare chiamate di gruppo che comprendono tutti gli utenti della rete.
- Gruppo Emergenza: dedicato solo alle chiamate di emergenza.

I gruppi previsti per le radio veicolari dipendono dal fatto che il mezzo risulti inizializzato o meno sul sistema di telecontrollo:

- Se il mezzo non è inizializzato la sua radio è registrata nel gruppo dei mezzi non inizializzati oltre che nei gruppi broadcast ed emergenza.
- Se il mezzo è inizializzato la sua radio è registrata nel gruppo dei mezzi inizializzati e nel gruppo specifico della linea su cui presta servizio, oltre che nei gruppi broadcast ed emergenza.

2.2 Motorola Dimetra IP

Motorola Dimetra IP (Digital Motorola Enhanced Trunked Radio IP) è il nome commerciale dell'implementazione realizzata da Motorola per un sistema Tetra.

Il sistema Dimetra IP rispetta gli standard enunciati dall'ETSI per la tecnologia Tetra ed è in grado di funzionare, a seconda dei paesi e degli utilizzatori su vari intervalli di frequenze. Attualmente la versione dello standard supportata è la prima, ma è prevista la possibilità di introdurre le funzionalità della seconda release tramite aggiornamento software.

La progettazione della tecnologia Dimetra IP è iniziata nel 1994, agli albori dello sviluppo dello standard Tetra alla cui definizione Motorola ha partecipato attivamente come socia dell'Associazione Tetra MoU, il primo prototipo funzionante è stato presentato nel 1996 e la prima installazione commerciale è avvenuta nel 1997 in Norvegia. Allo stato attuale nel mondo sono funzionanti più di 200 reti Dimetra IP in varie nazioni tra Europa, Asia, Medio Oriente e Oceania, per conto di enti pubblici e società private operanti principalmente nell'ambito della pubblica sicurezza, delle emergenze e dei trasporti.

Il sistema Dimetra IP come è possibile intuire dal nome si basa sulla tecnologia Tetra-over-IP per la realizzazione della rete Tetra, il che significa, come già esplicitato in un paragrafo del capitolo precedente, che tutte le comunicazioni all'interno della rete avvengono in modalità a commutazione di pacchetto sfruttando il protocollo IP. Questa scelta comporta che i nodi della rete piuttosto che essere costituiti da apparati appositamente progettati per il

sistema Tetra siano realizzati semplicemente tramite dei normali switch e router completamente identici a quelli utilizzati nelle normali reti IP, così come i servizi tipici delle reti Tetra vengono forniti da comuni server che eseguono sistemi operativi tradizionali quali Microsoft Windows, SUN Solaris o Linux. Come già illustrato nel capitolo precedente la tecnologia Tetra-over-IP porta molti vantaggi quali la possibilità di trattare allo stesso modo le comunicazioni dati e quelle vocali, la facilità di interfacciamento con reti esterne e la possibilità di gestire collegamenti multipli per ragioni di immunità ai guasti e di bilanciamento del carico.

Il principale punto di forza del sistema Dimetra è costituito dalla sua flessibilità ed espandibilità, infatti è progettato per poter aggiungere facilmente nuovi elementi al fine di introdurre nuove funzionalità, aumentare il numero massimo di utenti o estendere la copertura del servizio aggiungendo nuovi siti.

Un altro aspetto che viene tenuto in particolare conto dalla tecnologia Dimetra è l'affidabilità, infatti sono previste numerose soluzioni per garantire una buona resistenza ai guasti e la possibilità di comunicare anche in caso di avarie ai collegamenti o agli apparati di rete, quali la ridondanza di quasi tutti i componenti hardware, la gestione dei collegamenti multipli e la modalità di funzionamento fallback nella quale le stazioni radiobase sono in grado di garantire un insieme ridotto di funzionalità anche quando si trovino isolate dal resto dell'infrastruttura rete.

Esistono varie implementazioni della tecnologia Dimetra studiate per sistemi di varie dimensioni, dalle grandi reti di estensione nazionale a piccole reti per organizzazioni operanti su un territorio circoscritto.

2.2.1 Dimetra IP Compact

Dimetra IP Compact è la versione del sistema Motorola Dimetra destinata a sistemi di medie dimensioni, quali reti di estensione regionale, supporta fino a 20 stazioni radiobase e fino a 60 portanti radio e permette di gestire fino a 10.000 utenti e fino a 500 gruppi [34].

Esistono due versioni del sistema Dimetra IP Compact, una compatta in grado di gestire unicamente chiamate vocali ed una completa che permette anche funzionalità aggiuntive quali SDS, dati a pacchetto e crittografia.

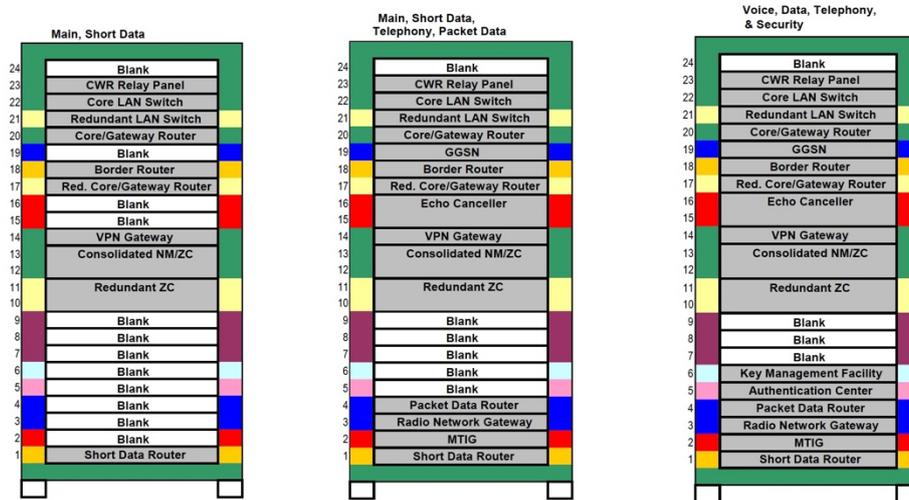


Figura 56: possibili configurazioni del sistema Dimetra Compact [34]

Presso Tper è in uso un sistema Dimetra IP Compact in versione completa, dotato della release software 2.0 [55].

La versione completa del sistema Dimetra IP Compact è composta da vari sottosistemi che svolgono ciascuno una determinata funzione e che sono indipendenti tra di loro, di questi alcuni devono essere presenti obbligatoriamente, mentre altri sono opzionali ed è facoltà del gestore della rete decidere se installarli o meno [34].

I sottosistemi che devono essere necessariamente presenti al fine del corretto funzionamento della rete sono:

- **Controllore Centrale:** è il nucleo della rete Dimetra, mette in comunicazioni i vari apparati della rete con gli utenti del servizio, mantiene i database in cui sono registrate le configurazioni degli utenti e degli apparati del sistema, si occupa dell'assegnazione delle risorse di comunicazioni agli utenti, gestisce le chiamate vocali e raccoglie informazioni statistiche sull'utilizzo del sistema.
- **Stazioni radiobase:** sono le infrastrutture, collocate in siti remoti, che forniscono la connettività radio agli utenti mobili del sistema.

- Console di dispaccio: sono le postazioni dalle quali degli operatori possono gestire tutte le comunicazioni che avvengono all'interno della rete.
- Terminale di gestione della rete: è un terminale dal quale è possibile accedere alle configurazioni di tutti gli apparati hardware presenti all'interno del sistema al fine di effettuare operazioni di diagnostica e manutenzione.
- VPN Gateway: permette di effettuare operazioni di diagnostica e manutenzione da remoto.

I sottosistemi che invece possono essere presenti in maniera opzionale sono:

- Controllore Centrale Ridondato: è in grado di svolgere le stesse funzioni del Controllore Centrale e prende il suo posto qualora esso non sia disponibile a causa di guasti.
- Sottosistema telefonico: permette di connettere la rete Dimetra ad una rete telefonica esterna.
- Sottosistema SDS: gestisce il servizio Short Data Service
- Sottosistema per i dati a pacchetto: gestisce il servizio di trasmissione di dati a commutazione di pacchetto.
- Sottosistema per l'autenticazione e la cifratura dell'interfaccia aria: gestisce le procedure di autenticazione dei terminali e si occupa della cifratura dell'interfaccia aria.
- Sottosistema per la cifratura end-to-end: si occupa della cifratura end-to-end delle comunicazioni tra i terminali.

Il sistema in uso presso TPER comprende tutti i sottosistemi, compresi quelli opzionali, tranne quello dedicato alla cifratura end-to-end in quanto è stato scelto di non implementare questa funzionalità.

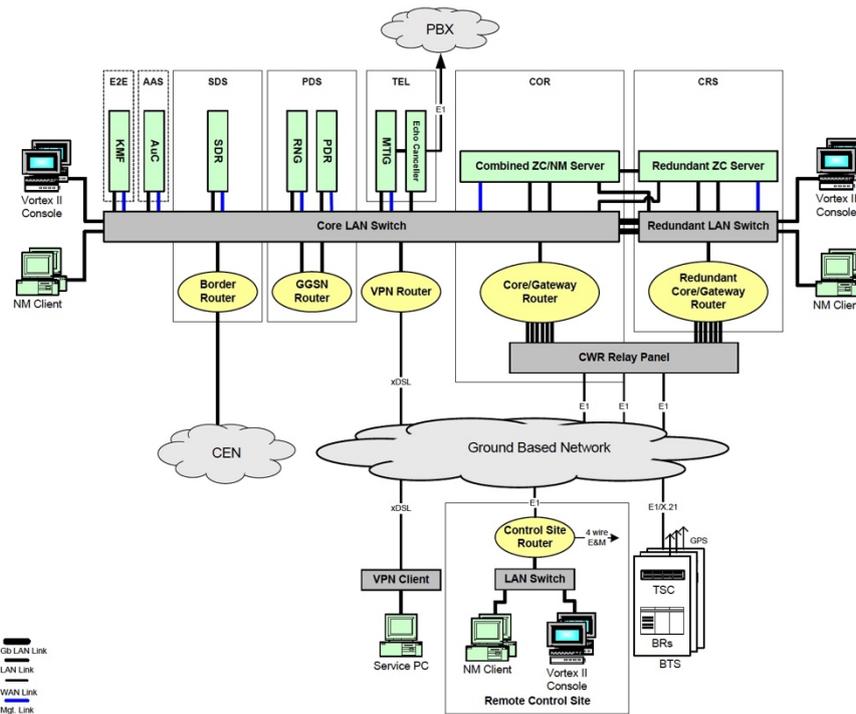


Figura 57: componenti di un sistema Dimetra Compact in versione completa [34]

2.2.2 Componenti della centrale di commutazione

La centrale di commutazione è costituita da un armadio rack all'interno del quale sono installati gli apparati che compongono il controllore centrale, il controllore ridondato, il sottosistema SDS, il sottosistema dati a pacchetto, il gateway VPN, il sottosistema telefonico e il sottosistema per l'autenticazione e la cifratura dell'interfaccia aerea. L'armadio è dotato di un gruppo di continuità che permette di garantire il funzionamento del sistema anche in caso di interruzioni di corrente.



Figura 58: armadio rack della centrale di commutazione [34]

2.2.2.1 Controllore Centrale

Il controllore centrale è il componente fondamentale della rete Dimetra, si occupa di connettere tra di loro tutti gli apparati della rete, di gestire le chiamate vocali, di mantenere le informazioni relative agli utenti, di assegnare le risorse alle varie comunicazioni e di mantenere le statistiche relative all'utilizzo del sistema.

Il controllore centrale è composto da vari apparati:

- Un server denominato Zone Controller/Network Management (ZC/NM) che implementa diverse funzionalità:
 - Zone Controller: gestisce il processamento delle chiamate vocali.
 - Database di sistema: mantiene le informazioni relative alle configurazioni del sistema.
 - Database degli utenti: mantiene le informazioni relative alle configurazioni degli utenti.
 - Zone Statistic Server: raccoglie ed elabora i dati statistici riguardanti le comunicazioni che avvengono all'interno della rete.
 - Air Traffic Server: raccoglie informazioni riguardo al traffico generato dalle chiamate.
- Un LAN switch centrale che si occupa di collegare tra di loro tutti gli apparati presenti all'interno della centrale di commutazione.
- Un router che svolge sia la funzione di Core Router che di Gateway Router e si occupa quindi del routing di tutti i dati sia all'interno della rete locale che collega gli apparati della centrale di commutazione che verso le stazioni radiobase e la sala di controllo che si trovano in remoto e sono collegate tramite connessioni di tipo WAN (Wide Area Network).
- Un Cooperative WAN Routing Relay Panel: che si occupa del collegamento della centrale di commutazione con le stazioni radiobase e con la sala di controllo che si trovano in posizioni remote, inoltre è in grado di eseguire anche lo switch automatico tra il router del Controllore Centrale e quello del Controllore Ridondato in caso di guasto.

Il Zone Controller/Network Management è realizzato con un server Sun Netra 240 della Sun Microsystems, dotato di un processore Sun Ultrasparc III da 1,5 GHz, 2 GB di memoria RAM e due hard disk da 146 GB in configurazione RAID ridondata, che esegue il sistema operativo SUN Solaris 10. Le varie funzionalità che questo dispositivo deve fornire sono implementate tramite 5 server virtuali realizzati grazie alla funzionalità Solaris Zones. Quest'ultima è una particolare tecnologia di virtualizzazione, del tipo detto a container, che risulta particolarmente leggera ed efficiente perché in essa a differenza delle tecnologie di virtualizzazione classiche in cui ogni macchina virtuale ha il proprio sistema operativo installato su di un hardware virtualizzato, i server virtuali condividono lo stesso sistema operativo e l'isolamento tra di essi è garantito semplicemente separando i processi relativi alle varie macchine raggruppandoli in diversi gruppi detti spazi dei nomi (namespaces), senza la necessità di nessuna emulazione di hardware virtuale.

Il router Core/Gateway router è realizzato con un router Motorola S6000 dotato di 3 porte Ethernet da 100 Mb/s per le connessioni locali e di una scheda ST6615A che gestisce fino a 12 porte E1 per le connessioni con l'esterno. Il LAN switch è costituito da uno switch HP Procurve 2650 dotato di 50 porte ethernet di cui 48 a 100 Mb/s e 2 a 1 Gb/s. Il CWR Relay Panel è un dispositivo realizzato specificatamente per il sistema Dimetra, si tratta di un apparato che grazie a dei relais è in grado di effettuare in automatico lo switch tra il Core/Gateway router primario e quello secondario collegandoli con i siti remoti. Si tratta di un dispositivo completamente passivo che quindi non necessita di una alimentazione esterna ma riceve l'energia necessaria direttamente dai router. Il CWR Relay panel è collegato a ciascuno dei due router con due connettori ad alta densità a 62 pin che trasportano ciascuno 12 linee E1 e ha 24 porte RJ48 per connettere altrettante linee E1 dirette verso le stazioni radiobase e verso la sala di controllo remota.

2.2.2.2 Controllore Centrale Ridondato

Il controllore ridondato è in grado di svolgere le stesse identiche funzioni del controllore centrale e lo sostituisce nel caso in cui esso non sia disponibile a causa di guasti o malfunzionamenti.

Il controllore ridondato è costituito da un server, un router e uno switch del tutto identici a quelli presenti nel controllore centrale, mentre il CWR Relay Panel è unico ed è in grado di gestire lo switch automatico tra i due sottosistemi.

2.2.2.3 Sottosistema telefonico

Il sottosistema telefonico permette di interfacciare il sistema Dimetra con una rete telefonica esterna. È composto da due componenti fondamentali:

- Interfaccia telefonica MTIG (Motorola Telephone Interconnect Gateway): è l'interfaccia vera e propria tra il sistema Tetra e la rete telefonica, converte l'audio dalla codifica ACELP alla codifica PCM e genera i toni DTMF necessari per la segnalazione sulle linee telefoniche.
- Cancellatore di eco: si occupa di cancellare eventuali echi che potrebbero essere introdotti a causa dei ritardi nella conversione dell'audio.

L'interfaccia MTIG è implementata tramite un server HP Proliant DL360 g4 dotato di un processore Intel Xeon a 3 GHz, 1 Gb di RAM e due hard disk da 72,8 Gb in configurazione RAID, sul quale è in esecuzione il sistema operativo Windows XP. Questo server è dotato di una scheda E1 che permette di connetterlo ad un centralino telefonico PABX tramite il protocollo QSIG e di una scheda voce che effettua la conversione delle chiamate vocali dal formato ACELP al formato PCM.

Il cancellatore di eco è un Tellabs 3100M che è in grado di gestire 2 flussi E1 da 30 canali in formato PCM ciascuno per elaborare contemporaneamente fino a 60 chiamate telefoniche, il sistema Dimetra però ne utilizza solo uno con un massimo di 30 chiamate contemporanee.

