

CORSO DI LAUREA TRIENNALE  
IN INGEGNERIA DELLE TELECOMUNICAZIONI

A.A. 2010/2011

**EFFICIENZA ENERGETICA NELLE  
RETI WIRELESS**

RELATORE: Prof. Roberto Corvaja

LAUREANDO: Luca Pilloni

Padova, 23 settembre 2011



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Efficienza Energetica nelle Reti LTE</b>	<b>7</b>
2.1	Introduzione alla tecnologia LTE	9
2.2	Rete di Accesso: Stazione Base, Terminale Mobile	12
2.3	Core Network	14
2.3.1	ECO Switching	14
2.3.2	ECO Routing	15
<b>3</b>	<b>Architetture e Tecniche nelle Stazioni Base LTE</b>	<b>19</b>
3.1	Efficienza Energetica nelle Stazioni Base	19
3.1.1	Consumo Energetico	19
3.1.2	Riallocazione delle Risorse	21
3.2	Panoramica sui Parametri di Efficienza Energetica	23
3.3	Metodi di Risparmio Energetico	25
3.3.1	Approccio nel Dominio del Tempo	25
3.3.2	Approccio nel Dominio della Frequenza	28
3.3.3	Approccio nel Dominio Spaziale	29
3.3.4	Prestazioni a confronto	31
3.4	Tecnologia MIMO	34

<b>4</b>	<b>Applicazioni Future: Cognitive Radio</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>43</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>45</b>

# Capitolo 1

## Introduzione

Il cambiamento climatico globale e la necessità di ridurre i consumi energetici sono problematiche attuali. Il volume di dati trasmessi continua ad aumentare di un fattore di circa 10 ogni cinque anni [3]. Attualmente, il 3% dell' energia mondiale è consumata dall'ICT (*Information and Communications Technology*), che provoca circa il 2% delle emissioni di CO<sub>2</sub> a livello mondiale (paragonabile alle emissioni di CO<sub>2</sub> a livello mondiale di aerei o a un quarto delle emissioni di CO<sub>2</sub> a livello mondiale dalle auto)[3].

Le reti wireless sono saldamente affermate come mezzo fondamentale e conveniente di comunicazione che consente operazioni di business efficienti ed efficaci. Oggi più di quattro miliardi di persone nel mondo hanno accesso a un telefono cellulare. I telefoni cellulari sono diventati indispensabili nella moderna vita sociale e domestica. Così come i sistemi di trasporto moderni, le reti wireless sono qui per restare per il prossimo futuro. Di conseguenza, ridurre il consumo energetico delle reti wireless è considerato essenziale per il futuro.

Questo lavoro quindi si propone lo scopo principale di investigare sul consumo energetico di una rete wireless e sui metodi per migliorarne l'efficienza energetica, facendo riferimento alla tecnologia LTE, approfondendo la parte riguardante la rete d'accesso, in particolare le

Stazioni Base che come si potrà capire sono la maggior fonte di consumo energetico dell'intera rete.

## Capitolo 2

### Efficienza Energetica nelle Reti LTE

Una rete di telecomunicazioni come quella della telefonia mobile o fissa è organizzata a livello fisico da tre domini principali come illustrato in figura 2.1:

- La rete di Trasporto (*core network*) per le comunicazioni a lunga distanza costituita, in particolare, dalle grandi dorsali di comunicazione.
- La rete di Giunzione (*metro network*) che collega i nodi a commutazione di circuito di una ristretta area geografica, quali quelli di una città.
- La rete d'accesso (*access network*) verso l'utente finale che può essere come nel caso della telefonia fissa costituita fisicamente dal doppino telefonico, oppure, come nel caso della telefonia mobile, da una rete senza fili.

I tipici consumi energetici dei differenti elementi di una rete senza fili sono rappresentati in figura 2.2, dalla quale si evince che la sola rete d'accesso costituita dalle Stazioni Base escludendo il Terminale Mobile consuma più del 50%. È per questo che gli sforzi maggiori si concentrano in questo settore. L'altro 50% circa è composto dai consumi dei nodi che collegano la rete d'accesso alla rete fissa (*mobile switching*) e dal core network, ossia la rete di trasporto.

Qui di seguito si introduce brevemente la tecnologia Long Term Evolution (LTE) che è l'ultimo standard della telefonia mobile e successivamente si

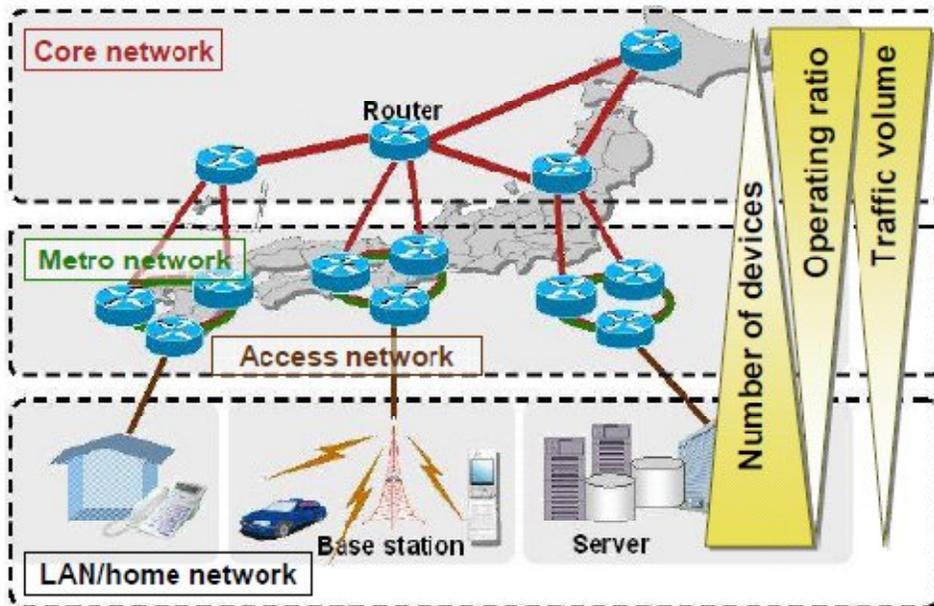


Fig. 2.1 Rete di telecomunicazioni [4].

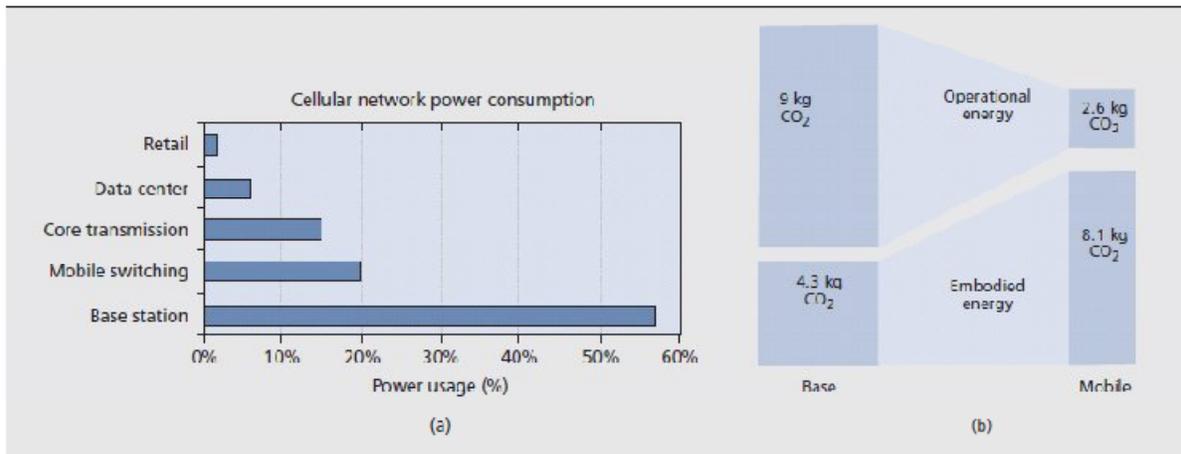


Fig. 2.2 a) Consumi energetici di una tipica rete di cellulari senza fili (fonte:Vodafone).  
 b)Emissione di CO<sub>2</sub> per abbonato della Stazione Base e del Terminale Mobile derivanti dal funzionamento e dai processi di produzione [2].

dà una panoramica completa sui consumi e efficienza delle Stazioni Base LTE e Core Network.