2.2.2.4 Sottosistema SDS

Il sottosistema SDS si occupa della gestione del servizio SDS ed è costituito dai seguenti componenti:

- Short Data Router: si occupa dell'instradamento dei messaggi SDS all'interno della rete.
- Border Router: permette di interfacciare la rete Dimetra con reti esterne, in modo tale da permettere ad utenti esterni di usufruire del servizio SDS e di altre funzionalità di comunicazione. Per ragioni di sicurezza questo dispositivo include un firewall per proteggere la rete da eventuali accessi non autorizzati dall'esterno. Il Border Router viene utilizzato oltre che dal servizio SDS anche da tutte le altre funzionalità che richiedono di comunicare con reti esterne, come ad esempio il servizio dati a pacchetto.

Lo Short Data Router è realizzato con un server HP Proliant DL360 g4 identico a quello utilizzato per l'interfaccia telefonica con la differenza che in questo caso viene usato il sistema operativo Linux invece che Windows.

Il Border Router è costituito da un router Motorola S6000 identico al Core/Gateway router salvo l'assenza della scheda WAN.

2.2.2.5 Sottosistema dati a pacchetto

Il sottosistema dati a pacchetto permette di effettuare comunicazioni dati in modalità a commutazione di pacchetto tramite il protocollo IP. Questo sistema, che si basa su tecnologie derivate dalla tecnologia GPRS per le reti cellulari, è costituito da tre componenti principali:

- Packet Data Router: si occupa dell'instradamento dei pacchetti IP verso le stazioni radiobase.
- Radio Network Gateway: si occupa di convertire i dati a pacchetto provenienti dalla rete fissa in un formato idoneo ad essere trasmessi su mezzo radio.
- Gateway GPRS Support Node: rappresenta l'interfaccia verso la rete fissa Tetra e verso altre reti esterne.

Il Packet Data Router e il Radio Network Gateway insieme rappresentano l'interfaccia dati verso i dispositivi mobili per questo spesso vengono raggruppati sotto il nome di Packet Data Gateway, entità che rappresenta l'equivalente di quello che nelle reti GPRS viene denominato Serving GPRS Support Node (SGSN).

Il sottosistema dati a pacchetto inoltre sfrutta le funzionalità del Border Router facente parte del sottosistema SDS in tutti quei casi in cui necessiti di comunicare con reti esterne.

Il Packet Data Router e il Radio Network Gateway sono costituiti entrambi da dei server HP Proliant DL360 g4 con sistema operativo Linux mentre il GGSN è un router Motorola S6000.

2.2.2.6 Gateway VPN

Il Gateway VPN è un router che permette di accedere alla rete Dimetra da un terminale remoto per effettuare operazioni di diagnostica e manutenzione.

Il dispositivo utilizzato per questa funzionalità è un router Netgear FVX538 Pro Safe che include un firewall di tipo Stateful Packet Inspection ed uno switch LAN ad 8 porte.

2.2.2.7 Sottosistema di autenticazione e di cifratura dell'interfaccia aria

Il sottosistema di autenticazione e di cifratura dell'interfaccia aria si occupa di autenticare gli utenti che accedono al servizio e di fornire le funzionalità di cifratura per le comunicazioni che viaggiano sulla tratta radio.

Il nucleo centrale di questo sottosistema è costituito da un server denominato Centro di Autenticazione (AuC) che gestisce le operazioni di autenticazione degli utenti ed è dotato di un apposito modulo hardware per generare le chiavi di cifratura che vengono utilizzate per codificare le comunicazioni che viaggiano sul mezzo radio.

Il Centro di Autenticazione è costituito da un server HP Proliant DL360 g4 provvisto di una scheda Motorola T6809 che si occupa specificatamente della cifratura dei dati che vengono inviati sul mezzo radio. Per poter sfruttare le funzionalità di autenticazione offerte dal Centro di Autenticazione occorre che i terminali mobili abbiano ricevuto una chiave segreta iniziale che viene generata da un PC denominato Provisioning Center (PrC) che si trova nella sala di controllo.

L'algoritmo di cifratura adottato per l'interfaccia aerea è il TEA1 che è l'algoritmo designato dall'ETSI per l'utilizzo nelle reti Tetra che operano in organizzazioni europee non operanti nell'ambito della pubblica sicurezza.

2.2.3 Componenti della sala di controllo

La sala di controllo è il luogo in cui si trovano i terminali e gli apparati che permettono agli operatori di gestire tutti gli aspetti della rete Dimetra, essa può essere realizzata nella stessa stanza dove si trova il controllore centrale, come nel caso di Tper, oppure in una posizione remota rispetto ad esso.

All'interno della sala di controllo si trovano:

- Consolle di dispaccio Motorola MCC 7500
- Terminale di gestione della rete
- Provisioning Center
- Router della sala di controllo
- Switch della sala di controllo

2.2.3.1 Consolle di dispaccio Motorola MCC 7500

Le consolle di dispaccio sono le postazioni da cui gli operatori della sala di controllo possono gestire l'utilizzo delle risorse di comunicazione della rete da parte degli utenti della stessa, da esse è inoltre possibile ricevere ed effettuare chiamate e creare e modificare i gruppi.

All'interno del sistema Dimetra IP Compact possono essere presenti da 1 a 8 consolle di dispaccio, nel caso di Tper ne sono state installate 4.

Ciascuna consolle di dispaccio è costituita da una workstation HP xw4400 dotata di processore Intel Core Duo da 2,4 GHz, 512 Mb di RAM e 80 Gb di hard disk, sulla quale è in esecuzione il sistema operativo Windows XP. La workstation è dotata di una scheda audio dedicata che è collegata tramite un bus FireWire IEEE1394 ad un dispositivo chiamato General Purpose Input-Output Module (GPIOM) che fornisce numerose porte per il collegamento di svariati dispositivi audio esterni quali cuffie, microfoni, altoparlanti e telefoni.

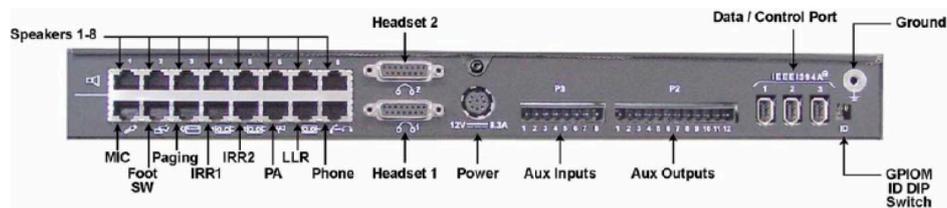


Figura 59: interfaccia Motorola GPIOM [34]

Sulle workstation delle consolle di dispaccio sono installati vari software:

- Motorola Elite Dispatch: è l'applicazione principale della consolle in cui è possibile visualizzare tutte le chiamate (private, di gruppo, telefoniche, di emergenza) che vengono effettuate nel sistema, sotto forma di icone raggruppate in cartelle.
- Applicazione ATS (Messaggi di testo): permette lo scambio di messaggi di testo tra i terminali mobili e le consolle di dispaccio.
- Applicazione RCM (Radio Control Manager): permette di monitorare e gestire in tempo reale i terminali radio.

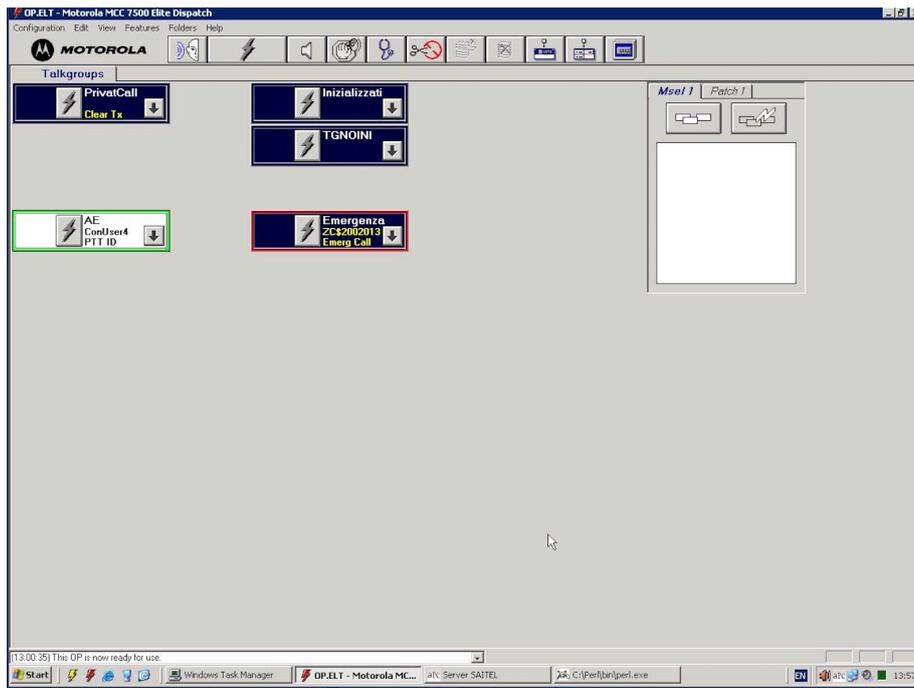


Figura 60: applicazione Motorola Elite Dispatch

Tramite delle API rese disponibili da Motorola risulta possibile gestire tutte le funzionalità delle consolle di dispaccio da computer remoti, questo è quello che accade anche nella rete di Tper dove gli operatori della sala di controllo non utilizzano direttamente le consolle di dispaccio ma usufruiscono delle funzionalità di esse dagli stessi computer utilizzati per il sistema di telecontrollo.

2.2.3.2 Terminale di gestione della rete

Si tratta di un computer dal quale è possibile collegarsi a tutti gli apparati della rete Dimetra per effettuare operazioni di diagnostica e manutenzione.

Il terminale di gestione della rete è realizzato tramite una workstation HP identica a quelle utilizzate per le consolle di dispaccio.

Sul terminale di gestione sono installati numerosi software:

- User Configuration Manager: permette di gestire il database che contiene le configurazioni degli utenti della rete.
- Zone Configuration Manager: permette di gestire il database contenente le configurazioni degli apparati della rete.
- Software Download: permette di aggiornare in maniera remota il software delle stazioni radio-base.

- Zone-Watch: per monitorare e configurare da remoto le stazioni radio-base.
- Sincronizzazione Temporale: si occupa della sincronizzazione di tutti gli apparati della rete.
- Report Dinamici: permette di visualizzare in tempo reale informazioni sull'utilizzo delle risorse e sulle prestazioni del sistema.
- Report Storici: permette di visualizzare informazioni statistiche relative al funzionamento del sistema nel tempo al fine di analizzarne le prestazioni.
- FullVision: permette di individuare in maniera centralizzata tutti gli allarmi e i guasti eventualmente presenti nel sistema.
- Controllo accessi: registra tutti gli accessi che avvengono tramite il terminale di gestione e permette di definire vari livelli di privilegi per gli utenti che accedono ad esso.

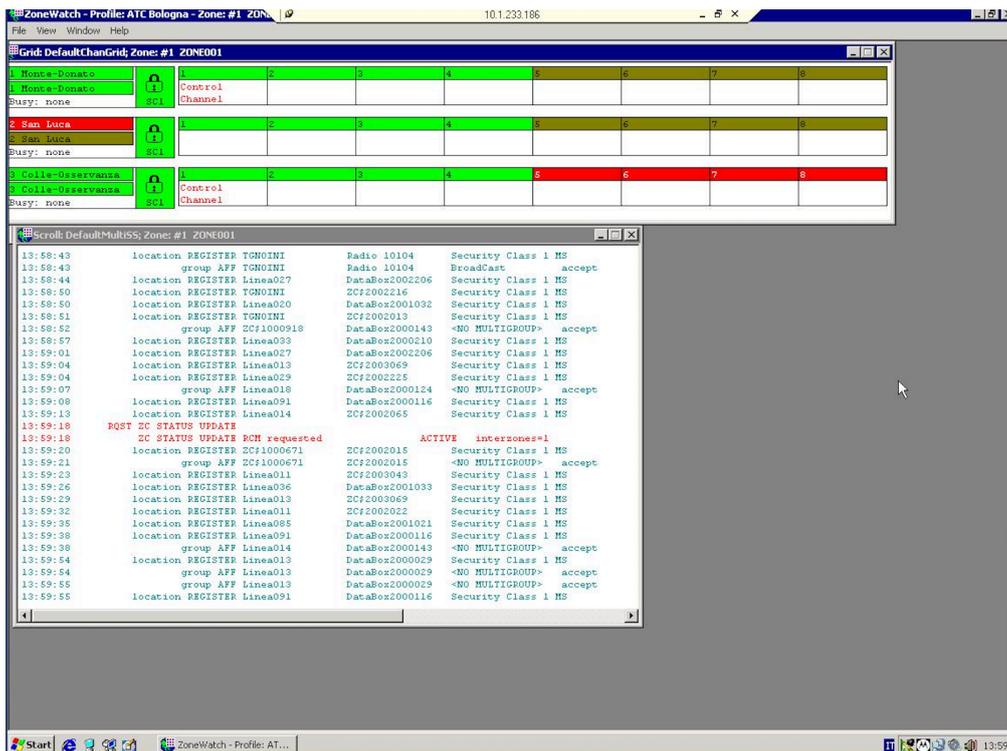


Figura 61: Applicazione Zone Watch

2.2.3.3 Provisioning Center

È il dispositivo incaricato della generazione delle chiavi iniziali di cifratura che devono essere caricate all'interno di tutti i terminali

mobili per poter sfruttare le funzionalità di autenticazione e di crittografia.

Le chiavi di cifratura possono poi essere inserite nei terminali mobili tramite un dispositivo portatile denominato Key Variable Logger (KVL).

Il Provisioning Center è realizzato con una workstation HP identica a quelle usate per le consolle di dispaccio alla quale viene aggiunta una scheda hardware per la generazione delle chiavi di cifratura identica a quella utilizzata nell'Authentication Center.

2.2.3.4 Router della sala di controllo

Si occupa dell'instradamento dei dati sia all'interno della rete locale della sala di controllo che verso il controllore centrale.

È costituito da un router Motorola ST2500 dotato di una porta LAN Ethernet a 100 Mb/s e di una scheda WAN per il collegamento tramite linea E1 con la sala di controllo.

2.2.3.5 Switch della sala di controllo

Permette di collegare tramite collegamenti LAN Ethernet i dispositivi presenti nella sala di controllo.

È costituito da uno switch HP Procurve 2626 dotato di 26 porte Ethernet di cui 24 a 100 Mb/s e 2 a 1 Gb/s.

2.2.4 Stazioni radiobase

Le stazioni radiobase sono i siti remoti, sparsi sul territorio, che si occupano di irradiare il segnale radio su tutta l'area di copertura del servizio.

Esistono due tipi di stazioni radiobase utilizzabili all'interno del sistema Dimetra IP Compact:

- MTS2: si tratta di una stazione radiobase di ridotte dimensioni e a basso consumo energetico, supporta fino ad un massimo di

2 portanti a radiofrequenza e non prevede la ridondanza dei componenti.

- MTS4: si tratta di una stazione radiobase ad elevate prestazioni, supporta fino a 4 portanti a radiofrequenza (o fino a 8 con un rack aggiuntivo), prevede la possibilità di ridondare tutti i componenti.

I componenti fondamentali che sono sempre presenti all'interno di una stazione radiobase sono:

- Controllore di sito
- Ricetrasmittitori radio
- Sistema di combinazione a RF
- Unità di alimentazione

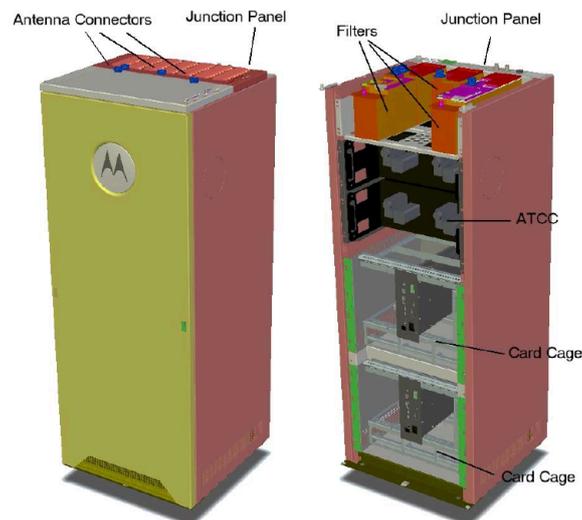


Figura 62: stazione radiobase Motorola MTS4 [34]

Le stazioni radiobase installate nel sistema di TPER sono del modello MTS4, utilizzano dei ricetrasmittitori a basso consumo da 10W e sono dotate di apparati completamente ridondati e di batterie tampone in maniera tale da garantire continuità al servizio anche in caso di guasti [55].

2.2.4.1 Controllore di sito

Il controllore di sito, noto anche come Tetra Site Controller (TSC), gestisce l'attività del sito e assegna le risorse radio alle varie comunicazioni a seconda delle indicazioni che riceve dal controllore centrale. In caso di mancanza di collegamento con la centrale il

sistema è in grado di commutare in automatico nella modalità Site Trunking o Fallback nella quale il controllore di sito si occupa autonomamente dell'assegnazione delle risorse radio permettendo la comunicazione dei terminali che si trovino all'interno della zona coperta dal sito senza l'intervento del controllore centrale, qualora poi il collegamento venga ripristinato il sistema ritorna in automatico allo stato normale.

Il controllore di sito è costituito da una scheda con processore Power PC dotata di adeguati quantitativi di memoria volatile e non volatile sul quale funziona un sistema operativo proprietario di Motorola. Inoltre, è presente un modulo GPS che serve come riferimento di tempo e frequenza.

Il controllore è collegato tramite una rete locale interna ai ricetrasmittitori radio e tramite un collegamento E1 geografico con il controllore centrale.

Le stazioni radiobase del modello MTS4 possono essere equipaggiati con 2 controllori di sito in configurazione ridondata.

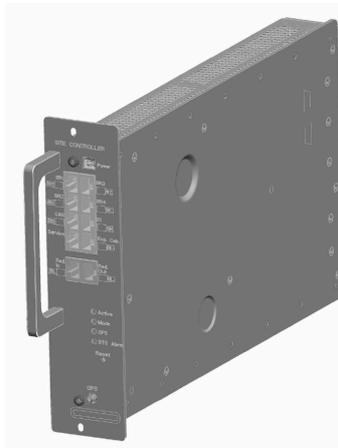


Figura 63: controllore di sito [34]

2.2.4.2 Ricetrasmittitori radio

I ricetrasmittitori radio ricevono i segnali da trasmettere in banda base e li trasformano in segnali a radiofrequenza alle frequenze indicate dal controllore di sito. È necessario un ricetrasmittitore per ogni portante assegnata alla stazione radiobase.

I ricetrasmittitori utilizzati nel sistema Dimetra sono di tipo modulare quindi in essi risultano separati i vari componenti presenti al loro interno: alimentazione, trasmettitori, amplificatori di potenza

a RF, ricevitori e logica di controllo. Ogni componente è dotato di opportune segnalazioni di guasto.

Al fine di migliorare la qualità dei segnali ricevuti i ricetrasmittitori permettono di sfruttare la ricezione in diversità di spazio con 2 o 3 rami.

Esistono due diversi tipi di ricevitori che possono essere utilizzati: una versione a basso consumo che eroga fino a 10 W e una versione ad alta potenza che eroga fino a 25 W.

I ricetrasmittitori utilizzati nel sistema Dimetra sono caratterizzati da un'elevata sensibilità, molto superiore a quella minima prevista dagli standard ETSI:

- Sensibilità statica (BER 4%): -120 dBm (ETSI -115 dBm)
- Sensibilità dinamica (BER 4%): -113.5 dBm (ETSI -106 dBm)

Nelle stazioni radiobase MTS4 è possibile prevedere dei trasmettitori ridondati in grado di sostituire in maniera automatica quelli principali in caso di guasto.

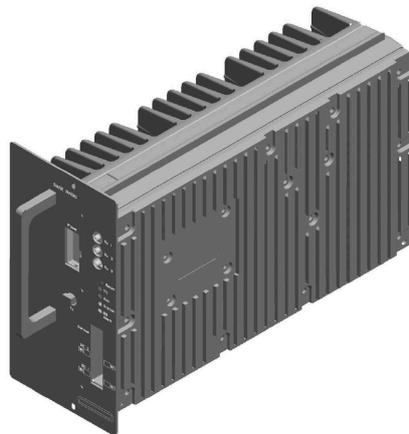


Figura 64: ricetrasmittitore radio [34]

2.2.4.3 Sistema di combinazione a RF

Il sistema di combinazione a RF o combinatore d'antenna permette di trasmettere i segnali a radiofrequenza provenienti da vari ricetrasmittitori su un'unica antenna in trasmissione e parallelamente di distribuire ai vari ricetrasmittitori i segnali provenienti da un massimo di tre antenne in ricezione.

Per combinare su un'unica antenna i segnali provenienti dai vari trasmettitori vengono utilizzati dei dispositivi combinatori che possono essere di diversi tipi:

- Combinatori ibridi: si tratta di dispositivi a banda larga che non necessitano di essere sintonizzati e sono adatti a stazioni radiobase che comprendono fino a due ricetrasmittitori, sono utilizzati infatti sulle MTS2.
- Combinatori a cavità manuali: sono dispositivi a banda stretta che richiedono di essere sintonizzati manualmente sulle varie frequenze a cui operano i ricetrasmittitori, possono essere utilizzati in stazioni radiobase con più di due trasmettitori.
- Combinatori a cavità auto-sintonizzati: sono simili ai combinatori a cavità manuali con la differenza che invece di essere sintonizzati manualmente sono dotati di motori passo-passo che permettono di effettuare la sintonizzazione in automatico da remoto rendendo più semplice cambiare le frequenze dei ricetrasmittitori.

In ricezione invece vengono utilizzati dei multi-accoppiatori di ricezione che svolgono sia la funzione di combinare insieme i segnali provenienti da multiple antenne in ricezione, sfruttando la Maximum Ration Combining come tecnica di diversità, sia quella di separare i segnali alle varie frequenze da inviare ai vari ricetrasmittitori. Questi multi-accoppiatori contengono filtri passabanda a RF, amplificatori di potenza e accoppiatori direzionali.

È possibile inoltre, grazie all'impiego di un duplexer, utilizzare una stessa antenna sia per la trasmissione che per la ricezione.

2.2.4.4 Unità di alimentazione

L'unità di alimentazione fornisce l'energia elettrica necessaria per il funzionamento di tutti gli apparati presenti nella stazione radiobase. Può ricevere in ingresso una tensione di 110 o 220 V in corrente alternata o di -48 V in corrente continua.

Per garantire il funzionamento della stazione radiobase anche in caso di mancanza di energia elettrica sulla rete è possibile prevedere delle batterie tampone.

Nelle stazioni radiobase MTS4 è possibile avere una seconda unità di alimentazione ridondata da utilizzare in caso di guasto a quella principale.

2.2 Il sistema di telecontrollo di Tper

Il sistema di controllo e monitoraggio della flotta permette di controllare in tempo reale da una centrale posta presso la sede aziendale la posizione di tutti gli autobus che prestano servizio sulla rete di Tper. La conoscenza della posizione di ogni singolo mezzo risulta essenziale per garantire sicurezza e regolarità al servizio permettendo di individuare eventuali anomalie e adottare in maniera tempestiva soluzioni adeguate.

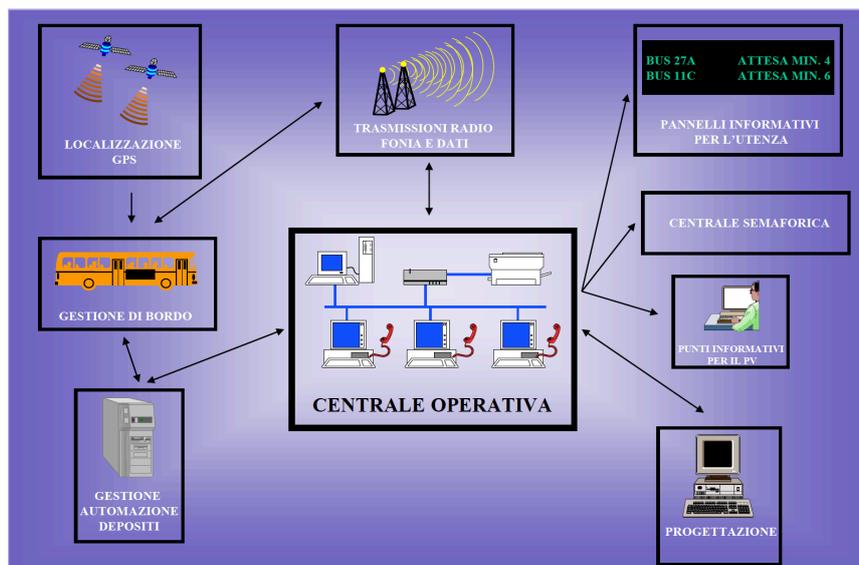


Figura 65: schema del sistema di telecontrollo di Tper [35]

Gli elementi fondamentali che costituiscono il sistema di telecontrollo di Tper sono:

- I server del telecontrollo, su cui è in esecuzione il software che realizza le funzionalità del sistema.
- La sala di controllo, in cui si trovano le postazioni degli operatori addetti al controllo della regolarità del servizio.

- I computer di bordo, che si trovano sui mezzi e che si occupano sia di raccogliere ed inviare ai server del sistema i dati relativi alla localizzazione che di gestire le comunicazioni tra gli autobus e la centrale.

2.2.1 I server del telecontrollo

Il nucleo fondamentale del sistema di telecontrollo è costituito da un server su cui è in esecuzione il software, realizzato completamente in proprio da Tper, che si occupa di raccogliere e consolidare tutti i dati di localizzazione che provengono dai computer di bordo dei mezzi oltre a garantire altre funzionalità quali l'interfacciamento con i computer degli operatori della sala di controllo e con il servizio di pianificazione, la gestione delle informazioni al pubblico sia tramite pannelli luminosi alle fermate che tramite SMS o internet e il servizio di prenotazione per le corse a chiamata

Il server che realizza queste funzionalità è un IBM 9131-52 dotato di un processore Power 5 e 32 GB di RAM su cui sono in esecuzione cinque server virtuali realizzati grazie alla tecnologia di virtualizzazione proprietaria di IBM denominata PowerVM che funziona sul sistema operativo AIX, che è la versione di UNIX personalizzata di IBM:

- VIOS: è il virtual I/O server che si occupa della virtualizzazione delle interfacce di rete e del sistema SCSI per la gestione dello storage.
- TLC: è un server virtuale basato su AIX 5.3 sul quale è in esecuzione il software che riceve e consolida i dati di localizzazione provenienti dai computer di bordo dei mezzi, si interfaccia con il servizio di pianificazione e gestisce il servizio di previsione degli orari di transito per le informazioni agli utenti.
- DB: è un server virtuale basato su AIX 5.3 sul quale si trova un database Oracle 11g su cui vengono salvati tutti i dati di localizzazione e di pianificazione.

- X: è un server virtuale basato su Suse Linux 10.1 che svolge varie funzionalità, su di esso si trovano i driver che pilotano i modem GSM che gestiscono i servizi di informazioni al pubblico tramite SMS (Hellobus) e di prenotazione delle corse a chiamata (Prontobus), un server web Apache 2, un database MySQL 5.0.25, un server FreeRadius per l'autenticazione delle SIM dei computer di bordo e tutto il software che permette l'interfacciamento con i computer della centrale operativa.
- DEV: è un server virtuale basato su AIX 5.3 dedicato unicamente ad applicazioni di test e allo sviluppo di nuove funzionalità.

Al fine di garantire continuità al servizio in caso di guasti è presente un secondo server che ha la stessa configurazione di quello principale e che è in grado di prenderne automaticamente il posto qualora esso smetta di funzionare.

Le comunicazioni tra i mezzi e la centrale vengono gestite da due server denominati Front End Processor (FEP) che si occupano di formattare i dati provenienti dal server centrale in un formato idoneo ad essere inoltrato ai computer di bordo tramite rete Tetra o GPRS e viceversa, queste comunicazioni avvengono per mezzo di una connessione UDP. I server FEP si occupano anche di fornire ai depositi i dati relativi ai turni macchina che devono essere caricati sui mezzi tramite connessione Wi-Fi. La presenza di due diversi server FEP è necessaria a causa del fatto che sui mezzi di Tper sono in uso computer di bordo di due diversi fornitori che non sono compatibili tra di loro, il server che si interfaccia con i computer di bordo prodotti da Thetis è un IBM xSeries 336 mentre quello che si interfaccia con i computer di bordo di Powersoft è un HP Proliant DL360 g5, su entrambi è in esecuzione il sistema operativo Windows Server 2003. Per entrambi i server FEP è garantita la ridondanza tramite altri due server identici che ne prendono automaticamente il posto in caso di guasto.

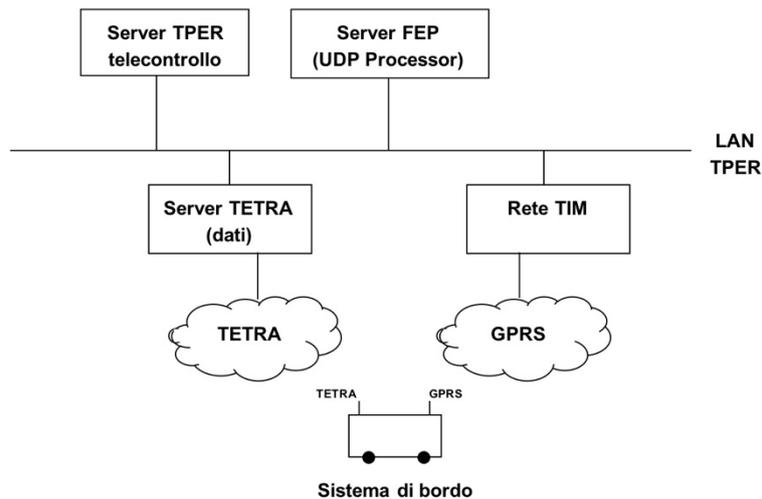


Figura 66: schema di collegamento tra il sistema Tetra e il telecontrollo

2.2.2 La sala di controllo

La sala di controllo di Tper è costituita da 4 postazioni operatore dotate ciascuna di una workstation con sistema operativo Linux, un telefono dal quale è possibile effettuare chiamate sia su rete telefonica che su Tetra, un microfono a collo di cigno ed un altoparlante, questi ultimi connessi direttamente all'unità GPIOM del sistema Dimetra.



Figura 67: vista della sala di controllo di Tper [35]

Sui computer degli operatori è possibile visualizzare in tempo reale la posizione degli autobus che sono in servizio su tutte le linee della rete di Tper; è disponibile sia una rappresentazione cartografica, in cui viene mostrata la posizione reale dei mezzi su di una mappa

stradale, sia una rappresentazione linearizzata in cui è possibile vedere in quale punto si trova ciascun mezzo rispetto all'intero percorso della linea sulla quale sta prestando servizio. La rappresentazione linearizzata risulta particolarmente rilevante perché permette di individuare a colpo d'occhio eventuali discrepanze tra la posizione effettiva del mezzo e la posizione teorica prevista dall'orario, infatti ciascun mezzo viene rappresentato da un quadratino riportante la sua matricola che si sposta in base alla posizione in cui esso si trova rispetto al percorso della linea e il cui sfondo cambia colore in base al fatto che l'autobus sia in orario, in anticipo o in ritardo [36].

Il software della centrale operativa si interfaccia con i sistemi GSM e Tetra e permette agli operatori di inviare chiamate vocali sia private che di gruppo ai mezzi e agli operatori dotati di radio portatile, per le quali è possibile utilizzare il telefono oppure il microfono e l'altoparlante. Agli operatori della centrale arrivano inoltre i messaggi precodificati che gli autisti inviano tramite il computer di bordo che vengono mostrati in base alla loro priorità.