## **2.1 Introduzione alla tecnologia LTE**

L'LTE rappresenta l'ultima evoluzione degli standard dedicati alle reti di telefonia mobile a banda larga. Esso si colloca in posizione intermedia tra gli standard di terza generazione 3G e gli standard di quarta generazione 4G, ancora in fase di elaborazione, con l'obiettivo di promuovere l'uso della banda larga in mobilità, sfruttando l'esperienza e gli investimenti effettuati per le reti 3G ed anticipando i tempi rispetto alla disponibilità degli standard 4G, il cui obiettivo è quello di raggiungere velocità di connessione wireless anche superiori ad 1 Gbps.

L'LTE è un miglioramento dello standard UMTS, in particolare le caratteristiche salienti sono [7]:

- Modulazione OFDM per il down link e SC-FDMA per l'uplink.
- Efficienza spettrale, ossia numero di bit trasmessi al secondo per ogni Hertz della portante) tre volte superiore all'ultima evoluzione UMTS.
- Velocità di trasferimento in download fino a 326,4 Mb/s.
- velocità di trasferimento dati in upload fino a 86,4 Mb/s.
- applicabilità flessibile a diverse bande di frequenza, incluse quelle del GSM, dell'UMTS-WCDMA e di nuove bande a 2,6 GHz, e con possibilità di aggiungere nuove bande nel tempo a seconda delle necessità.
- Ottimo supporto in mobilità.

Nei sistemi basati sull'OFDM, la banda disponibile viene suddivisa in tante sottobande, trasmettendo i dati su flussi paralleli. I dati trasmessi su ciascuna sottobanda vengono poi modulati, attraverso una delle modulazioni numeriche possibili (QPSK, QAM, 64QAM, ecc.), in base alla qualità del segnale ricevuto. Si trasmettono più simboli nelle sottobande dove si ha più alta qualità del segnale ricevuto. L'impiego della tecnica OFDM nei sistemi di comunicazione ha consentito di ridurre fortemente le criticità che si determinavano quando, per raggiungere data rates in trasmissione più elevati, l'unica soluzione possibile sembrava quella di aumentare il symbol rate [8]. Ciascun simbolo OFDM trasmesso è preceduto da un prefisso ciclico (CP), ovvero da una breve replica della parte finale del segnale ottenuto dalla somma dei simboli su ciascuna sottobanda. Questa caratteristica permette di ridurre sensibilmente l'effetto prodotto dall'Interferenza di Intersimbolo (ISI) ovvero dell'effetto determinato dalla sovrapposizione di repliche del segnale in ricezione; le sottobande in cui viene suddivisa l'intera banda sono ortogonali l'una all'altra, ovvero la distanza viene scelta in modo che la risposta impulsiva della portante di ciascun canale abbia un massimo laddove la risposta impulsiva delle portanti dei canali adiacenti hanno invece un valore nullo. Ciò determina, idealmente, un'assenza di interferenza da canale adiacente. L'OFDMA è una tecnica di accesso multiplo, basata sulla modulazione OFDM, che consiste nell'assegnare a ciascun utente un sottoinsieme delle sottoportanti in cui viene suddivisa la banda disponibile per un determinato intervallo di tempo. Poiché si tratta di una tecnica di tipo adattativo, funzione della qualità del canale radio, se l'assegnazione delle sottobande viene eseguita in maniera sufficientemente veloce, consente di raggiungere

prestazioni molto elevate sia dal punto di vista di robustezza alle rapide variazioni del fading e sia per quanto riguarda le interferenze di co-canale, permettendo, allo stesso tempo, di ottenere un'efficienza spettrale particolarmente elevata, specialmente quando viene utilizzata in combinazione con le tecniche MIMO. La caratteristica di assegnare a ciascun utente solo una porzione delle sottobande disponibili, consente di variare la potenza di trasmissione richiesta per comunicare con ognuno di essi a seconda delle necessità. Nella tecnica SC-FDMA utilizzata per l'uplink vengono impiegate una serie di sottoportanti ortogonali per trasmettere le informazioni contenute nei simboli modulati e vengono trasmesse sequenzialmente e non in parallelo.

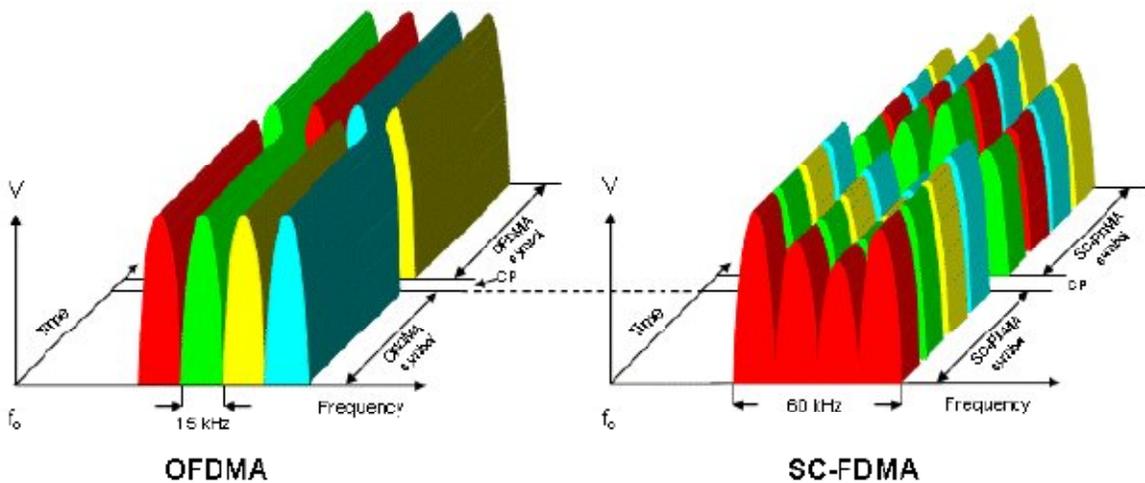


Fig. 2.1.1 suddivisione banda OFDM e SC-FDMA [8]

## 2.2 Rete di Accesso: Stazione Base, Terminale Mobile

L'efficienza energetica della Stazione Base, data come il rapporto tra la potenza trasmessa e la potenza totale, è veramente bassa. Solo il 3% della potenza viene trasmessa e il restante 97% viene dissipata sotto forma di calore [9]. Le Stazioni Base operanti in aree difficilmente raggiungibili dalla rete elettrica sono normalmente alimentate da gruppi elettrogeni a combustibile diesel. Queste Stazioni Base hanno bisogno di spendere il 50% del costo totale di esercizio sul carburante [9]. Quindi per quanto appena detto c'è una forte necessità di sviluppare Stazioni Base ecologiche. LTE utilizza la modulazione OFDM in down link e una modulazione SC-FDMA in uplink; che richiedono complesse computazioni e aumentano la complessità e il consumo di potenza dell'hardware del ricetrasmittitore.

Nell'amplificatore di potenza (PA), la linearità è un aspetto importante, dato che le prestazioni e l'efficienza del sistema sono altamente dipendenti da esso. L'involuppo non costante degli schemi di modulazione OFDM, hanno un PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) alto, con una conseguente necessità di una alta linearità dell'amplificatore di potenza del ricetrasmittitore (RF PA) [9].

Il consumo di energia nell'hardware del ricetrasmittitore può essere significativamente ridotto diminuendo la tensione di esercizio, che a sua volta può essere ottenuto utilizzando le ultime tecnologie CMOS. Il ricetrasmittitore in banda base di una stazione di base moderna è progettato con circuiti integrati digitali per l'aggiornamento facile.

Il consumo energetico del ricetrasmittitore dipende dalla complessità insita nell'architettura e può essere significativamente ridotto diminuendo la tensione di funzionamento dell'hardware. Questo può essere ottenuto mediante l'uso delle più moderne tecnologie CMOS. Una duplice riduzione della tensione di funzionamento dalla tecnologia a 130 nm, alla tecnologia a 22 nm, si traduce in una riduzione di quattro volte del consumo di energia del ricetrasmittitore [9]. La riduzione della potenza del ricetrasmittitore riduce anche la necessità di raffreddamento, e gli sprechi di potenza nei circuiti di alimentazione.