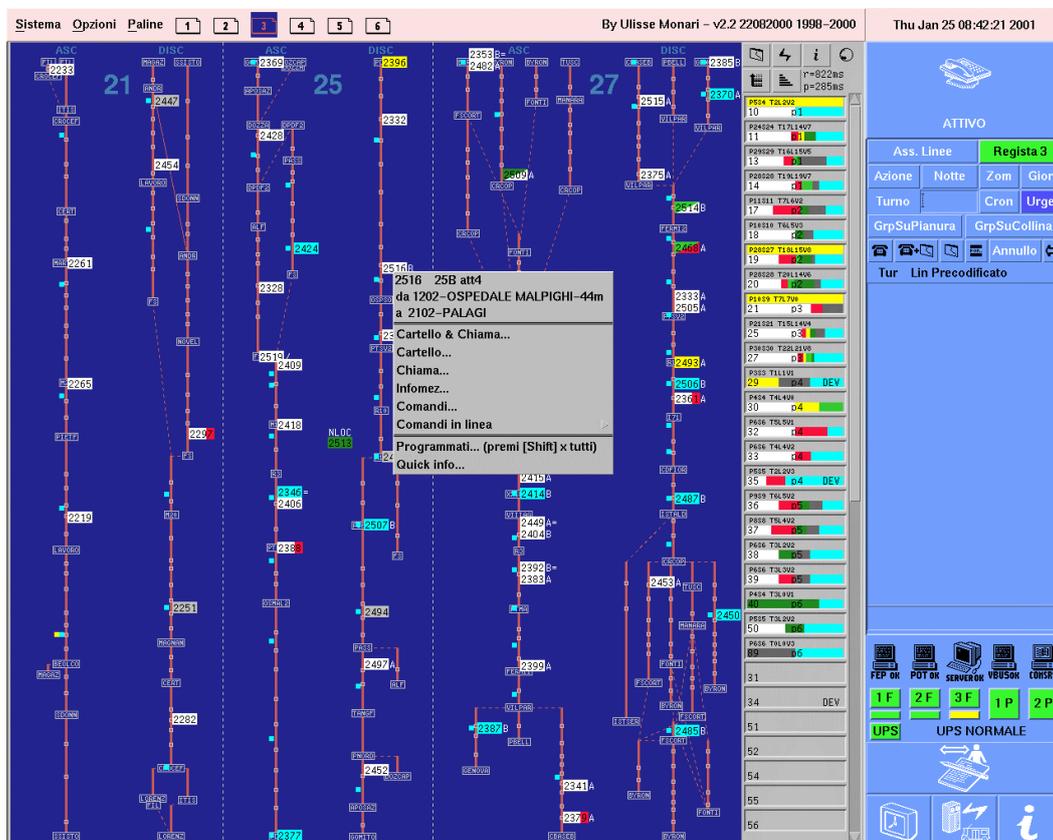


Figura 68: software dei pc della sala di controllo

2.2.3 Interfaccia tra il sistema Tetra e il telecontrollo

Per evitare di dover avere due terminali diversi per ogni operatore della centrale, uno per il sistema di telecontrollo e uno per il sistema Tetra, è stata realizzata una interfaccia che permette di comandare a distanza le consolle Motorola del sistema Dimetra direttamente dagli stessi computer utilizzati per il sistema di telecontrollo. Questo è reso possibile grazie alle API rese disponibili da Motorola e a un'applicazione server installata sulle consolle Motorola realizzata dalla ditta Saitel che permette ad esse di ricevere comandi dai computer del telecontrollo tramite una connessione TCP. Sui PC del telecontrollo è stata poi implementata una interfaccia grafica che permette di effettuare chiamate sia verso la rete Tetra che verso la rete GSM.

2.2.4 I computer di bordo

Su tutti gli autobus che fanno parte della flotta di Tper, siano essi urbani, suburbani o extraurbani è presente un computer di bordo che controlla tutti gli apparati tecnologici presenti sul mezzo e si occupa di gestire tutte le comunicazioni che avvengono tra il veicolo e la centrale operativa.

Il computer di bordo è costituito da un PC di tipo embedded dotato di un processore di tipo x86 sul quale è in esecuzione un software basato sul sistema operativo Linux al quale è abbinato un monitor touchscreen che permette all'autista di interagire con il sistema. Il computer è dotato di un modem GSM/GPRS integrato, di un ricevitore GPS e di un modulo Wi-Fi per il caricamento o scaricamento di dati in deposito. Al computer è collegata tramite un cavo multipolare una scatola di multiplazione sulla quale si trovano numerose porte, principalmente di tipo seriale, grazie alle quali è possibile connettere apparati di bordo quali la radio veicolare Tetra, le emettitrici e le obliterate per i titoli di viaggio, i display a led esterni che indicano la destinazione dell'autobus, le telecamere di videosorveglianza, gli altoparlanti per gli annunci vocali e vari tipi di sensori che indicano ad esempio lo stato del motore e delle porte o la distanza percorsa. Il

computer di bordo è in grado di scambiare dati con la centrale operativa del sistema di telecontrollo via GPRS per mezzo del modem integrato oppure tramite il servizio dati a pacchetto del sistema Tetra grazie alla connessione seriale con la radio veicolare Motorola (solo nei mezzi urbani e suburbani). In particolare, la connessione alla rete GPRS avviene non tramite la rete cellulare pubblica ma tramite un APN dedicato.

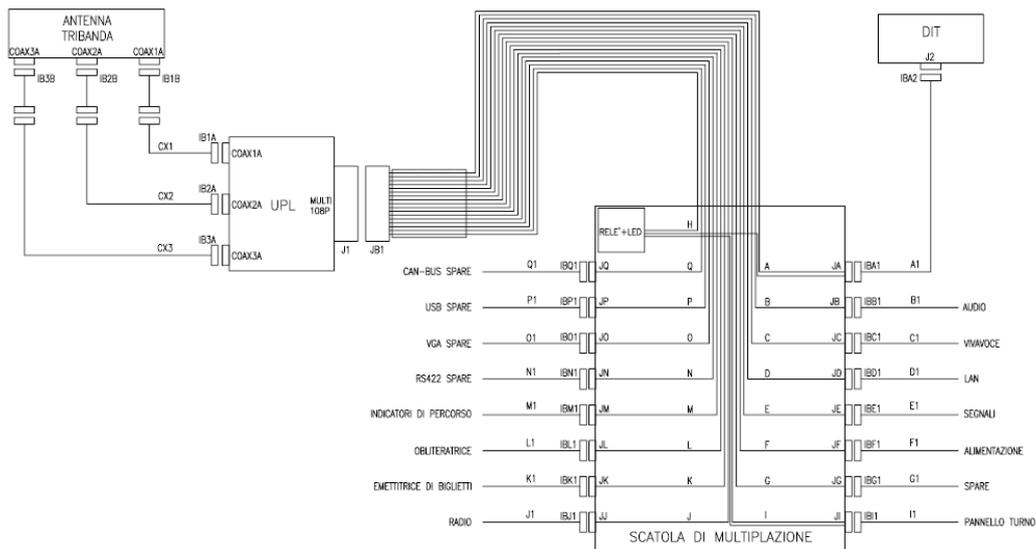


Figura 69: schema di collegamento del computer di bordo [54]

I computer di bordo che sono presenti sugli autobus di Tper appartengono a tre diverse forniture.

I computer della prima serie sono realizzati da Thetis e sono costituiti da una unità centrale denominata UPL040 dotata di un processore NS Geode GX1 a 266 MHz, 128 MB di RAM e una memoria Compact Flash da 128 MB che contiene il sistema operativo e i dati, alla quale è collegato un monitor touch-screen LCD da 5,7 pollici denominato DIT050.

I computer della seconda e terza serie sono stati forniti da Powersoft e sono costituiti da un'unità centrale denominata UCB dotata di un processore Intel Atom da 1,6 GHz, 512 MB di RAM e una memoria Compact Flash da 1 GB, tra le due serie quello che differisce è il monitor che nella seconda è uno Xenarc 80 mentre nella terza è un Powersoft Smartviewer.



Figura 70: unità centrale e monitor di un computer di bordo Thetis [54]

Su tutti i computer, indipendentemente dalla serie e dal produttore, è installato un software realizzato da Thetis e appositamente personalizzato per soddisfare le specifiche necessità di Tper.

Il software è organizzato in 6 diverse sezioni alle quali è possibile accedere tramite le apposite icone che compaiono sulla sinistra del touchscreen [36]:

- **Pagina iniziale:** è la pagina principale del sistema in cui sono indicati la data e l'orario del sistema e lo stato delle connessioni (GSM, Tetra, GPS, WLAN) oltre a tutte le informazioni di servizio quali turno macchina, linea, destinazione e fermate previste se il sistema è stato inizializzato.
- **Inizializzazione sistema:** permette di inizializzare il sistema tramite l'inserimento del numero del turno macchina e la selezione della corsa da effettuare.
- **Comunicazioni con la centrale operativa:** permette di inviare dei messaggi precodificati relativi a problemi di carattere operativo quali ritardi, blocchi alla circolazione, richieste di cambio autista, diverbi con i passeggeri.
- **Comunicazioni con l'officina:** permette di inviare dei messaggi precodificati relativi a problemi di tipo tecnico quali avarie, guasti e malfunzionamenti di apparati come obliterate e emettitrici di biglietti.
- **Ordini di servizio e messaggi:** mostra gli ordini di servizio e altri tipi di messaggi di testo che vengono inviati ai mezzi dalla centrale operativa.
- **Manutenzione:** permette di visualizzare informazioni di diagnostica sul sistema e di regolare le impostazioni.



Figura 71: schermata principale del computer di bordo [36]

Quando il computer di bordo viene avviato esso comunica l'avvenuta accensione alla centrale tramite un messaggio, e il mezzo viene iscritto nel gruppo dei non inizializzati. Per inizializzare il sistema l'autista deve inserire il turno macchina nell'apposita finestra e selezionare la corsa, una volta che ciò è stato fatto il computer comunica l'avvenuta inizializzazione alla centrale e il mezzo viene iscritto al gruppo degli inizializzati e al gruppo specifico della linea su cui ha preso servizio. I dati relativi ai turni macchina vengono caricati sul computer di bordo tramite connessione Wi-Fi quando i mezzi si trovano in deposito e possono essere aggiornati e modificati per mezzo della connessione GPRS.

2.3 Gestione delle comunicazioni tra la centrale e i mezzi

Per evitare di sovraccaricare il sistema con troppe chiamate è stato scelto di non permettere agli autisti degli autobus di aprire chiamate vocali siano esse via Tetra o via GSM.

Quando un autista vuole parlare con la centrale quello che deve fare è inviare ad essa una richiesta di fonia tramite un messaggio precodificato attraverso il computer di bordo indicando il motivo per il quale desidera effettuare la comunicazione, in base ad esso verrà attribuita una determinata priorità alla richiesta. Gli operatori della centrale ricevono i messaggi precodificati ordinati in base alla

priorità e compatibilmente con le risorse disponibili richiamano i mezzi che ne hanno fatto richiesta.

Gli operatori di centrale possono inviare chiamate private o di gruppo verso gli autobus utilizzando sia la rete GSM che la rete Tetra direttamente grazie ai computer del sistema di telecontrollo. È possibile selezionare il destinatario o i destinatari della chiamata semplicemente indicando la matricola del mezzo, il turno macchina o la linea, è il sistema che sulla base di queste informazioni recupera automaticamente il numero dell'utente o l'identificativo del gruppo da chiamare e inoltra la comunicazione al centralino telefonico o alle consolle Tetra.

Quando un operatore della centrale sul suo PC invia una chiamata Tetra essa viene inoltrata alla rispettiva consolle Motorola tramite l'applicazione Server Saitel presente su di essa e quindi al controllore centrale del sistema Dimetra che assegna le risorse necessarie alla comunicazione. Per la chiamata possono essere utilizzati sia il microfono a collo di cigno e l'altoparlante che sono connessi direttamente all'interfaccia GPIOM sia il telefono in dotazione al posto operatore in quanto le consolle sono connesse al centralino telefonico aziendale.

Quando invece viene inviata una chiamata GSM il computer la inoltra al server FEP corrispondente al tipo di computer di bordo installato sul mezzo destinatario che grazie all'interfaccia Windows TAPI (Telephone Application Programming Interface) la invia al centralino PABX EADS Nexspan XS12 che controlla la rete telefonica aziendale. Per la chiamata viene utilizzato il telefono in dotazione al posto operatore.

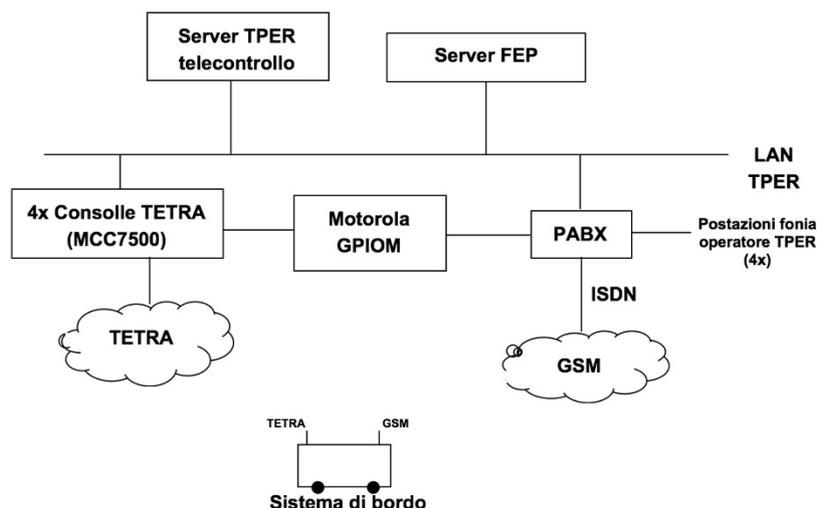


Figura 72: gestione delle comunicazioni vocali

2.3.1 Gestione delle emergenze

Su tutti gli autobus della flotta di Tper è installato nei pressi del posto di guida un pulsante a pedale che può essere premuto dall'autista in caso di pericolo per inviare una chiamata di emergenza. Per evitare che il sistema di emergenza venga azionato accidentalmente è previsto che per inviare la chiamata il pedale venga premuto due volte di seguito entro cinque secondi.

Quando viene inviata una chiamata di emergenza il computer di bordo del veicolo riporta un'apposita icona mentre nella sala di controllo gli operatori vengono allertati per mezzo di una segnalazione visiva e di un allarme sonoro.

Se il mezzo da cui è partita l'emergenza si trova all'interno dell'area di copertura del sistema Tetra viene aperta una chiamata di emergenza Tetra in modalità silenziosa tramite la quale gli operatori della centrale operativa possono ascoltare cosa avviene nei pressi del posto guida senza che nessuno sul mezzo se ne accorga, contemporaneamente tramite la connessione GPRS viene trasmesso ai PC degli operatori tutto ciò che viene ripreso dalla telecamera di videosorveglianza.

Se il mezzo invece si trova fuori dalla zona di copertura del sistema Tetra viene inoltrato alla centrale operativa solo l'audio per mezzo della connessione GSM mentre il video della telecamera non viene

trasmesso e rimane disponibile per essere scaricato successivamente tramite connessione Wi-Fi.

Per quanto riguarda invece le radio portatili Tetra, esse sono dotate di un apposito pulsante rosso di emergenza sulla parte superiore del dispositivo che deve essere tenuto premuto per almeno 5 secondi per fare partire una chiamata di emergenza Tetra che verrà ricevuta dalla centrale operativa.

Capitolo 3: Miglioramenti alla rete Tetra di Tper

3.1 Problemi di copertura nell'area urbana di Bologna

Sebbene la rete Tetra di Tper sia stata progettata e dimensionata per fornire una efficace copertura radio su tutta l'area urbana di Bologna, esistono delle zone all'interno della città nelle quali a causa della conformazione del territorio o della presenza di edifici o altri tipi di ostruzioni il segnale ricevuto dai terminali mobili risulta debole quindi, specie in caso di condizioni metereologiche avverse, può capitare che non sia possibile effettuare chiamate, che esse si interrompano o che la qualità dell'audio sia scadente a causa di echi e disturbi. Questo fenomeno affligge in modo particolarmente rilevante le radio portatili che vengono utilizzati dagli operatori dislocati sul campo che sono caratterizzate da basse potenze di trasmissione, limitata sensibilità e basso guadagno a causa delle ridotte dimensioni dell'antenna integrata, mentre risulta quasi trascurabile per quanto riguarda le radio veicolari installate sugli autobus che non solo dispongono di una potenza di trasmissione superiore e di una maggiore sensibilità ma che sono anche collegate ad un'antenna sul tetto del mezzo che ha dimensioni e guadagno notevoli oltre a trovarsi ad un'altezza superiore.

Alcune di queste zone in cui il segnale Tetra risulta scarso risultano però di particolare rilevanza strategica per il servizio di trasporto pubblico bolognese in quanto si tratta di strade in cui transitano molte linee di autobus e in cui si trovano molto spesso a lavorare gli operatori addetti al controllo della regolarità dell'esercizio, anche perché essendo zone centrali spesso vengono interessate da manifestazioni o altri eventi che comportano deviazioni o modifiche al servizio che necessitano di essere comunicate.