Altri meccanismi per l'efficienza energetica in particolare lo switch-off delle Stazioni Base e gli approcci nel dominio del tempo e frequenza verranno approfonditi nel successivo capitolo.

Per quanto riguarda il terminale mobile, nei primi anni 90, quando il cellulare si stava diffondendo, il consumo di energia era di 32Wh al giorno, ora è stato ridotto a 0,83Wh al giorno includendo anche tutta l'energia consumata dal carica batterie (dati dell'operatore NTT DoCoMo [10]). Confrontato al consumo della rete di 120Wh [10], il rapporto è di 1:150, e quindi possiamo concludere che il consumo energetico del terminale è trascurabile in confronto ed eventuali migliorie sono strettamente legate all'efficienza energetica delle batterie.

## 2.3 Core Network

La rete di trasporto (*core network*) assieme al centro dati (*data center*) consumano una porzione significativa, circa il 30%, dell'energia consumata dall'intero sistema (figura 2.2). Inoltre il traffico, soprattutto quello Internet, è destinato ad aumentare e saranno necessarie nel futuro capacità e velocità di trasmissione delle linee elevate il che richiederà speciali memorie ad alta velocità, capacità e consumi per il routing e il buffering [4]. Al fine di contenere il consumo energetico dei nodi di routing e switching si evidenziano due particolari metodi, l'ECO Switching (*Energy Cost saving Overlay switching*) tecnica che permette di ottenere un risparmio energetico dal meccanismo di inoltro del traffico, e l'ECO Routing (*Energy Cost saving Overlay routing*): tecnica che attraverso l'aggregazione del traffico ottiene risparmio energetico in accordo alla variazione dello stesso.

### 2.3.1 ECO Switching

L'ECO switching è un metodo nuovo di commutazione per il risparmio energetico che raggiunge lo scopo eliminando il buffering dei pacchetti e le tabelle di routing al router. Uno schema concettuale dello switching ECO è illustrato nella figura 2.3.1. L'ECO switching, che snellisce il processo di inoltro, è composto dalle seguenti due tecniche di base.

#### 1) Bufferless transmission.

La trasmissione bufferless realizza una comunicazione bufferless eliminando il buffering previsto al router per evitare collisioni di pacchetti

diretti nella stessa destinazione. In particolare, il router a margine dell'ingresso della rete è utilizzato per generare pseudo intervalli di tempo regolari, secondo i quali l'invio di pacchetti è opportunamente programmato. In questo modo due pacchetti diretti allo stesso router anche se per vie diverse, non arriveranno mai a collidere perché verranno inoltrati al router in slot diversi.

Ciò può ridurre i requisiti di memoria del buffer del relay router, la quale porta ad una riduzione del consumo di energia richiesta nel processo.

2) commutazione basata su pseudo time slot.

Questa è una tecnica per la commutazione dei pacchetti in uscita sulla base di un'appropriata pianificazione fatta dalla trasmissione bufferless descritta sopra. In particolare, i pseudo time slot per la commutazione sono identificati sull'asse temporale, piuttosto che nelle tabelle di routing al relay router. Questo elimina la necessità della memoria per le tabelle di routing al relay router e dei motori di ricerca per le tabelle di routing, il tutto permette una riduzione del consumo di energia richiesta per l'intero processo.

### **2.3.2 ECO Routing**

L'obiettivo principale dell'ECO Routing consiste nel aggregare flussi di pacchetti quando il traffico è basso e portare in uno stato di sleep il maggior numero possibile di router che grazie all'aggregazione non vengono più attraversati dal traffico, così da poter avere un risparmio

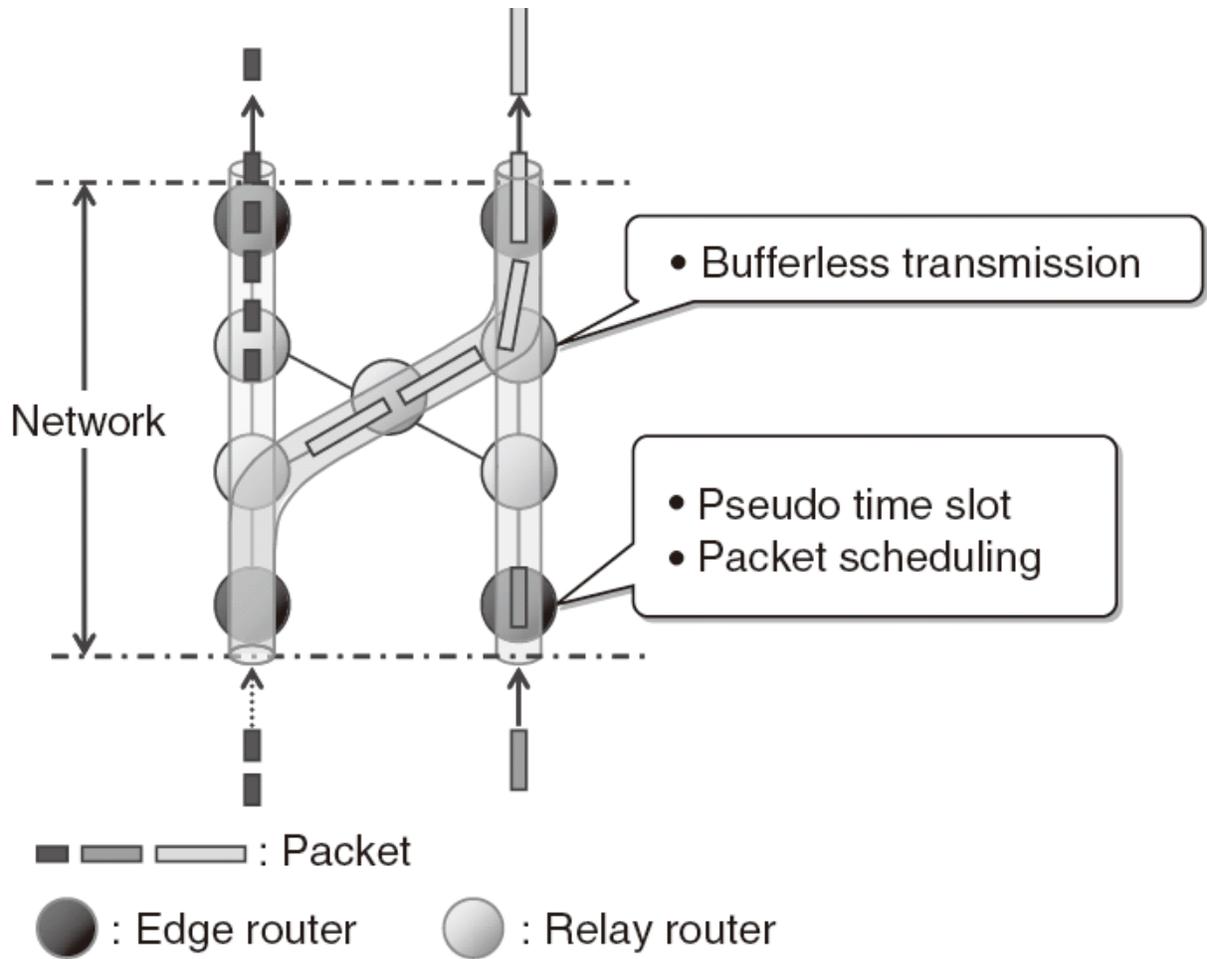


Fig. 2.3.1 ECO Switching [4].