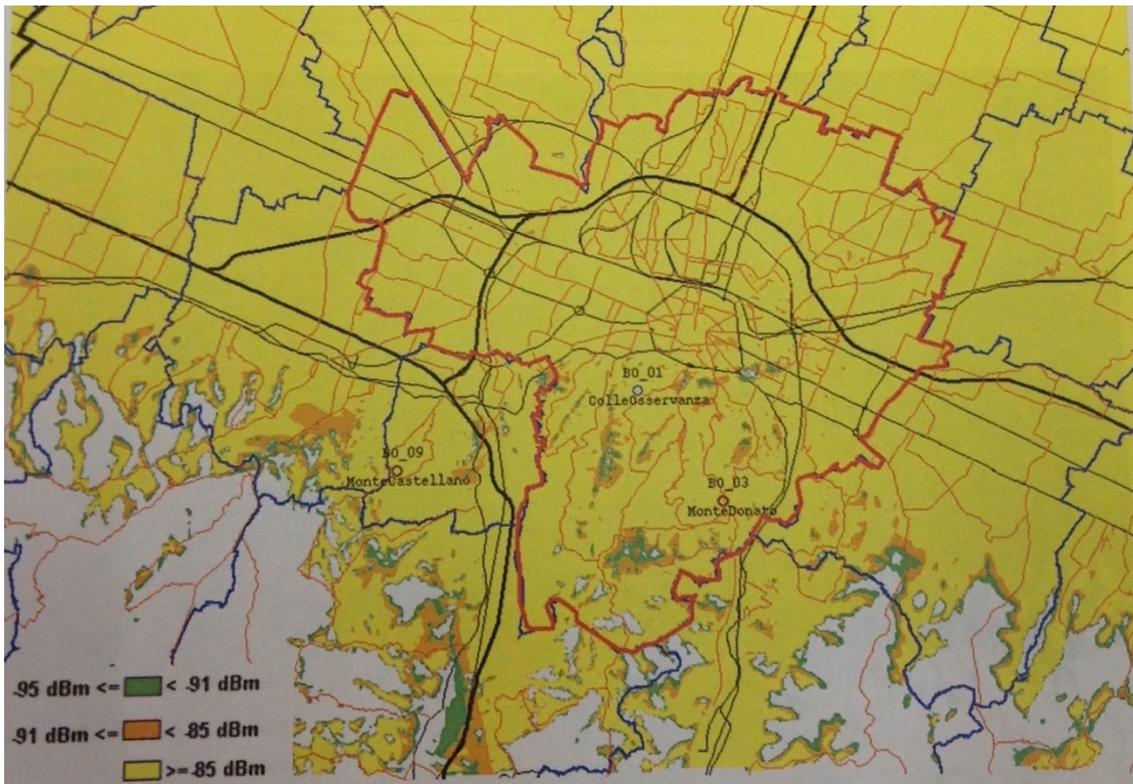


Figura 73: copertura del sistema Tetra nell'area urbana di Bologna [55]

Una zona particolarmente problematica per quanto riguarda la copertura Tetra è costituita dai viali Panzacchi e Aldini nel tratto compreso tra Porta Castiglione e Porta Saragozza e dalle strade limitrofe, in quest'area il segnale radio risulta scarso in quanto ci si trova ai piedi dei colli sui quali si trovano le stazioni radiobase. Per limitare l'entità di questo problema le antenne delle stazioni radiobase che inizialmente erano posizionate ortogonalmente rispetto al suolo sono state inclinate leggermente verso il basso al fine di offrire una migliore copertura nella zona pedecollinare, questa soluzione sebbene abbia migliorato la situazione non ha però risolto del tutto la questione.

Un'altra area dove la copertura risulta particolarmente problematica è quella che comprende alcuni tratti di via Farini e di altre vie limitrofe, qui il problema è causato dal fatto che si tratta di strade piuttosto strette circondate da alti palazzi con ampi portici che fanno sì che il segnale radio non possa arrivare direttamente ad un eventuale ricevitore ma solo tramite numerose riflessioni e diffrazioni che introducono una forte attenuazione.

Altro punto problematico è costituito dal tratto di via Rizzoli compreso tra Piazza Maggiore e le due torri dove si trova un ampio portico sotto il quale spesso si posizionano gli addetti all'esercizio per controllare la regolarità del servizio effettuato dalle numerose linee di autobus che transitano nella via.

3.1.1 Sostituzione dell'antenna delle radio portatili

Le radio portatili Motorola MTH800 attualmente in dotazione a Tper sono fornite in configurazione standard con un'antenna denominata Stubby (codice 8586381J10) che è caratterizzata da una lunghezza ridotta di soli 55 mm e permette di avere un dispositivo maneggevole al prezzo di un ridotto guadagno e quindi di prestazioni in ricezione limitate. Opzionalmente è però possibile acquistare un'antenna denominata Whip (codice 8586381J11) lunga 110 mm che è caratterizzata da un maggiore guadagno e permette quindi di ottenere prestazioni in ricezione leggermente superiori a parità di sensibilità della radio. Dalle prove effettuate sul campo nelle zone precedentemente citate in cui la ricezione risulta particolarmente problematica utilizzando due radio MTH800 identiche dotate però una dell'antenna Stubby e una dell'antenna Whip, è risultato che la potenza ricevuta, misurata grazie ad un'apposita funzionalità presente sui dispositivi, risulta di circa 2 dBm superiore nel caso dell'antenna Whip e quindi la radio che è equipaggiata con essa riesce a comunicare in alcune situazioni in cui l'altra si trova già fuori copertura, ciononostante il miglioramento è comunque contenuto.



Figura 74: confronto tra le antenne Whip e Stubby

3.1.2 Nuove radio portatili

Motorola negli ultimi anni ha introdotto un nuovo modello di radio portatile denominato MTP6550 che ha sostituito il vecchio modello MTH800 che ormai è diventato obsoleto. Le nuove radio, come è ragionevole pensare, introducono numerosi miglioramenti tecnologici e in particolare sono progettate per poter funzionare anche in condizioni particolarmente critiche per quanto riguarda la copertura. Le portatili MTP6550 sono innanzitutto caratterizzate da una maggiore sensibilità di ricezione rispetto alle vecchie MTH800 (-116 dBm contro -112 dBm di sensibilità statica e -105 dBm contro -103 dBm di sensibilità dinamica) che permette loro di ricevere correttamente le comunicazioni anche dove il segnale è più scarso, inoltre possono erogare in trasmissione fino a 1,8 W di potenza (classe 3L dello standard) contro 1W del vecchio modello grazie alla presenza di una modalità ad alta potenza, il che permette un sensibile miglioramento per quanto riguarda le comunicazioni dalla portatile alla stazione radiobase. Infine, le nuove radio possiedono anche altoparlanti più potenti (3W contro 1W del vecchio modello) quindi l'audio delle comunicazioni risulta essere più chiaro e squillante e quindi meglio comprensibile anche in presenza di echi o disturbi.



Modello	Motorola MTP6550
Dimensioni	132x59x34 mm
Peso	292 g

Banda di frequenza	370-470 MHz
Potenza altoparlanti	3W
Potenza RF	1.8 W (classe 3L) – 1 W (classe 4)
Sensibilità statica	-114 dBm minima, -116 dBm tipica
Sensibilità dinamica	-105 dBm minima, -107 dBm tipica
Capacità batteria	1650 mAh (opzionale 2150 mAh)

Le prove effettuate sul campo grazie a due radio del nuovo modello ottenute in prestito da Motorola hanno confermato che effettivamente con questi nuovi dispositivi portatili risulta più facile effettuare comunicazioni in quelle situazioni in cui la copertura è scarsa, come ad esempio nella zona pedecollinare, sotto ai portici o all'interno di gallerie di negozi, infatti molto spesso dove la vecchia radio ha già perso il segnale la nuova risulta essere ancora sotto copertura. Altri aspetti positivi che sono stati evidenziati dalle prove sul campo sono la maggiore qualità dell'audio resa possibile dagli altoparlanti più potenti e la maggior autonomia grazie alle batterie caratterizzate da una capacità più elevata di quelle installate sul vecchio modello.

Le nuove radio inoltre introducono anche altre caratteristiche interessanti: possiedono innanzitutto delle batterie caratterizzate da una capacità superiore che permette di avere una maggiore autonomia, come riscontrato anche nelle prove sul campo, sono dotate di connessione Bluetooth che rende possibile collegare accessori come auricolari wireless e che permette anche di accoppiare alla radio un cellulare sul quale inoltrare le chiamate, e inoltre possiedono uno slot per una scheda micro SD da utilizzare come memoria per eventuali file ricevuti tramite il servizio di trasmissione dati.

Visto l'esito positivo delle prove e considerato il fatto che alcune delle 55 radio del lotto originario nel corso degli anni sono diventate indisponibili a causa di smarrimenti o guasti e necessitano di essere

sostituite, Tper sta valutando di acquistare alcune radio del nuovo modello che verranno inizialmente assegnate agli addetti all'esercizio (AE), che tra gli utenti della rete sono coloro che più spesso si trovano a dover comunicare in situazioni difficili per quanto riguarda la copertura.

3.2.2 Utilizzo di radio come DMO Gateway

Lo standard Tetra, come mostrato nel primo capitolo, prevede la possibilità di utilizzare una radio come DMO-Gateway per estendere la copertura di rete in zone non coperte o scarsamente coperte dal segnale delle stazioni radiobase. Il dispositivo gateway deve essere configurato per fare da tramite tra gli altri dispositivi mobili ad esso connessi in modalità diretta e l'infrastruttura di rete fissa. Le radio dotate della funzionalità di gateway solitamente sono dei dispositivi veicolari.

L'utilizzo di una radio configurata come gateway potrebbe essere una soluzione ai problemi di copertura nelle zone precedentemente citate in cui il segnale proveniente dalle stazioni radiobase risulta troppo scarso per permettere di comunicare efficacemente. In particolare, si potrebbe pensare di installare delle radio veicolari dotate della funzione di gateway sulle automobili utilizzate dagli addetti all'esercizio in modo tale che le radio portatili che si trovino nel raggio di alcune centinaia di metri da esse possano comunicare senza problemi anche se si trovano in posizioni non raggiunte dal segnale delle stazioni radiobase. Un'altra idea potrebbe essere quella di installare delle radio configurate come gateway in maniera fissa nelle paline di fermata site nei pressi di quelle zone in cui la copertura di rete è scarsa in modo tale da permettere alle radio portatili che si trovino nelle vicinanze di comunicare per tramite di esse, in tal caso sarebbe necessario però verificare presso il ministero la fattibilità a livello normativo.

Le radio veicolari del modello MTM800 attualmente in dotazione a Tper purtroppo non possiedono la funzionalità di gateway, essa risulta però presente sul nuovo modello MTM5400 che lo ha sostituito e che Tper è comunque intenzionata ad acquistare in qualche decina

di esemplari per equipaggiare i nuovi autobus che verranno immessi prossimamente sulla rete di trasporto pubblico di Bologna.

Le radio MTM5400 sono piuttosto simili al modello già in uso presso Tper però presentano alcuni miglioramenti tecnologici, quali una maggiore potenza RF (10W contro 3W), la possibilità di essere utilizzate come Repeater o Gateway in DMO, una migliore sensibilità sia statica che dinamica e la predisposizione per la versione 2 dello standard Tetra.

Al momento Motorola si è impegnata a fornire in prova nel corso delle prossime settimane una radio del nuovo modello al fine sia di testarne la funzionalità sia di valutarne la possibilità di utilizzo in modalità gateway.



Modello	Motorola MTM5400 Databox
Dimensioni	45x170x169 mm
Peso	1070
Banda di frequenza	370-470 MHz
Alimentazione	10,8/14,6 V DC
Potenza RF	10 W (classe 2) per Tetra 1, 3W per Tetra 2
Sensibilità statica	-114 dBm minima, -116 dBm tipica
Sensibilità dinamica	-105 dBm minima, -107 dBm tipica
Interfacce	RS232, USB 2.0, 7 I/O digitali, 4 I/O analogici
Funzionalità DMO	DMO Repeater, DMO Gateway

3.2 Miglioramento del collegamento con il sito di Tizzano

Mentre i siti di Colle Osservanza e di Monte Donato si trovano in zone tutto sommato vicine ai centri abitati, quello di Tizzano si trova in una posizione piuttosto isolata, per questa ragione il tratto di linea CDN tra la stazione radiobase e la centrale telefonica di Telecom alla quale essa è collegata risulta essere lungo svariati chilometri e necessita della presenza di numerosi rigeneratori di segnale.

Questo collegamento dovendo attraversare zone rurali e collinari è realizzato per la maggior parte del suo percorso con una linea aerea su pali che spesso, specie a seguito di eventi metereologici di una certa portata, è soggetta a guasti e disservizi che richiedono l'intervento dei tecnici di Telecom e che lasciano la stazione radiobase isolata anche per diversi giorni compromettendone il corretto funzionamento.



Figura 75: stazione radiobase di Tizzano

Per questa ragione risulta ragionevole valutare l'opportunità di sostituire questo collegamento con uno realizzato con una tecnologia più affidabile o quanto meno di affiancare ad esso un secondo collegamento di backup che sia in grado di garantire la continuità delle comunicazioni anche quando la linea primaria non è disponibile a causa di guasti. In questo secondo caso però bisogna tenere presente

il fatto che la stazione radiobase al momento non è dotata dell'hardware necessario a gestire un doppio collegamento ridondato quindi risulterebbe necessario aggiornare il controllore di sito con una scheda hardware aggiuntiva che gestisca il secondo collegamento oppure installare un dispositivo esterno in grado di gestire due collegamenti a partire dall'unica uscita presente sulla stazione radiobase, soluzioni che hanno entrambe un costo non trascurabile.

La soluzione più semplice al problema potrebbe sembrare a prima vista quella di noleggiare una seconda linea CDN da Telecom che sostituisca quella principale quando essa si guasta, ad un'analisi più approfondita questa però non risulta essere una scelta opportuna in quanto le due linee sicuramente seguirebbero lo stesso identico percorso quindi sarebbero soggette esattamente agli stessi problemi, quindi nel caso una risultasse guasta sarebbe molto probabilmente lo sarebbe anche l'altra.

Vista la posizione isolata in cui si trova il sito e la distanza con le centrali telefoniche non risultano disponibili altre opzioni di collegamento via cavo in quanto gli operatori telefonici non coprono questa zona con connessioni internet in fibra ottica o adsl quindi occorre orientarsi per forza verso collegamenti di tipo wireless.

Dato che attualmente il sistema supporta per il collegamento con le stazioni radiobase unicamente collegamenti di tipo E1, nel caso si intenda utilizzare come collegamento alternativo delle connessioni di tipo IP bisogna preventivare la necessità di appositi apparati che permettano di adattare le trame E1 per poter viaggiare su un collegamento dati a pacchetto. Questo è possibile grazie ad una tecnologia, standardizzata da ETSI ed ITU, nota con i nomi di "TDM-over-IP", "pseudowire" o "circuit emulation" che permette di emulare un collegamento a commutazione di circuito su una rete a commutazione di pacchetto semplicemente incapsulando le trame E1 in pacchetti IP che sfruttano UDP come protocollo di trasporto. La maggiore criticità di questa operazione consiste nel fatto che le tecnologie trasmissive di tipo PDH come l'E1 essendo basate sulla moltiplicazione a divisione di tempo hanno requisiti piuttosto stringenti per quanto riguarda i ritardi introdotti dai collegamenti e

la loro variabilità mentre i ritardi introdotti dai sistemi trasmissivi basati sul protocollo IP sono estremamente variabili, questo problema può essere però arginato introducendo dei buffer che compensino le eventuali oscillazioni temporali (jitter).

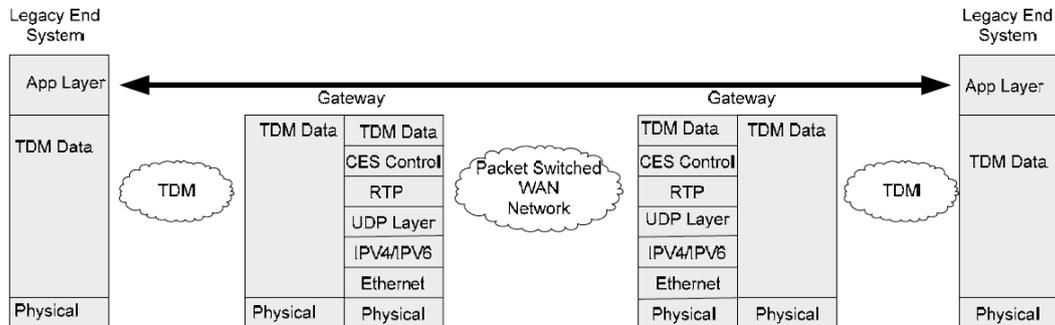


Figura 76: TDM circuit emulation su IP [8]

Bit								Octets
8	7	6	5	4	3	2	1	
IP version				IHL				1
IP TOS								2
Total length								3-4
Identification								5-6
Flags				Fragment offset				7
Time to Live (TTL)								8
Protocol								9
IP header checksum								10
Source IP address								11-12
Destination IP address								13-16
Source UDP port number								17-20
Destination UDP port number								21-22
UDP Length								23-24
UDP checksum								25-26
Reserved				L	R	M		27-28
FRAG				Length				29
Sequence number								30
Adapted payload								31-32
								33-n

Figura 77: incapsulamento delle trame E1 su pacchetti UDP [53]

3.2.1 Collegamento di backup tramite rete cellulare 4G

L'idea più semplice e immediata per realizzare una connessione dati alternativa è quella di utilizzare come collegamento di backup una connessione internet cellulare, possibilmente utilizzando la tecnologia 4G che garantisce migliori prestazioni sia in termini di banda che di ritardi.