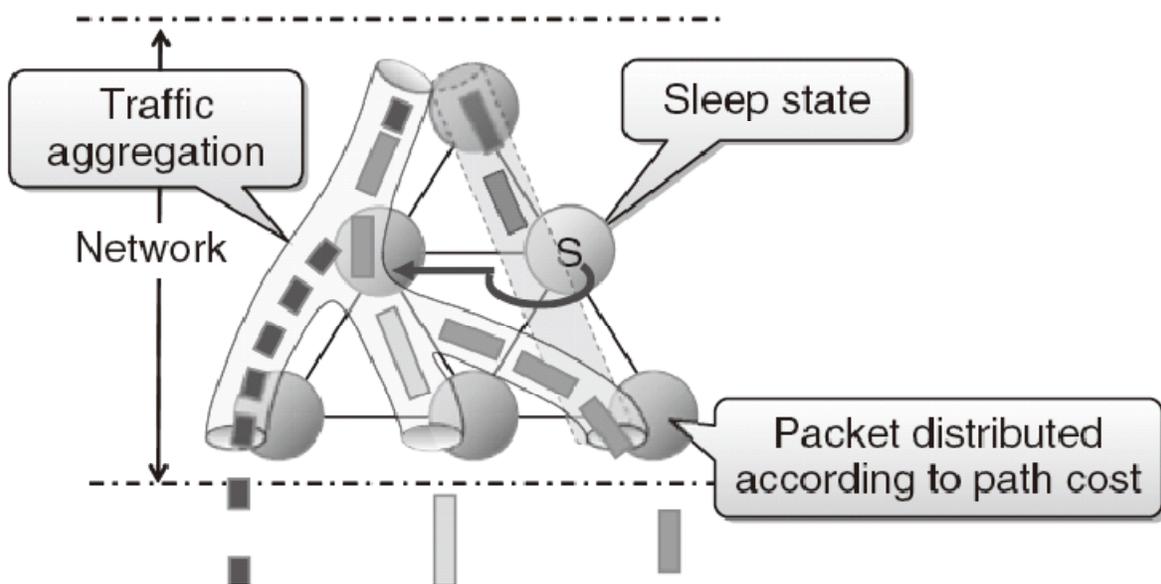


Fig. 2.3.2 ECO Routing [4].

energetico. Un diagramma concettuale è illustrato in figura 2.3.2.

L'Eco Routing si basa sostanzialmente su due funzioni: una per il calcolo del percorso più appropriato in termini di risparmio energetico e l'altra per il controllo del routing per reindirizzare il traffico nel percorso determinato dalla prima.

1) Calcolo del percorso più appropriato.

A causa del consumo di energia variabile dei singoli dispositivi e la capacità di elaborazione dei singoli router, il risparmio energetico può essere significativamente diverso a seconda di quale router è in modalità di sleep. Per questo motivo è necessaria una funzione di calcolo del percorso in vista dell'efficienza di potenza con riferimento al processo di inoltro dei singoli router. L'ECO Routing utilizza il percorso determinato dalla distribuzione del traffico e dall'efficienza di potenza dei singoli router per determinare il cammino più opportuno tale da massimizzare il risparmio energetico.

2) controllo del cammino.

Insieme al calcolo del percorso ottimo menzionato prima, l'ECO Routing richiede anche che quest'ultimo venga eseguito. Quindi si procede con

- Aggregazione del traffico senza causare congestioni
- dispersione del traffico lungo più percorsi alternativi quando è probabile si stia formando una congestione.

Inoltre sono necessarie transizioni regolari tra aggregazione e dispersione eseguendo misure di controllo del traffico per raggiungere la convergenza del traffico verso i router più appropriati.



## Capitolo 3

### Architetture e Tecniche nelle Stazioni Base LTE

Come abbiamo visto, la stazione base è la principale sorgente di consumo energetico. Di conseguenza le principali soluzioni per il risparmio energetico sono concentrate su di essa, quindi risulta importante capire quali sono i singoli componenti e quanto consumano per cercare di migliorarli.

#### 3.1 Efficienza Energetica nelle Stazioni Base

##### 3.1.1 Consumo Energetico

Il rendimento complessivo della Stazione Base, in termini di potenza assorbita dall'alimentazione in relazione con la sua potenza di uscita in radio frequenza (RF), è governato dal consumo di ogni suo singolo componente.

##### **-Radio Trasmettitore:**

Le apparecchiature per generare il segnale da trasmettere e quelle per decodificare i segnali dal terminale mobile.

##### **-Amplificatori di Potenza:**

Questi dispositivi amplificano il segnale in uscita dal Radio Trasmettitore fino a potenze adatte alla trasmissione, in generale dell'ordine di 5-10W.

### **-Antenne di trasmissione:**

Le antenne si occupano dell'irradiazione del segnale, tipicamente sono altamente direzionali verso l'utente evitando irradiazioni verso il terreno o il cielo.

### **-Sistema di alimentazione**

Composto essenzialmente da un convertitore AC/DC.

### **-Sistema di raffreddamento**

### **-Batteria ausiliaria**

Utilizzata nei casi in cui venga a mancare l'alimentazione dalla rete.

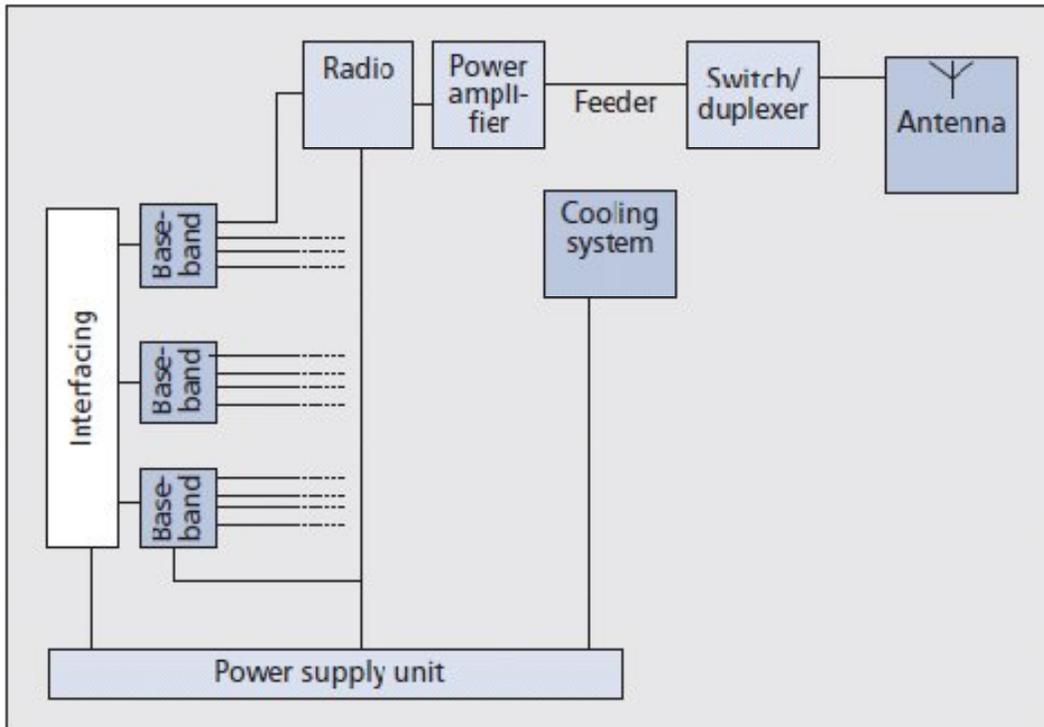
Il modello di riferimento è illustrato in figura 3.1.1, e rappresenta una macro Stazione Base con tre moduli, con un EIRP (*effective isotropic radiated power*) di 27 dBm per modulo (Tabella 3.1.1) [2]. Le quattro linee di trasmissione per settore necessitano di amplificatore ed antenna che in tutto per i tre moduli fanno dodici amplificatori e dodici antenne per ogni Stazione Base. Una stima dei consumi di potenza di una Stazione Base, allo stato attuale dell'arte dell'anno 2011, si ha nella tabella 3.1.1. Due dati interessanti sono illustrati in tabella 3.1.1, ossia la *top of cabinet efficiency* (TOC) ottenuta dal rapporto tra la potenza d'uscita degli amplificatori e la potenza d'ingresso dell'unità di alimentazione, e la *radiated efficiency* cioè la frazione di potenza irradiata dall'antenna. Gli obiettivi sono dunque quelli di un miglioramento dell'efficienza riducendo la potenza richiesta dalla Stazione Base.

### **3.1.2 Riallocazione delle Risorse**

Una possibile soluzione riduce l'inefficienza dell'Amplificatore di Potenza collocandolo vicino all'antenna in modo da minimizzare la perdita di potenza dei cavi. Quest'accorgimento riduce inoltre la necessità di raffreddamento che si verificherebbe se l'Amplificatore di Potenza fosse collocato all'interno. Ulteriori guadagni di efficienza si hanno disattivando porzioni di hardware quando inutilizzato, come ad esempio gli stessi Amplificatori di Potenza quando non sono utilizzati nella trasmissione.

Per quanto riguarda l'alimentazione e in particolare gli attuali convertitori AC/DC, si possono raggiungere efficienze fino al 95% [6] in un ampio range di carico, e fino al 96% [6] in condizioni di carico ottimo. Questo significa un risparmio di energia elettrica del 50% rispetto le tradizionali tecnologie [6]. Migliore efficienza vuol dire anche minore dissipazione di calore e quindi possibilità di diminuire le dimensioni e la potenza del sistema di condizionamento dell'aria.

La scelta del sistema di raffreddamento ha un'importanza decisiva sulla richiesta di potenza della Stazione Base. Il raffreddamento libero, che sfrutta la sola differenza di temperatura con l'ambiente esterno, durante la maggior parte dell'anno consente di risparmiare notevole energia rispetto ai convenzionali impianti di raffreddamento attivi. A seconda della temperatura e del luogo il risparmio energetico può raggiungere l'80% rispetto al raffreddamento tramite aria condizionata [6]. In alcuni casi però non è possibile utilizzare solo raffreddamento libero, soprattutto nei periodi di temperature estreme, quindi si preferisce utilizzare una combinazione dei due nella maggior parte dei casi. L'obiettivo è quello di



**Fig. 3.1.1** Modello di riferimento per Stazione Base LTE [2]

Description	Power In (W)	Power Out (W)	Efficiency	Target Value
Radiated power (per sector)	8	501 (27dBW)	18dBi antenna gain	18dBi antenna gain
Antenna and Switch	12	8	65% efficient	85% efficient
Feeder	24	12	50% efficient	80% efficient
PA (total per sector)	60	24	40% efficient	85% efficient
PA (all sectors)	180	72		
Transceiver (all sectors)	180			70% reduction
Free Air Cooling	40			
Subtotal	400			
PSU Input	450	400	88% efficient	88% efficient
TOC Efficiency			16%	> 25%
Radiated Efficiency			5.3%	> 20%

**Tabella 3.1.1** Stima consumi di potenza per Stazione Base anno 2011 e obiettivi futuri di consumo energetico [2].

limitare il tempo di funzionamento di metodi di raffreddamento attivi, per fare ciò bisogna che le apparecchiature installate abbiano un'ampia gamma di temperatura di funzionamento. Inoltre si cerca di utilizzare liquidi di raffreddamento meno inquinanti e di ridurre al minimo le emissioni sonore sempre all'interno di un concetto ampio di "green".

### **3.2 Panoramica sui Parametri di Efficienza Energetica**

Al fine di studiare architetture e metodi di efficienza energetica che sono progettati attorno a segnali che in questo caso vengono trasmessi dalle Stazioni Base, risulta importante la distribuzione della potenza di quest'ultimi nel tempo. In tal caso, oltre alle misure di potenza, diventano parametri importanti anche le misure di energia nel tempo per misurare le prestazioni del sistema in modo efficiente e quindi determinare i guadagni realizzati.

La prima misura d'energia in assoluto è strettamente legata al concetto industriale d'energia ossia *energy consumption rating* (ECR). Questa è in genere definita come il rapporto tra la potenza di picco per il massimo throughput della Stazione Base. In pratica l'ECR è una misura del consumo di energia per bit di informazione trasmesso con successo attraverso la rete e si misura quindi in Joule su bit. Questo parametro permette di confrontare differenti reti wireless. Per esempio una tipica Stazione Base opera su una banda di 10 MHz con un'efficienza spettrale media (*average spectral efficiency*) di 1,5 b/s/Hz ottenendo così un bit rate medio di 15 Mb/s. Se l'antenna della Stazione Base ha una potenza a radio frequenza (RF) di 8W (Tabella 3.3.1), il suo ECR è di 0,53  $\mu$  Joule/bit [2]. Tuttavia

se la potenza totale della Stazione Base (450W Tabella 3.3.1) è suddivisa per tre moduli (150W) l'ECR per ogni modulo può aumentare a  $10 \mu$  Joule/bit [2].

Il secondo parametro è una misura relativa per confrontare due differenti sistemi piuttosto di dare un misura assoluta come l'ECR. Spesso si ha bisogno di confrontare le prestazioni di una Stazione Base di riferimento (*baseline*) con un'altra più evoluta (*system under test*), che adotta nuove tecniche, in pratica una nuova, e quindi c'è bisogno di confrontare le due Stazioni Basi

per capire se si è avuto un guadagno sull'efficienza oppure no. In questi casi quindi si preferisce utilizzare un ECG(*energy consumption gain*) che è semplicemente il rapporto tra l'energia utilizzata dalla Stazione baseline e la Stazione test. Quindi maggiore è il guadagno maggiore è l'efficienza della Stazione Base test. Tuttavia, come per ECR, bisogna assicurarsi, quando vengono effettuate queste misurazioni, che le misurazioni energetiche vengano effettuate nella stessa maniera. Ad esempio, se due Stazioni Base vengono confrontate, bisogna garantire che entrambe servano lo stesso numero di utenti nelle stesse condizioni di traffico al fine di garantire un confronto equo.

### **3.3 Metodi di Risparmio Energetico**

La filosofia che c'è dietro a tutti i metodi proposti qui di seguito è la stessa: rapportare il consumo energetico della Stazione Base al traffico. La maggior parte di questi metodi introducono come obiettivo la riduzione del tempo di funzionamento dell'amplificatore di potenza. Altre soluzioni sono possibili, ad esempio ridurre la banda di lavoro (*operating bandwidth*) in modo da ridurre la potenza in trasmissione, oppure usare celle di dimensioni diverse per consentire un miglior consumo di energia per coprire una zona.

Possiamo dividere queste soluzioni nel dominio del tempo, della frequenza e quello spaziale, con soluzioni ibride che combinano diversi domini. Vengono quindi introdotte qui di seguito le varie soluzioni con un confronto fra le rispettive prestazioni di efficienza energetica basate sulla statistica reale del traffico giornaliero.

Bisogna sottolineare che dal punto di vista dello standard possiamo dividere queste differenti soluzioni in due categorie, la prima composta da implementazioni facili da implementare, ossia soluzioni che non richiedono cambiamenti nello standard; la seconda categoria invece racchiude soluzioni che non possono essere incluse nello standard e quindi richiedono una modifica dello stesso per essere realizzate.

#### **3.3.1 Approccio nel dominio del tempo**

L'idea comune nel dominio del tempo è quella di spegnere l'amplificatore di potenza ogni volta che non c'è traffico in downlink. Il risparmio

energetico è misurato come la frazione del tempo in cui l'amplificatore è spento sul periodo di frame. La struttura del frame per il sistema LTE è organizzato in 10 subframe con lunghezza fissa di 1 ms. Ogni subframe ha due slot, ciascuno contenente un numero di simboli ottenuti con modulazione OFDM, questo numero normalmente è sette.

La struttura del frame è raffigurata in figura 3.3.2 e include anche i simboli di controllo. Tra i segnali di controllo ci sono segnali di riferimento (figura 3.3.1) che sono regolarmente trasmessi in ogni sottotrama e vengono usati per ottenere le informazioni di stato del canale in downlink. Se il traffico è basso o addirittura assente, la frequenza di trasmissione dei segnali di riferimento viene ridotta, quindi anche il tempo di attivazione dell'amplificatore di potenza. Questo appena descritto è il modello base per l'efficienza energetica nel dominio del tempo.

Ci sono tre alternative per disattivare l'amplificatore di potenza. Il modo più semplice è quello di spegnere l'amplificatore di potenza quando il traffico è nullo come previsto dallo standard. Il numero di segnali di riferimento rimane lo stesso e questo permette di ridurre il tempo di operatività dell'amplificatore di potenza in un frame al 47% [1].