Per poter implementare il collegamento occorre installare un router 4G dotato di relativa SIM nei pressi della stazione radiomobile mentre dal lato del controllore centrale è sufficiente connettersi ad internet tramite la rete aziendale. Dato che, come già osservato precedentemente, le stazioni radiobase utilizzano una connessione di

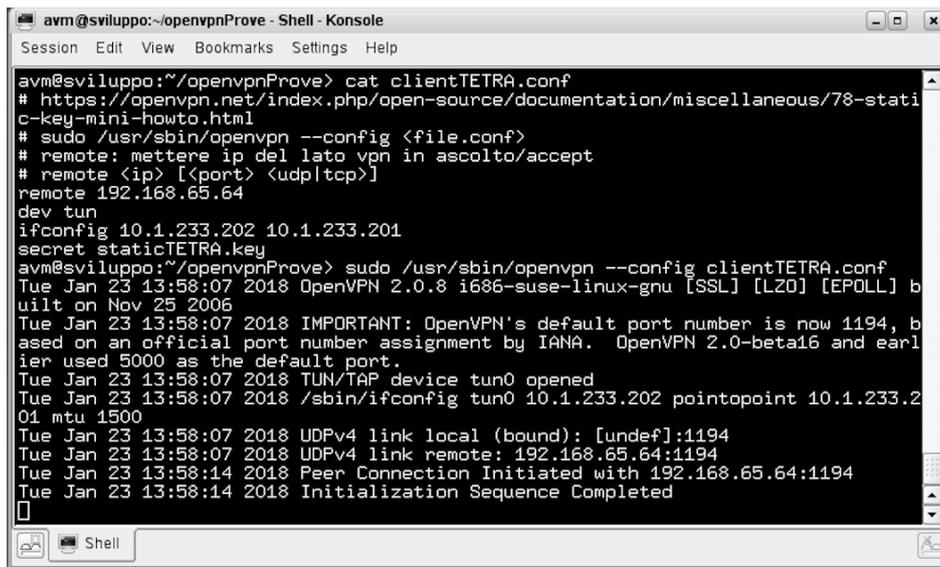
tipo E1 è necessario anche prevedere ai due estremi del collegamento due dispositivi che siano in grado di inoltrare le trame E1 sul collegamento internet 4G che si basa su IP.

Dato che il collegamento avviene tramite la rete cellulare pubblica di un operatore di telefonia per ragioni di sicurezza risulta consigliabile implementare una VPN tra la stazione radiobase e il controllore centrale in modo tale che i dati inviati siano al sicuro da eventuali intercettazioni.



Figura 78: router 4G Teltonika RUT955 [54]

Per verificare la fattibilità di questa soluzione sono state effettuate delle prove di collegamento tra un router 4G del modello Teltonika RUT955 dotato di una SIM TIM e un computer dotato di sistema operativo Linux collegato alla rete aziendale tra i quali è stata implementata una VPN realizzata tramite la tecnologia OpenVPN, la quale è stata scelta perché di facile configurazione e perché già supportata nativamente dal router. In particolare, il router è stato configurato come server e gli è stato assegnato l'indirizzo IP 10.1.233.201 mentre il computer è stato utilizzato come client con l'IP 10.1.233.202, la porta è quella assegnata di default ad OpenVPN cioè 1194 e il protocollo di trasporto è UDP.



```
avm@sviluppo:~/openvpnProve - Shell - Konsole
Session Edit View Bookmarks Settings Help

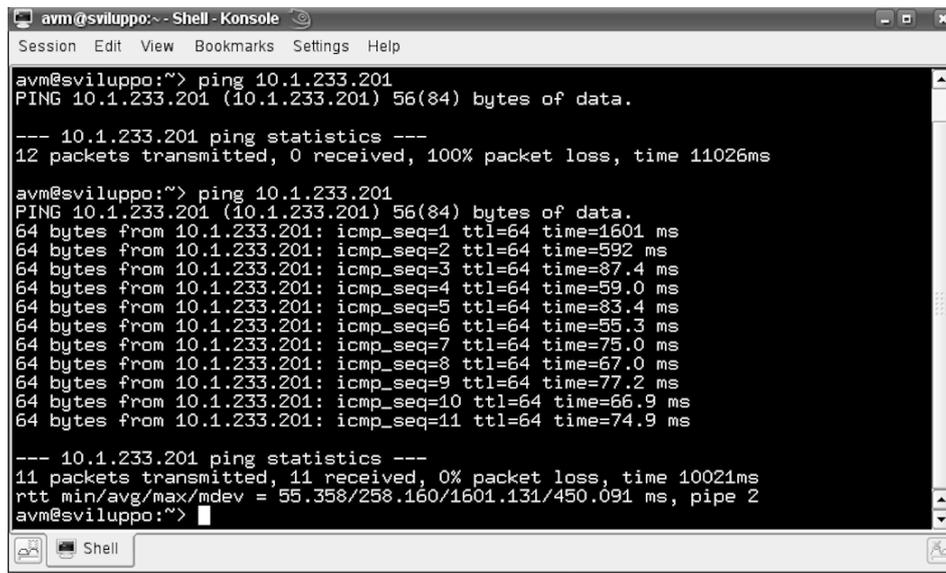
avm@sviluppo:~/openvpnProve> cat clientTETRA.conf
# https://openvpn.net/index.php/open-source/documentation/miscellaneous/78-static-key-mini-howto.html
# sudo /usr/sbin/openvpn --config <file.conf>
# remote: mettere ip del lato vpn in ascolto/accept
# remote <ip> [<port> <udp/tcp>]
remote 192.168.65.64
dev tun
ifconfig 10.1.233.202 10.1.233.201
secret staticTETRA.key
avm@sviluppo:~/openvpnProve> sudo /usr/sbin/openvpn --config clientTETRA.conf
Tue Jan 23 13:58:07 2018 OpenVPN 2.0.8 1686-suse-linux-gnu [SSL] [LZO] [EPOLL] built on Nov 25 2006
Tue Jan 23 13:58:07 2018 IMPORTANT: OpenVPN's default port number is now 1194, based on an official port number assignment by IANA. OpenVPN 2.0-beta16 and earlier used 5000 as the default port.
Tue Jan 23 13:58:07 2018 TUN/TAP device tun0 opened
Tue Jan 23 13:58:07 2018 /sbin/ifconfig tun0 10.1.233.202 pointopoint 10.1.233.201 mtu 1500
Tue Jan 23 13:58:07 2018 UDPv4 link local (bound): [undef]:1194
Tue Jan 23 13:58:07 2018 UDPv4 link remote: 192.168.65.64:1194
Tue Jan 23 13:58:14 2018 Peer Connection Initiated with 192.168.65.64:1194
Tue Jan 23 13:58:14 2018 Initialization Sequence Completed
```

Figura 79: configurazione e avvio di un client OpenVPN in ambiente Linux

Sono state poi effettuate delle prove di connettività, con la misurazione di banda e latenza, nei pressi della stazione radiobase che hanno evidenziato che la zona risulta effettivamente coperta in tecnologia 4G da tutti i principali operatori, la banda e la latenza risultano però piuttosto variabili il che potrebbe essere problematico per quanto riguarda la trasmissione di chiamate vocali che potrebbero sperimentare ritardi ed echi che rischierebbero di compromettere la qualità della comunicazione, inoltre talvolta si verificano temporanee perdite di connessione che potrebbero essere ricollegabili ad interferenze dovute alla presenza nei pressi del sito di ripetitori della TV digitale terrestre. Bisogna inoltre tener conto che la rete utilizzata è un'infrastruttura cellulare pubblica con tutte le relative implicazioni in termini di sicurezza ed affidabilità.

Per le ragioni sopra descritte risulta che un collegamento 4G difficilmente potrebbe costituire una valida alternativa per sostituire in maniera completa l'attuale collegamento CDN in quanto è in grado di garantire prestazioni abbastanza limitate e variabili nel tempo nonostante questa tecnologia potrebbe essere utilizzata per realizzare un collegamento secondario di backup che intervenga solo nei casi in cui la linea CDN non sia disponibile, in tal caso però bisognerebbe tenere conto dei costi aggiuntivi necessari per installare l'hardware aggiuntivo necessario per implementare la ridondanza in

quanto, come già mostrato precedentemente, le stazioni radiobase attualmente supportano un solo collegamento.



```
avm@sviluppo:~ - Shell - Konsole
Session Edit View Bookmarks Settings Help

avm@sviluppo:~> ping 10.1.233.201
PING 10.1.233.201 (10.1.233.201) 56(84) bytes of data.

--- 10.1.233.201 ping statistics ---
12 packets transmitted, 0 received, 100% packet loss, time 11026ms

avm@sviluppo:~> ping 10.1.233.201
PING 10.1.233.201 (10.1.233.201) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 10.1.233.201: icmp_seq=1 ttl=64 time=1601 ms
64 bytes from 10.1.233.201: icmp_seq=2 ttl=64 time=592 ms
64 bytes from 10.1.233.201: icmp_seq=3 ttl=64 time=87.4 ms
64 bytes from 10.1.233.201: icmp_seq=4 ttl=64 time=59.0 ms
64 bytes from 10.1.233.201: icmp_seq=5 ttl=64 time=83.4 ms
64 bytes from 10.1.233.201: icmp_seq=6 ttl=64 time=55.3 ms
64 bytes from 10.1.233.201: icmp_seq=7 ttl=64 time=75.0 ms
64 bytes from 10.1.233.201: icmp_seq=8 ttl=64 time=67.0 ms
64 bytes from 10.1.233.201: icmp_seq=9 ttl=64 time=77.2 ms
64 bytes from 10.1.233.201: icmp_seq=10 ttl=64 time=66.9 ms
64 bytes from 10.1.233.201: icmp_seq=11 ttl=64 time=74.9 ms

--- 10.1.233.201 ping statistics ---
11 packets transmitted, 11 received, 0% packet loss, time 10021ms
rtt min/avg/max/mdev = 55.358/258.160/1601.131/450.091 ms, pipe 2
avm@sviluppo:~>
```

Figura 80: misura della latenza del collegamento tramite 4G

3.2.2 Collegamento tramite ponte radio

Un'alternativa decisamente più affidabile ma anche più costosa potrebbe essere quella di installare un ponte radio numerico per sostituire o affiancare la linea CDN.

Un ponte radio è un sistema di trasmissione a radiofrequenza che realizza un collegamento punto-punto tramite l'impiego di antenne caratterizzate da un'elevata direttività, molto spesso di tipo parabolico. Questi sistemi funzionano tipicamente a frequenze di alcuni GHz, nell'ambito delle cosiddette microonde, e pur utilizzando potenze di trasmissione piuttosto contenute, tipicamente comprese tra 0,5 e 20W, riescono a coprire distanze molto elevate grazie all'elevato guadagno delle antenne direttive. Per questa ragione molto spesso invece della potenza di trasmissione si preferisce tenere conto di un parametro detto EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power) che è definito come il prodotto (o la somma nel caso si ragioni in dB) della potenza trasmessa per il guadagno dell'antenna [42].

La maggior parte dei ponti radio sono in grado di funzionare solo in linea di vista (LOS – Line of Sight) quindi necessitano della visibilità ottica tra le due antenne, anche se di recente sono state presentate soluzioni che utilizzando particolari schemi di modulazione come

l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) e tecniche di diversità sono in grado di operare anche in condizioni in cui la linea di vista sia parzialmente (nLOS – Near Line of Sight) o completamente ostruita (NLOS – Non Line of Sight), queste tecnologie però risultano essere solitamente più complesse e costose. Per un dimensionamento di massima del ponte radio è possibile utilizzare la formula di Friis che permette di calcolare la potenza ricevuta data la potenza trasmessa, la distanza, i guadagni delle antenne, la frequenza ed eventuali attenuazioni:

$$P_R = P_T + G_T + G_R - A_T - A_R - A_S$$

Dove:

- P_R e P_T sono rispettivamente la potenza ricevuta e la potenza trasmessa.
- G_T e G_R sono i guadagni delle antenne trasmittente e ricevente.
- A_T e A_R sono le attenuazioni aggiuntive dovute ai cavi o alle guide d'onda.
- A_S è l'attenuazione di spazio libero che dipende dalla distanza R e dalla lunghezza d'onda λ e vale: $A_S = 10 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2$.

Inoltre, potrebbe essere necessario prevedere dei margini aggiuntivi per tener conto dei fenomeni di fading causati dalla presenza di ostacoli (fading lento) e cammini multipli (fading rapido) e dell'attenuazione aggiuntiva presente in caso di pioggia.

I componenti che costituiscono tipicamente un ponte radio sono [43]:

- Antenne: si tratta solitamente di antenne caratterizzate da un'alta direttività che quindi hanno un elevato guadagno.
- Unità IDU (Indoor Unit): costituisce l'interfaccia con l'utente ed è dotata delle interfacce fisiche per le connessioni esterne, tipicamente si trova al coperto in un ambiente protetto.
- Unità ODU (Outdoor Unit): costituisce l'interfaccia radio ed è direttamente connessa all'antenna, tipicamente è posizionata all'esterno.

La complessità e le caratteristiche delle unità IDU e ODU sono estremamente variabili e dipendono fortemente dalle scelte

tecnologiche adottate per lo specifico ponte radio, infatti gli apparati necessari al funzionamento del ponte radio quali modulatori e demodulatori, codificatori e decodificatori, filtri e amplificatori a RF possono essere posizionati in una o nell'altra unità a seconda delle scelte del costruttore. IDU e ODU sono connessi tra di loro e con le antenne per mezzo di cavi coassiali o guide d'onda caratterizzate da basse perdite.

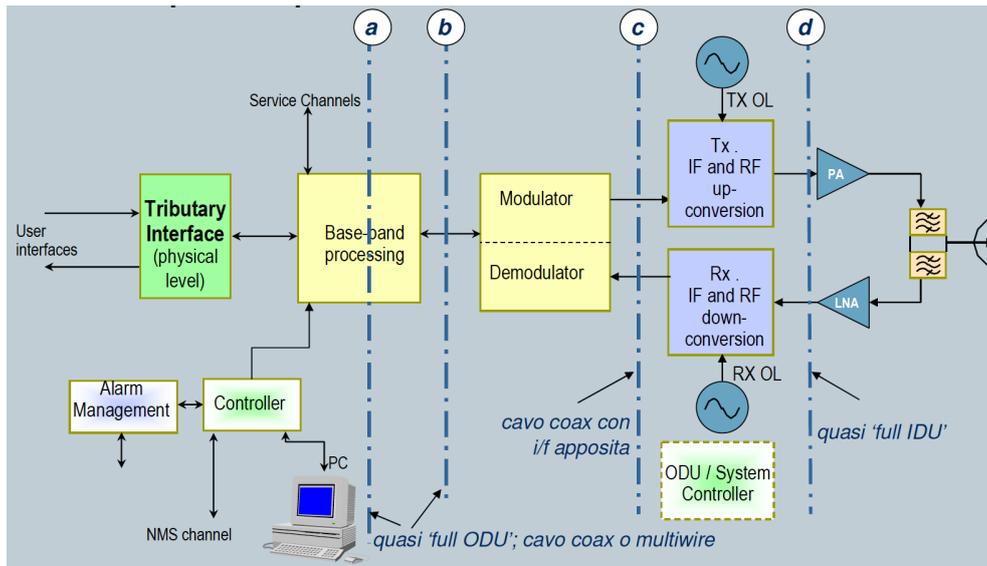


Figura 81: componenti di un ponte radio e possibili ripartizioni tra IDU e ODU [43]

3.2.2.1 Scelta della tratta radio

Per quanto riguarda la tratta sulla quale realizzare il ponte radio la scelta più semplice e immediata risulta essere senz'altro quella di collegare direttamente la stazione radiobase di Tizzano con la sede di Tper di via di Saliceto presso la quale si trova il controllore centrale del sistema Tetra. Dalle misure effettuate risulta che in tal caso la lunghezza totale della tratta sarebbe di 9,86 km, una distanza che può tranquillamente essere coperta dai ponti radio disponibili in commercio.



Figura 82: distanza tra il ponte radio di Tizzano e la sede di Tper

Siccome la maggior parte delle tecnologie per la realizzazione di ponti radio richiedono la visibilità ottica tra le due antenne, grazie ad appositi software è stato tracciato il profilo altimetrico della tratta tra il sito di Tizzano e la centrale e da esso è risultato che tra i due punti vi è visibilità dal punto di vista orografico, ciononostante bisogna tenere presente che la tratta si trova ad attraversare diametralmente tutto il centro urbano di Bologna quindi risulta molto probabile che vi siano edifici o altri ostacoli che blocchino la linea di vista, in modo particolare nei pressi della sede aziendale si trovano dei palazzi con numerosi piani che potrebbero costituire delle ostruzioni di una certa rilevanza.