Il secondo approccio, come mostrato sempre in figura 3.3.2, utilizza una struttura *Multicast Broadcast Single Frequency Network* (MBSFN); ossia quando utilizzo la stessa frequenza per il segnale di riferimento per tutti gli utenti all'interno della zona servita dalla Stazione Base. Questo permette, sempre in condizioni di basso traffico, di diminuire i segnali di riferimento; si passa da un segnale di riferimento mediamente ogni quattro subframe nel caso normale a un segnale di riferimento ogni sei subframe, quindi si riduce il tempo di operatività dell'amplificatore di potenza di un

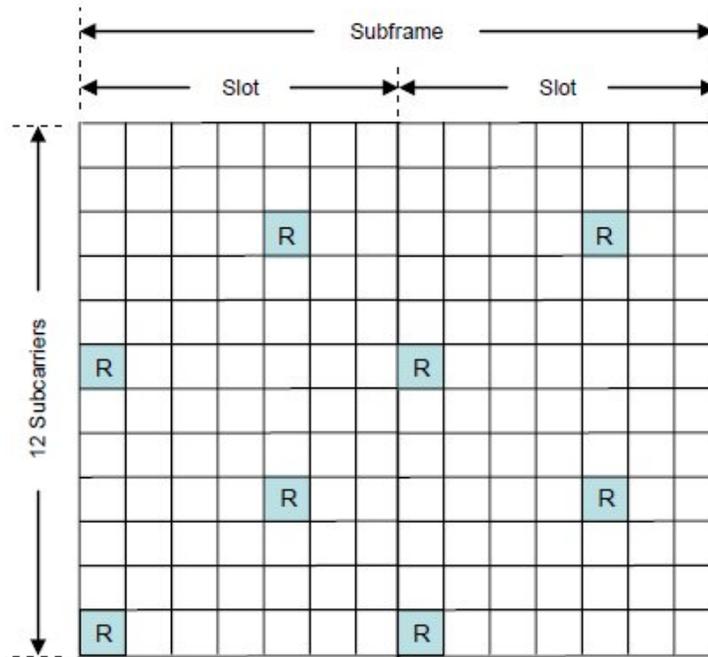


Fig. 3.3.1 Segnali di riferimento in LTE per ciascuna delle dodici portanti.

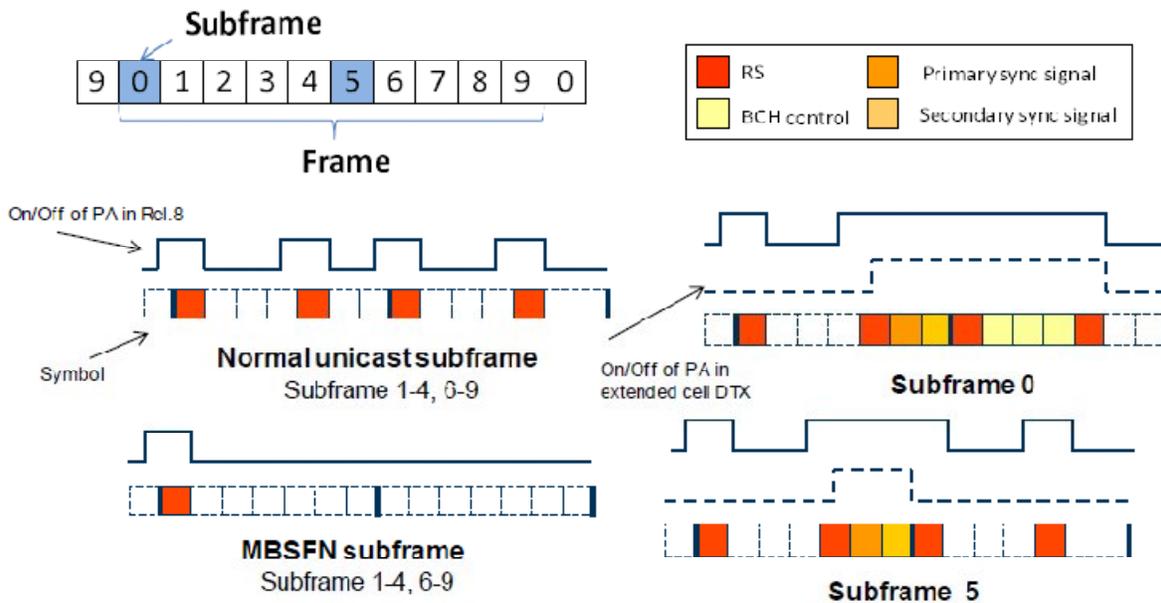


Fig. 3.3.2 Struttura frame LTE e riduzione segnali di controllo per il risparmio energetico [1].

ulteriore 28% [1] e di conseguenza aumenta il risparmio energetico. Questa modalità è prevista in LTE per i servizi come la mobile TV.

L'ultimo importante approccio è il DTX (*Discontinuous Transmission*), questa configurazione permette di spegnere l'amplificatore di potenza quando nella zona servita dalla Stazione Base non ho nessun terminale mobile che trasmette, questo approccio quindi non necessita più di un segnale di riferimento ogni otto subframe, ma solo quando il terminale mobile ha bisogno di trasmettere. Il tempo di attività dell'amplificatore di potenza viene ridotto di un ulteriore 7,1% [1].

Questo approccio ha però alcune limitazioni. Primo perché non è previsto dallo standard e quindi non garantisce compatibilità a priori. Secondo può essere utilizzato solo in condizioni traffico nullo, e questo accade raramente durante un giorno. Terzo, la riduzione dei segnali di riferimento ha un impatto sulle prestazioni del terminale mobile. In LTE, alcune procedure di controllo vengono eseguite con l'assistenza del segnale di riferimento, senza questo si possono creare problemi di sincronizzazione con la Stazione Base o di codifica determinando un impatto negativo della qualità del servizio.

### **3.3.2 Approccio nel dominio della frequenza**

Due approcci differenti sono normalmente utilizzati nel dominio della frequenza. Il primo adotta un adattamento della banda in funzione del traffico: la banda diminuisce quando il traffico è basso.

Come mostrato in figura 3.3.3, si mantiene lo stessa *Power Spectral Density* (PSD), però con un utilizzo di banda minore che implica minore

potenza in uscita. Il vantaggio di questo approccio è che è particolarmente adatto quando si ha traffico basso, tuttavia l'amplificatore di potenza non si spegne mai quindi il risparmio energetico è piuttosto marginale. Inoltre l'amplificatore di potenza lavora in un punto ottimo con un range di potenza di uscita. Riducendo la potenza di uscita (perché diminuisce la banda) l'efficienza dell'amplificatore può diminuire notevolmente.

Il secondo approccio è noto come *Carrier Aggregation*. Si assume che le portanti vengano servite a gruppi da uno stesso amplificatore di potenza. L'idea è quella di collegare ogni amplificatore a tutte le portanti e quindi quando solo alcune di queste sono utilizzate per la trasmissione servirle con lo stesso amplificatore in modo da non utilizzare gli altri. Tuttavia, a causa delle problematiche del punto di lavoro degli amplificatori di potenza citate sopra, anche questo approccio ha un'efficienza energetica limitata.

### **3.3.3 Approccio nel dominio spaziale**

La riduzione del numero di antenne è l'approccio più utilizzato nel dominio spaziale al fine di ridurre i consumi energetici, come illustrato In figura 3.3.4.