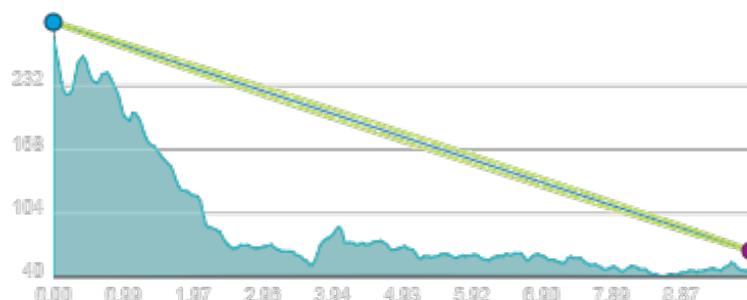


Figura 83: profilo altimetrico della tratta tra Tizzano e la sede Tper

Una seconda opzione che potrebbe essere tenuta in considerazione è quella di realizzare il ponte radio tra la stazione radiobase di Tizzano

e il deposito di autobus che Tper possiede in via Battindarno a Bologna il quale è connesso alla sede centrale dell'azienda tramite un collegamento in fibra ottica ad alta capacità sul quale potrebbe poi essere convogliato il traffico Tetra destinato al controllore centrale. In questo caso, essendo il deposito molto più vicino al sito di Tizzano rispetto alla sede centrale, la tratta da coprire si riduce ad una distanza di 5,76 km.



Figura 84: distanza tra la stazione radiobase di Tizzano e il deposito Battindarno

Per quanto riguarda la visibilità ottica tra i due punti da collegare dal profilo altimetrico realizzato via software si deduce che dal punto di vista orografico non risultano esserci ostruzioni, inoltre dato che in questo caso si attraversano rispetto al caso precedente meno zone edificate risulta più probabile che la tratta non sia ostacolata dalla presenza di edifici alti. Inoltre, presso il deposito si trovano diversi tralicci di altezza elevata attualmente utilizzati per l'illuminazione, sui quali si potrebbe pensare di installare l'antenna del ponte radio in

modo da collocarla ad un'altezza superiore sovrastando in tal modo eventuali ostruzioni che ci siano sul percorso.

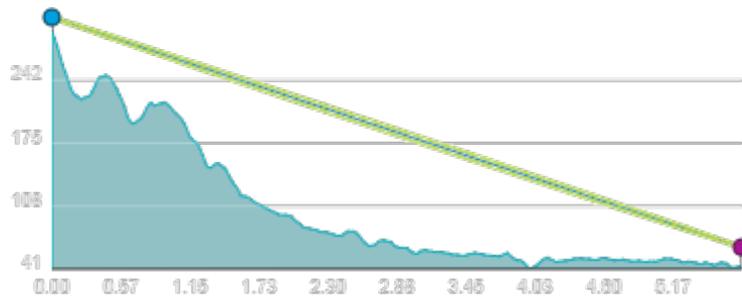


Figura 85: profilo altimetrico della tratta tra Tizzano e Battindarno

Un'ulteriore alternativa potrebbe essere quella di collegare con un ponte radio la stazione radiobase di Tizzano con quella di Colle Osservanza e poi convogliare il traffico diretto alla centrale sul collegamento presente in loco che risulta essere più affidabile. In tal caso bisognerebbe verificare se la capacità del collegamento CDN è sufficiente a trasportare il traffico di entrambe le stazioni radiobase e si dovrebbe anche tenere in conto che scegliendo questa soluzione ci si troverebbe ad avere due stazioni radiobase che dipendono dal funzionamento di un unico collegamento, cosa che non è molto consigliabile dal punto di vista dell'affidabilità della rete nel suo complesso.



Figura 86: distanza tra il sito di Tizzano e quello di Colle Osservanza

Per quanto riguarda la tratta radio, in tal caso la distanza da coprire è di 6,56 km, il profilo altimetrico è tale da garantire la visibilità orografica e dato che il collegamento attraversa unicamente zone rurali poco edificate risulta molto improbabile che ci siano ostruzioni alla linea di vista dovute alla presenza di edifici.

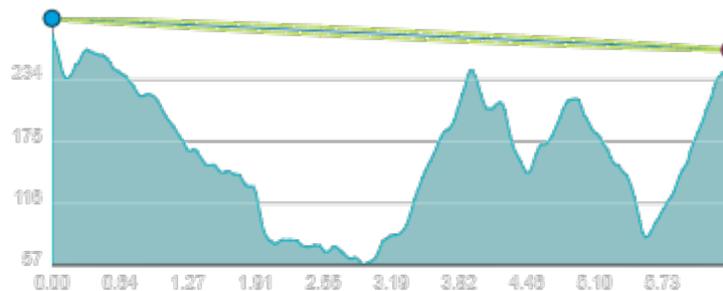


Figura 87: profilo altimetrico della tratta tra Tizzano e Osservanza

Si potrebbe pensare anche di installare una seconda tratta in ponte radio tra Colle Osservanza e la sede di Tper, questa soluzione avrebbe anche come vantaggio il fatto che permetterebbe di avere un collegamento alternativo utilizzabile anche per la stazione radiobase di Colle Osservanza oltre che per quella di Tizzano, però i costi sarebbero decisamente maggiori vista la necessità di dover installare e mantenere due ponti radio. Anche in questo caso è stato verificato tramite tracciamento del profilo altimetrico che la linea di vista non risulta ostruita dal punto di vista orografico ma bisognerebbe verificare che non ci siano ostacoli dovuti ad edifici vista la necessità di attraversare l'area urbana.

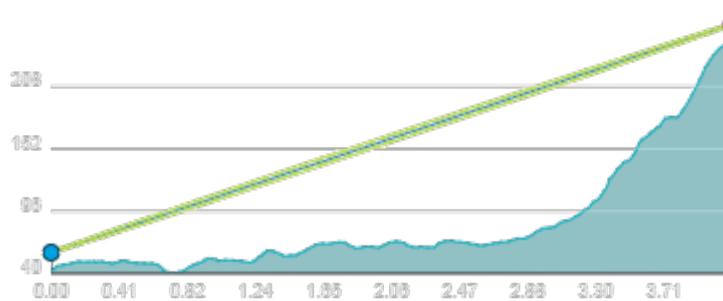


Figura 88: profilo altimetrico della tratta tra Osservanza e la sede Tper

3.2.2.2 Ponte radio in banda non licenziata

Relativamente alla scelta delle frequenze da utilizzare per il ponte radio una possibilità è quella di scegliere una banda non licenziata, il che significa che non è necessario richiedere nessuna

autorizzazione al ministero e che non occorre pagare nessun canone per l'affitto delle frequenze. Esistono infatti delle porzioni di spettro elettromagnetico che sono state riservate nel piano nazionale di ripartizione delle frequenze, in ottemperanza alle disposizioni internazionali emanate dall'ITU e dall'ETSI, al libero utilizzo per applicazioni in ambito privato, scientifico e industriale. La banda tipicamente impiegata per i ponti radio non licenziati è quella compresa tra i 5,470 e i 5,725 GHz (Banda ETSI B 5,4 GHz) sulla quale in Europa possono essere utilizzati liberamente apparati radio caratterizzati da un valore massimo dell'EIRP di 2W (Raccomandazione CEPT ERC 70-03).

L'utilizzo di una banda non licenziata sicuramente risulta economico in quanto non vi è la necessità di pagare nessun canone di concessione per l'utilizzo delle frequenze, quindi il costo totale del ponte radio è costituito unicamente dai costi iniziali relativi all'acquisto e all'installazione degli apparati, d'altra parte però non si ha diritto all'utilizzo esclusivo della banda di frequenza il che comporta che potrebbero esserci altri dispositivi che trasmettono sulle stesse frequenze causando delle interferenze che potrebbero compromettere la qualità e l'affidabilità delle trasmissioni.

Per le ragioni sopra enunciate un ponte radio in banda non licenziata potrebbe essere tenuto in considerazione per realizzare un collegamento alternativo di backup relativamente economico da utilizzare nel caso la connessione CDN non sia temporaneamente disponibile, ma difficilmente potrebbe costituire una valida alternativa per sostituire completamente la linea cablata in quanto non sarebbe in grado di garantire una sufficiente affidabilità.

Nel caso si decidesse di realizzare un ponte radio in banda non licenziata potrebbero essere utilizzati ad esempio apparati realizzati da Motorola facenti parte della piattaforma Canopy MotoWI 4 la quale comprende vari tipi di dispositivi utilizzabili per realizzare collegamenti radio a larga banda sia di tipo punto-punto che punto-multipunto. Per i collegamenti punto-punto come quello che si vuole realizzare in particolare Motorola ha a catalogo due tipi di apparati: un modello a bassa capacità caratterizzato da una velocità massima

di trasmissione di 10 o 20 Mbps a seconda della configurazione e uno ad alta capacità che arriva fino a 30 o 60 Mbps [54].



Figura 89: antenna di un ponte radio Motorola Canopy con e senza riflettore parabolico [54]

I moduli di backhaul a 10/20 Mbps sono in grado di funzionare solo in modalità LOS, quindi in condizioni di visibilità ottica, sono caratterizzati da un'EIRP di 1W, sfruttano una modulazione digitale di frequenza (2-FSK nel caso dei 10 Mbps e 4-FSK nel caso dei 20 Mbps) e utilizzano antenne a pannello caratterizzate da un guadagno di 7 dB che permettono di raggiungere distanze di 3,2 Km per il caso 10 Mbps e 1,6 Km per il caso 20 Mbps, estendibili rispettivamente a 16 e 8 Km con l'impiego di riflettori parabolici aggiuntivi.

I moduli di backhaul a 30/60 Mbps sono in grado di funzionare anche in modalità NLOS, quindi in assenza di visibilità ottica tra le due antenne, grazie all'impiego della tecnologia OFDM e di tecniche di diversità in trasmissione e in ricezione, sono caratterizzati da 1W di EIRP, sfruttano una modulazione adattativa digitale del tipo QAM (fino a 256-QAM) e sono in grado di coprire una distanza massima di 200 Km nel caso LOS e 10 Km nel caso NLOS.

Entrambe le versioni funzionano nella banda libera a 5,4 GHz e sono dotate di un sistema automatico che in maniera dinamica determina all'interno dell'intervallo di frequenze disponibili quella più libera in modo da proteggersi al meglio da eventuali interferenze. Le trasmissioni avvengono in modalità a commutazione di pacchetto sfruttando il protocollo IP, è possibile però prevedere dei dispositivi multiplexer esterni che permettono di trasportare sul collegamento anche flussi PDH in formato E1.

3.2.2.3 Ponte radio in banda licenziata

La realizzazione di un ponte radio su frequenze licenziate rappresenta una soluzione che garantirebbe sicuramente un'affidabilità molto superiore ma che comporterebbe costi decisamente più elevati. L'utilizzo di una banda licenziata infatti è subordinato al rilascio di una concessione da parte del ministero dello sviluppo economico che richiede il pagamento di un canone annuale. Qualora si scegliesse questa soluzione bisognerebbe quindi tenere presente il fatto che oltre ai costi iniziali relativi all'acquisto e all'installazione degli apparati, che sono comparabili con quelli del caso non licenziato, si avrebbe un costo ricorrente dovuto al pagamento del canone di concessione annuale. D'altra parte, questa soluzione garantirebbe però il diritto all'utilizzo esclusivo della banda di frequenze quindi si avrebbe la garanzia che non vi siano altri dispositivi che funzionano sulle stesse frequenze causando interferenze che potrebbero compromettere le trasmissioni. Per questa ragione un collegamento in ponte radio in banda licenziata sarebbe in grado di garantire un'affidabilità decisamente elevata, comparabile se non superiore a quella di un collegamento cablato.

Considerata l'alta affidabilità ottenibile, un ponte radio in banda licenziata potrebbe essere una valida soluzione per sostituire completamente il collegamento CDN, in tal caso il costo annuale dovuto al pagamento della concessione di utilizzo delle frequenze verrebbe compensato dal fatto che non sarebbe più necessario pagare a Telecom il canone per la linea CDN che verrebbe dismessa.

Nel caso si scelga di realizzare un ponte radio in banda licenziata si potrebbe pensare di utilizzare degli apparati della famiglia NEC Pasolink che è una tecnologia ampiamente utilizzata nel mondo per realizzare collegamenti di backhaul via radio all'interno di reti sia Tetra che cellulari.

I ponti radio NEC Pasolink possono operare in vari intervalli di frequenze compresi tra i 5 e i 52 GHz e ne esistono varie versioni a seconda della capacità massima di trasferimento dati (da alcuni Mbps fino a 10 Gbps) e alla massima distanza del collegamento (da 1 fino a 50 Km). Le antenne utilizzate sono di tipo parabolico e sono

caratterizzate da alti valori di direttività. Lo schema di modulazione è adattativo, quindi cambia a seconda delle condizioni del canale, ed è del tipo QAM. Il sistema è in grado di trasportare sia traffico IP che E1 senza la necessità di convertitori esterni ed è possibile suddividere vari flussi grazie il supporto alle VLAN [54].

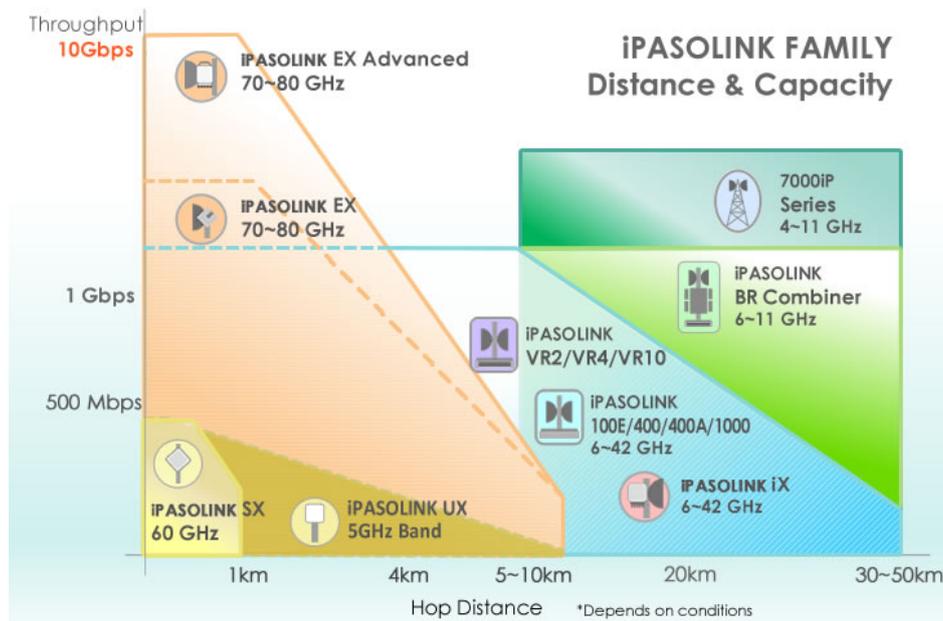


Figura 90: ponti radio della famiglia Nec Pasolink

Un altro tipo di apparati molto utilizzato nell'ambito della realizzazione dei collegamenti tra le stazioni radiobase delle reti cellulari, adottato tra l'altro anche dalla società Lepida per la realizzazione dell'infrastruttura della rete Tetra R3 della Regione Emilia-Romagna, è costituito dai ponti radio della serie ALS prodotti dalla ditta italiana SIAE Microelettronica. Si tratta di ponti radio ad alta capacità in grado di trasportare sia traffico IP che PDH e che sono in grado di funzionare all'interno di varie bande di frequenze comprese tra i 7 e i 42 GHz. Grazie ad uno schema di modulazione adattativo (da 4-QAM a 1024-QAM) e all'impiego di antenne paraboliche ad alta direttività questi apparati sono in grado di offrire una velocità di trasmissione fino a 1 Gbps.



Figura 91: IDU e ODU di un ponte radio SIAE ALS [54]

3.3 Aggiornamento tecnologico del sistema

Mentre gli apparati delle stazioni radiobase sono costituiti da hardware a radiofrequenza che è caratterizzato da un ciclo di vita e da un tempo di aggiornamento tecnologico piuttosto lunghi, il controllore centrale e la sala di controllo del sistema Dimetra sono composti da apparecchiature di tipo informatico la cui vita è limitata e che sono soggette ad una rapida obsolescenza a causa dell'enorme velocità con evolvono le tecnologie di questo tipo. Infatti, mentre le stazioni radiobase MTS4 installate nella rete di Tper sono praticamente identiche a quelle che Motorola tuttora produce quindi non presentano problemi per quanto riguarda gli aggiornamenti software e il reperimento di eventuali ricambi, i server e i router che compongono il controllore centrale e la sala di controllo stanno diventando obsoleti il che comporta l'impossibilità di installare le nuove versioni del software e una maggiore difficoltà nel reperimento dei ricambi.