In questo caso, se le antenne vengono ridotte da quattro a una, il consumo energetico si riduce a  $\frac{1}{4}$  [1], come anche il consumo associato agli amplificatori di potenza che possono essere disattivati. Questo metodo può essere utilizzato in condizioni di basso traffico. La riduzione delle antenne diminuisce la potenza irradiata e costituisce celle ridotte, inoltre è necessario un meccanismo aggiuntivo per mantenere l'intensità dei segnali

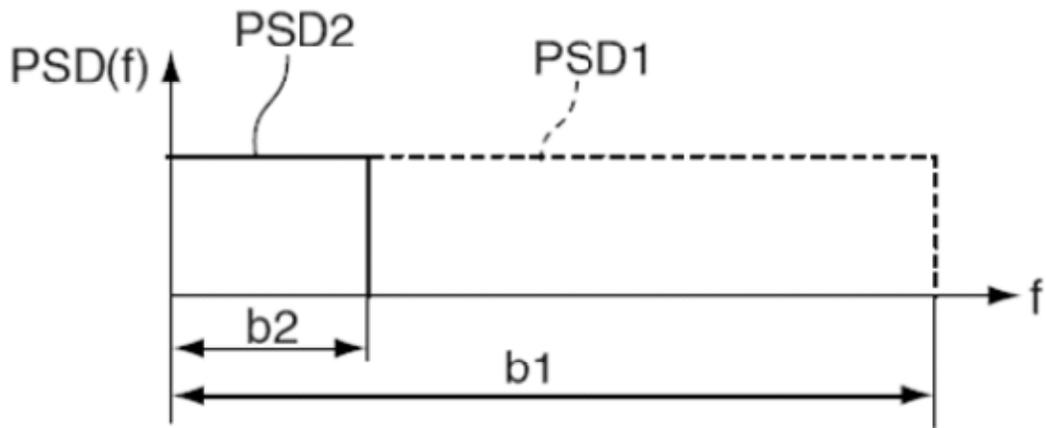


Fig. 3.3.3 Adattamento banda mantenendo la stessa PSD [1].

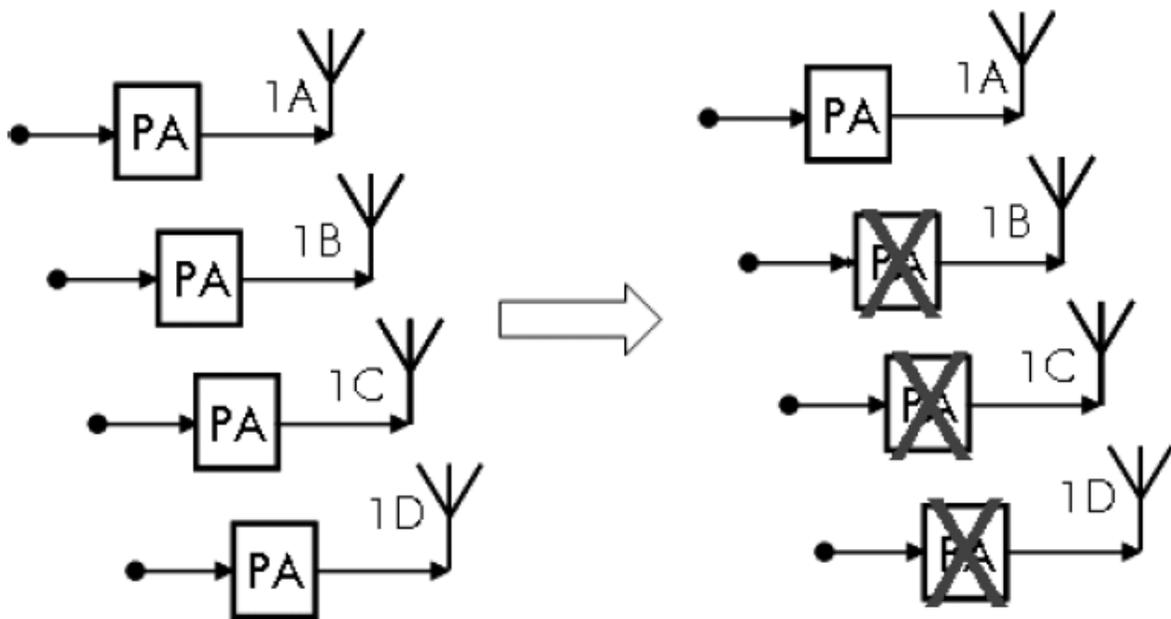


Fig. 3.3.4 Riduzione numero antenne per il risparmio energetico [1].

di controllo ai bordi della cella. Questa soluzione può portare a una degradazione o addirittura all'interruzione del servizio dato che la riconfigurazione delle antenne causa ritardi, infatti la si utilizza in condizioni di traffico semi statico.

L'approccio switch-off consiste nello spegnimento di alcune celle di una determinata zona. Si assume l'area coperta da molte celle, che possono essere di varia tipologia (femto pico nano macro), il servizio per l'utente viene garantito dalle altre celle accese. Ovviamente sempre in condizioni di traffico debole, nei periodi di picchi di traffico le celle spente ritornano in servizio. Anche questo approccio ha però dei limiti. In primo luogo accendendo e spegnendo le celle spesso si incide sui servizi dell'utente, quindi il suo utilizzo deve essere limitato ad una maniera semi statica. In secondo luogo spegnere le celle può costringere il terminale mobile a collegarsi ad una cella più distante e questo incide sulla vita della batteria. In terzo luogo se spegnendo una cella rimane un'area scoperta le altre celle devono irradiare più potenza per riuscire a coprire la zona scoperta. Tutto questo può rendere il risparmio energetico marginale.

### **3.3.4 Prestazioni a confronto**

Usando i risultati da [1] si possono confrontare i vari tipi di approccio in relazione al traffico realistico di un normale giorno per valutarne le prestazioni. In figura 3.3.5 è illustrato il modello del traffico giornaliero, che come si può vedere presenta due punte di traffico verso le 12 e verso le 20. In figura 3.3.6 si può vedere il risparmio energetico dei vari approcci in

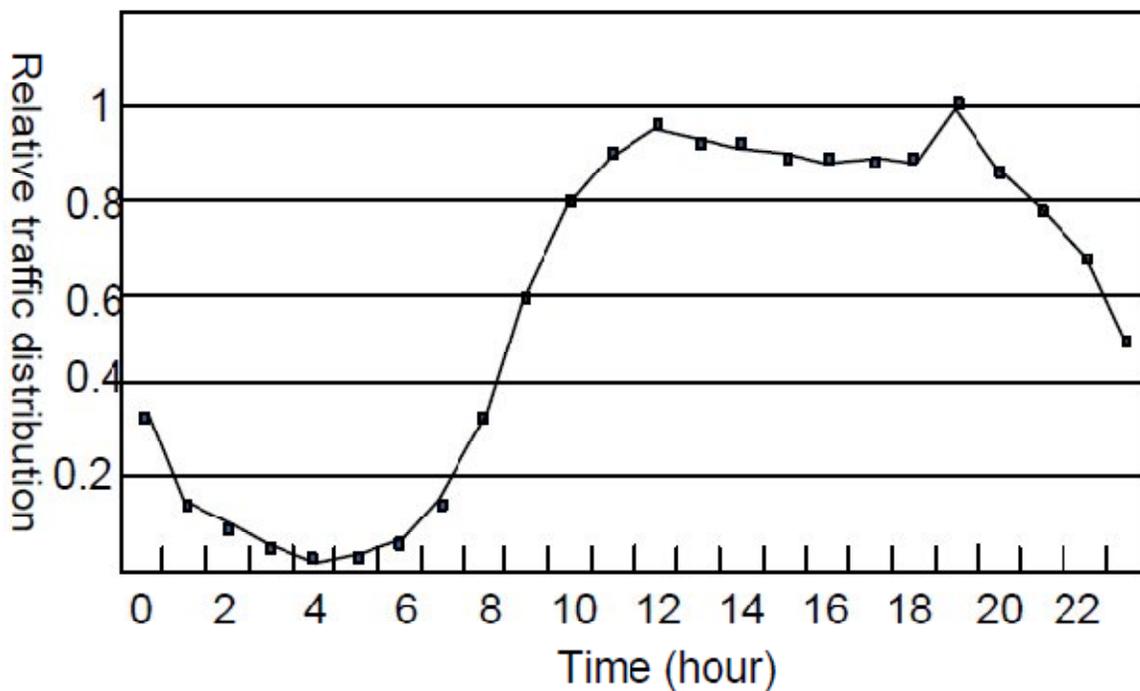


Fig. 3.3.5 Modello di carico di traffico giornaliero [1].