Per queste ragioni nel corso dei prossimi anni Tper dovrà molto probabilmente effettuare un aggiornamento hardware che permetta di avere un controllore centrale e una centrale di controllo dotati di hardware moderno e al passo con i tempi che supporti le nuove release software e per il quale non ci siano problemi di reperimento dei ricambi. Per le stazioni radiobase invece si potrà tranquillamente continuare ad utilizzare ed aggiornare l'hardware già presente perché è compatibile anche con le nuove versioni del sistema.

3.3.1 Dimetra Express

Per le reti Tetra di dimensioni medio-piccole Motorola ha presentato nel corso dell'ultimo anno una nuova versione del sistema Dimetra denominata Express che si basa sull'utilizzo di moderne tecniche di virtualizzazione che permettono di concentrare tutte le funzionalità che erano svolte dai numerosi apparati hardware del vecchio controllore centrale in un unico server di tipo industriale sul quale sono virtualizzati tutti i servizi e tutte le risorse di rete necessarie per il corretto funzionamento del sistema. Di conseguenza viene eliminata anche la necessità di avere una stanza in cui collocare il controllore centrale ma quest'ultimo essendo estremamente compatto può essere tranquillamente alloggiato all'interno dell'armadio rack di una qualsiasi delle stazioni radiobase. È possibile anche posizionare due controllori centrali in due luoghi diversi della rete, ad esempio presso due stazioni radiobase diverse, per realizzare una ridondanza a livello geografico. In questa nuova versione del sistema inoltre non è più necessaria la presenza di una centrale di controllo fisica dotata di computer che realizzano le consolle di dispaccio e il terminale di gestione della rete ma le funzionalità di questi ultimi sono accessibili direttamente collegandosi ad un server web posto sul controllore centrale da qualsiasi PC o dispositivo mobile dotato di un browser web.

Questa versione del sistema, grazie anche ai costi contenuti e alla sua compattezza, rappresenta un ottimo candidato per l'aggiornamento della rete di Tper in quanto riesce a gestire senza problemi un numero contenuto di stazioni radiobase, è in grado di fornire connettività contemporaneamente ad un migliaio di utenti radio quanti sono approssimativamente quelli presente sulla rete bolognese e offre tutte le funzionalità che sono ora disponibili nel sistema Dimetra Compact attualmente in uso, inoltre risulta essere perfettamente compatibile con le stazioni radiobase MTS4 già presenti che quindi non necessiterebbero di essere sostituite comportando un notevole risparmio di costi.

3.3.2 Dimetra X-Core

In alternativa Motorola propone anche un'altra nuova variante del sistema Dimetra denominata X-Core che è in grado di gestire anche reti molto più grandi, anche di dimensioni regionali o nazionali, e che offre numerose funzionalità aggiuntive. In questa variante il controllore centrale, a differenza che nella versione Express, è costituito da un armadio rack con hardware specifico per ogni funzione così come nella rete attuale di Tper. A differenza della Express, questa versione riesce a gestire molte più stazioni radiobase (fino a 5000) e può fornire connettività ad un numero molto più elevato di utenti.

Il sistema Dimetra X-core essendo progettato per gestire anche reti molto estese e complesse ha dei costi, come è possibile immaginare, piuttosto elevati che probabilmente non sarebbero giustificati per l'aggiornamento della rete di Tper così come attualmente è dato che essa comprende solo tre stazioni radiobase e un numero abbastanza contenuto di utenti, potrebbe però essere la soluzione ideale nel caso in futuro si progettasse una estensione della rete per coprire non solo l'area urbana di Bologna ma anche le altre zone raggiunte dagli autobus dell'azienda come Imola e Ferrara o addirittura, nell'ipotesi di una futura azienda unica di trasporti pubblici regionale, tutta la regione.

3.3.3 Migrazione dei collegamenti da E1 ad IP

Le nuove versioni del sistema Dimetra, tanto la Express quanto la X-Core, supportano, a differenza di quella attualmente in uso nella rete di Tper, connessioni tra il controllore centrale e le stazioni radiobase realizzati non solo tramite la tecnologia E1 ma anche utilizzando collegamenti di tipo IP, si potrebbe perciò pensare, contestualmente all'aggiornamento del sistema, di migrare i collegamenti tra i siti da E1 ad IP.

Negli ultimi anni infatti si sta assistendo ad un graduale passaggio all'interno delle reti di telecomunicazioni di estensione geografica

dai collegamenti di tipo PDH basati sulla commutazione di circuito a connessioni basate sul protocollo IP e la commutazione di pacchetto. Le tecnologie che utilizzano la commutazione di circuito basandosi sull'assegnazione di un canale trasmissivo dedicato ad ogni comunicazione infatti garantiscono un'elevata affidabilità e ritardi contenuti e costanti ma risultano essere estremamente poco efficienti per quanto riguarda l'utilizzo della banda e molto poco flessibili in quanto sono difficilmente scalabili e rendono molto problematica la gestione dei collegamenti multipli e della ridondanza [8].

Invece le tecnologie che si basano sulla commutazione di pacchetto risultano innanzitutto estremamente efficienti perché permettono di sfruttare in maniera intelligente la banda di trasmissione disponibile ma anche estremamente flessibili in quanto risultano molto più semplici sia l'ampliamento della rete sia la gestione di vari tipi di topologie di rete comprendenti anche percorsi multipli e collegamenti ridondati.

Per quanto riguarda le stazioni radiobase, che rimarrebbero quelle attuali che sono al momento equipaggiate con una sola connessione E1, occorrerebbe dotarle di una scheda hardware aggiuntiva per poterle connettere tramite collegamento IP.

Migrando i collegamenti con le stazioni radiobase da E1 a IP risulterebbe soprattutto molto più semplice realizzare collegamenti ridondati che garantiscano continuità alle comunicazioni anche in caso di guasti.

Conclusioni

Una società che opera nell'ambito di un servizio di pubblica utilità di vitale importanza come può essere il trasporto pubblico locale di una città metropolitana delle dimensioni di Bologna presenta la necessità di avere un sistema di comunicazioni estremamente affidabile e flessibile che non solo sia in grado di garantire la certezza di poter operare in maniera efficiente anche nelle situazioni più difficili ma che offra anche un'ampia gamma di funzionalità, sia nell'ambito delle comunicazioni vocali che in quello delle trasmissioni dati.

In modo particolare i sistemi per la gestione automatizzata delle flotte, che negli ultimi anni si stanno diffondendo sempre più presso le aziende di trasporto pubblico e che sono in grado di fornire una vasta gamma di funzionalità innovative a beneficio sia del gestore del servizio che degli utenti, necessitano di poter scambiare in tempo reale una grande quantità di dati che devono arrivare a destinazione in maniera affidabile e tempestiva.

Dall'analisi dello standard Tetra, descritto nel primo capitolo di questo scritto, è risultato evidente come esso sia la tecnologia migliore tra quelle presenti sul mercato per realizzare un sistema radio privato per un'azienda di trasporti in quanto è in grado al tempo stesso di fornire un elevato numero di funzionalità di comunicazione sia di tipo dati che voce e di garantire un elevato grado di affidabilità.

Lo studio approfondito condotto sulla rete di Tper, analizzata nel dettaglio nel secondo capitolo, ha evidenziato come essa, nonostante ormai sia operativa da una decina d'anni, utilizzi una tecnologia che è tutt'ora al passo con i tempi e che, con un'adeguata attività di manutenzione e con l'aggiornamento di quei componenti che sono più soggetti ad obsolescenza, sarà in grado di sostenere in maniera appropriata le necessità dell'azienda nell'ambito delle comunicazioni radio anche nel prossimo futuro.

Nel terzo capitolo è stata poi dedicata una particolare attenzione all'individuazione delle criticità presenti all'interno della rete e sono

state proposte per ognuna soluzioni efficaci e possibilmente economiche per poterle superare:

- Sono state individuate le zone all'interno dell'area di Bologna dove le comunicazioni radio risultano più difficili a causa di criticità dovute alla conformazione del territorio e alla presenza di ostacoli. Sono state quindi misurate le migliorie ottenibili introducendo antenne dotate di un maggiore guadagno oppure dispositivi radio più moderni caratterizzati da valori maggiori di potenza di trasmissione e sensibilità, e dove anche questo non dovesse essere sufficiente è stata valutata la possibilità di utilizzare apparati radio configurati come gateway al fine di estendere la copertura di rete anche nelle zone dove il segnale delle stazioni radiobase è assente o troppo scarso.
- È stato rilevato come il collegamento tramite linea CDN tra la centrale del sistema Tetra e la stazione radiobase posta nella località di Tizzano non sia in grado di garantire un'affidabilità sufficiente nelle comunicazioni, in quanto soggetto di frequente a guasti che compromettono temporaneamente la funzionalità della rete. Sono state allora proposte varie soluzioni per la realizzazione di un collegamento alternativo a partire da quella più economica di una connessione tramite rete cellulare 4G fino a quella più costosa ma decisamente più affidabile di un ponte radio e per ciascuno dei casi sono stati proposte specifiche soluzioni tecnologiche valutando gli aspetti positivi e negativi di ognuna di esse.
- Sono stati individuati quali sono tra i componenti del sistema quelli che risultano ancora al passo con i tempi e quali invece stanno diventando obsoleti necessitando quindi di un aggiornamento tecnologico nel prossimo futuro e per questi ultimi sono state valutate le proposte attualmente disponibili sul mercato analizzandone le caratteristiche.

In base ai risultati di questi studi l'azienda deciderà quali investimenti effettuare nei prossimi anni per migliorare e mantenere al passo con i tempi il proprio sistema di comunicazione.

Bibliografia

- [1] Tapio Mäkinen (Nokia), *TETRA and Information Technology*, 1999
- [2] Aeroflex, *TETRA Backgrounder*, 2002
- [3] Nokia, *The fundamentals of TETRA Data*, Novembre 2004
- [4] TCCA, *TETRA Technology Advantages & Benefits*, Gennaio 2006
- [5] Motorola, *Interconnecting Tetra Systems*, 2009
- [6] Telecom Italia, *La rete fissa*, Roma 2011
- [7] RAD, *El Environment*, Giugno 2014
- [8] British Telecom, *TDM to IP Migration*, Londra 2012
- [9] Mehdi Nouri (Marconi Mobile), *Tetra Architectures and Interfaces*, Tetra World Congress Copenhagen Novembre 2003
- [10] Richard Dewey (TCI Limited), *The Power of TETRA Direct Mode (DMO)*, Tetra World Congress Copenhagen Novembre 2003
- [11] Doug Gray (Motorola), *TETRA – Direct Mode Operation*, Tetra World Congress Copenhagen Novembre 2003
- [12] Mark Edwards (Motorola), *TETRA Release 2.0 Overview*, Tetra World Congress Copenhagen Novembre 2003
- [13] Mehdi Nouri (Selex), *TETRA Architectures & Interfaces*, Tetra World Congress Francoforte Novembre 2005
- [14] Francesco Pasquali (Selex), *The Power of TETRA Direct Mode*, Tetra World Congress Francoforte Novembre 2005
- [15] Pieter de Kruyff (BICK Mobilfunk), *Dialling, Numbering & Addressing*, Tetra World Congress Francoforte Novembre 2005
- [16] Steve Barber (Sepura), *TETRA Gateway and Repeater Applications for Voice and Data*, Tetra World Congress Francoforte Novembre 2005
- [17] Bert Bouwers (Rohill Technologies), *Introduction TETRA over IP*, Tetra World Congress Francoforte Novembre 2005
- [18] John Cox (Tetra MoU), *TETRA Inter System Interface (ISI)*, Tetra World Congress Francoforte Novembre 2005
- [19] Hannu Vilppunen, *TETRA Data Services & Applications*, Tetra World Congress Varsavia Giugno 2006
- [20] Brian Murgatroyd (Warren Systems), *Understanding Tetra Security*, Ankara Novembre 2009
- [21] Kenneth Hubner (Sepura), *TETRA Gateways and Repeaters*, Nuova Delhi Febbraio 2006

- [22] Jeppe Jepsen (Motorola), *TETRA Security*, Nuova Delhi Febbraio 2006
- [23] Brian Murgatroyd (Warren Systems), *Understanding Tetra Security*, Ankara Novembre 2009
- [24] Luis Canessa (Airbus), *TETRA Data Services & Applications*, L'Avana Febbraio 2017
- [25] Philip Kidner (TCCA), *TETRA Architectures & Interfaces*, L'Avana Febbraio 2017
- [26] Richard Dewey, Remi Sfez, Eric Pequet, Pierre Makowski, Serge Raes, *Design of the TETRA mobile radio air interface protocol*, IEEE Explorer 6 Agosto 2002
- [27] Borut Dolanc, Matjaz Judez, Professional mobile system - TETRA over IP and IP over TETRA, IEEE Explorer 3 Dicembre 2003
- [28] Keyur Parikh, Junius Kim, *TDM Services over IP Networks*, IEEE Explorer 22 Febbraio 2008
- [29] Kashif Mehboob, Iqbal Muhammad Umair, Mirza Shoaib Ahmed, *TETRA Technology: A Modern Private Cellular System*, IEEE Explorer 12 Novembre 2007
- [30] Aleksandar Bakic, Tomislav Nikolic, Mirko Simic, *Data Services in Dimetra IP*, Belgrado 2004
- [31] Motorola, *AT Programmer's Guide*, Agosto 2007
- [32] Motorola, *Dimetra PD Programmer's Guide*, Settembre 2004
- [33] Motorola, *Dimetra Short Data Service Programmer's Guide*, Febbraio 2008
- [34] Motorola, *Dimetra System Overview*, Ottobre 2013
- [35] Mirco Armandi (TPER), *Tecnologie e modalità di gestione della mobilità in ambito urbano*, Bologna Settembre 2017
- [36] Ulisse Monari (TPER), *Nuovo sistema di telecontrollo – Specifiche tecniche e funzionali*, Bologna Maggio 2007
- [37] Salvatore Pulizzi, *Progettazione e realizzazione di una rete TETRA*, Bologna 2007
- [38] Paganini Alessio, *Sistemi per il coordinamento di flotte radio cellulari private*, Ferrara 2007
- [39] Marta Gufoni, *Implementazione in tecnologia software defined di un trasmettitore Tetra/DMO*, Pisa Luglio 2014
- [40] Michela Cancellaro (Università degli studi Roma Tre), *Il Sistema TETRA*, Roma Maggio 2008
- [41] Salvatore Serrano (Università degli studi di Messina), *Multiplazione Numerica*, Messina 2007
- [42] Salvatore Serrano (Università degli studi di Messina), *Ponti Radio*, Messina 2007
- [43] Antonella Dal Lago (Siemens), *Ponti Radio*, Milano Gennaio 2005
- [44] Vittorio Degli Esposti (Università di Bologna), *Sistemi radiomobili*, Cesena Maggio 2017

- [45] ETSI EN 300 392-1 TETRA V+D General Network Design, Gennaio 2009
- [46] ETSI EN 300 392-2 TETRA V+D Air Interface (AI), Ottobre 2000
- [47] ETSI EN 300 395-2 TETRA codec, Gennaio 2005
- [48] ETSI ETR 300-1 TETRA V+D Designer's Guide – Overview, technical description and radio aspects, Maggio 1997
- [49] ETSI ETR 300-3 *TETRA V+D Designer's Guide – Direct Mode Operation (DMO)*, Febbraio 2000
- [50] ETSI TR 102 300-5 *TETRA V+D Guidance on numberding and Addressing*, Gennaio 2003
- [51] ETSI TS 200 392-5 *TETRA V+D Peripheral Equipment Interface (PEI)*, Luglio 2007
- [52] ITU-T Rec. E.218 *Management of the allocation of terrestrial trunk radio Mobile Country Code*, Maggio 2004
- [53] IETF RFC 5087 *Time Division Multiplexing over IP (TDMoIP)*, Dicembre 2007
- [54] Specifiche e manuali degli apparati forniti dai costruttori
- [55] Documentazioni di gara
- [56] Concessioni del ministero dello sviluppo economico

Ringraziamenti

Arrivato alla fine di questa tesi e del mio percorso di studi vorrei rivolgere un ringraziamento a tutte quelle persone che mi hanno reso possibile raggiungere questi traguardi.

Per prima cosa vorrei ringraziare la Tper di Bologna, in particolare nel nome dell'ing. Mirco Armandi che ha svolto la funzione di referente aziendale e di correlatore, per avermi offerto l'opportunità di preparare questa tesi di laurea e per avermi introdotto nell'interessante mondo delle tecnologie applicate ai trasporti pubblici.

Vorrei poi ringraziare le altre persone che mi hanno aiutato durante questo lavoro di tesi cioè il prof. Walter Cerroni che mi ha fatto da relatore e tutti i dipendenti dell'ufficio nuove tecnologie di Tper con i quali ho avuto modo di lavorare.

Infine, non posso non rivolgere un ringraziamento finale ai miei genitori che mi hanno permesso di intraprendere questo percorso di studi e a tutti i miei amici che mi hanno sostenuto e accompagnato nel corso di esso.