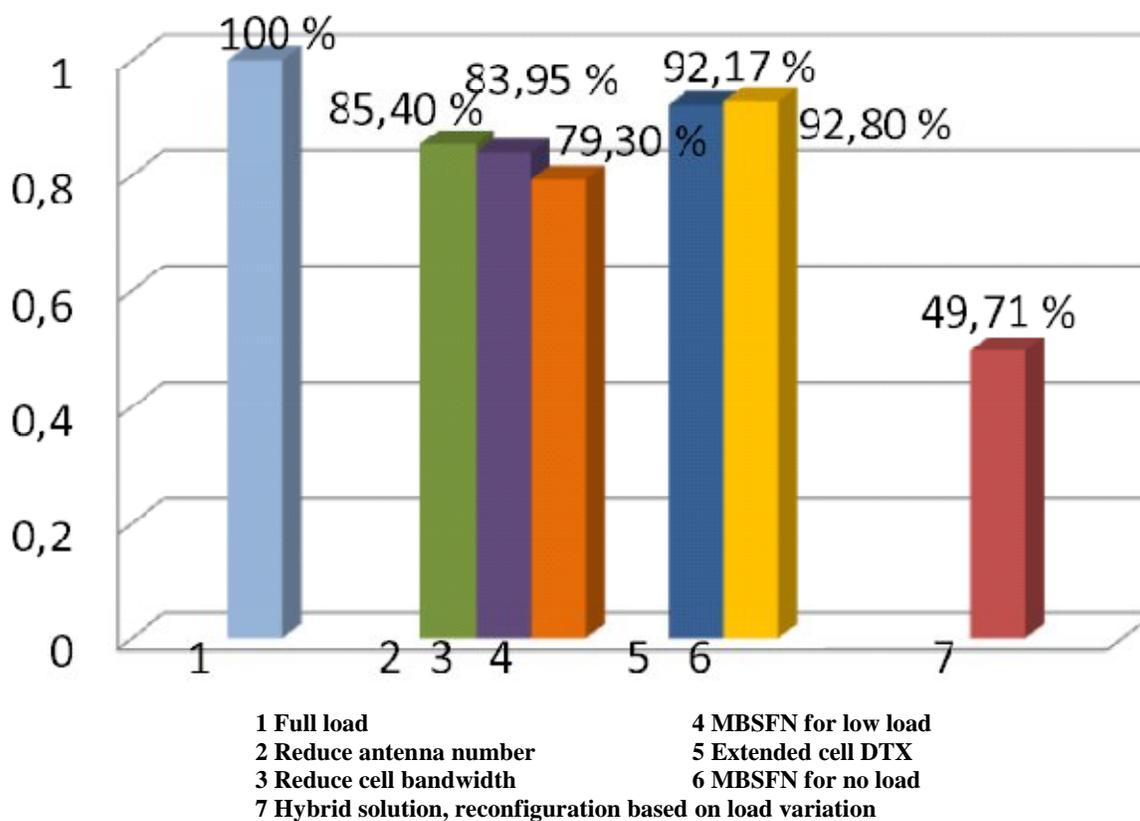


Fig. 3.3.6 Relativo consumo energetico dei vari approcci in funzione del carico del traffico [1].

relazione al caso di pieno carico. Nel caso di traffico assente in cui si possono utilizzare, come abbiamo già detto, gli approcci DTX e MBSFN, dal grafico risulta un risparmio minore dell'8%. Questo è dovuto al fatto che il periodo in cui si non si ha traffico è una piccola frazione della durata dell'intero giorno. L'efficienza derivante invece dagli approcci che lavorano con basso traffico, cioè: MBSFN, riduzione del numero di antenne e riduzione della banda, ottengono invece delle prestazioni migliori, dei tre il MBSFN risulta la soluzione migliore con un risparmio di circa il 20%. Però il miglior risparmio energetico si ottiene con un tipo di approccio ibrido, cioè riconfigurando simultaneamente il numero di antenne, la banda e l'aggregazioni delle portanti in condizioni di traffico semi statico. Con questo approccio il risparmio risulta di più del 50%.

### 3.4 Tecnologia MIMO

Un'altra tecnologia, sempre riguardante le antenne di trasmissione, è quella MIMO (*multiple-input and multiple-output*), che consiste nell'utilizzazione di antenne multiple sia in ricezione che in trasmissione.

La tecnologia MIMO ha attirato l'attenzione nel campo delle comunicazioni wireless perché garantisce notevoli incrementi nel throughput senza un incremento di occupazione spettrale o di potenza di trasmissione e con un'efficienza spettrale (più bit al secondo in un hertz di banda) migliore e con una migliore affidabilità sul link (fading ridotto).

Questo guadagno può essere quindi tradotto in minore potenza di trasmissione.

Un'evoluzione di questa tecnologia, chiamata multi-user MIMO, consente la trasmissione e la ricezione da più utenti nella stessa banda. In pratica, Nelle tradizionali rete di telefonia mobile, la stazione base non ha informazioni sulla posizione degli utenti mobili all'interno dell'area servita e irradia il segnale in tutte le direzioni all'interno della cella in modo da fornire una copertura radio. Ciò si traduce in spreco di energia sulle trasmissioni quando non ci sono unità mobili da raggiungere, oltre a causare interferenze con le celle adiacenti che utilizzano la stessa frequenza, la cosiddetta interferenza di co-canale. Allo stesso modo, in ricezione, l'antenna riceve i segnali provenienti da tutte le direzioni, compreso il rumore e segnali di disturbo. Usando la tecnologia multi-user MIMO il diagramma di radiazione della stazione di base, sia in trasmissione e ricezione, è adattato a ogni utente in modo da ottenere un più alto guadagno nella direzione di quell'utente. La figura 3.4.1 mostra

l'ECG in funzione al numero di utenti, che si ottiene utilizzando la tecnica multi-user MIMO in una Stazione Base LTE.

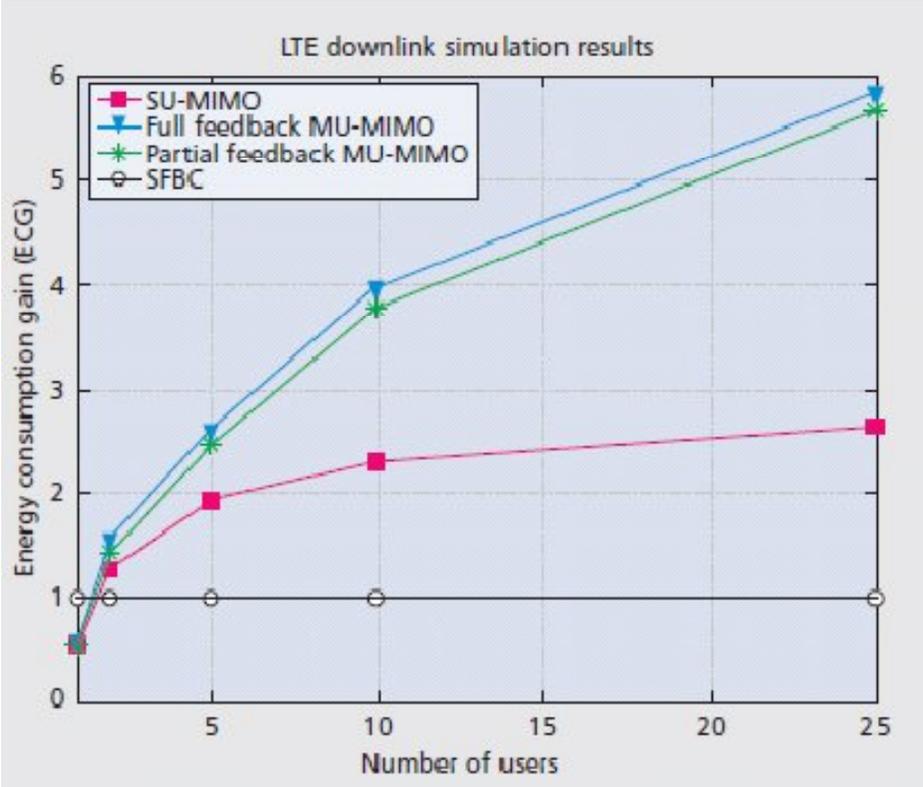


Fig. 3.4.1 ECG con tecniche MIMO [2].



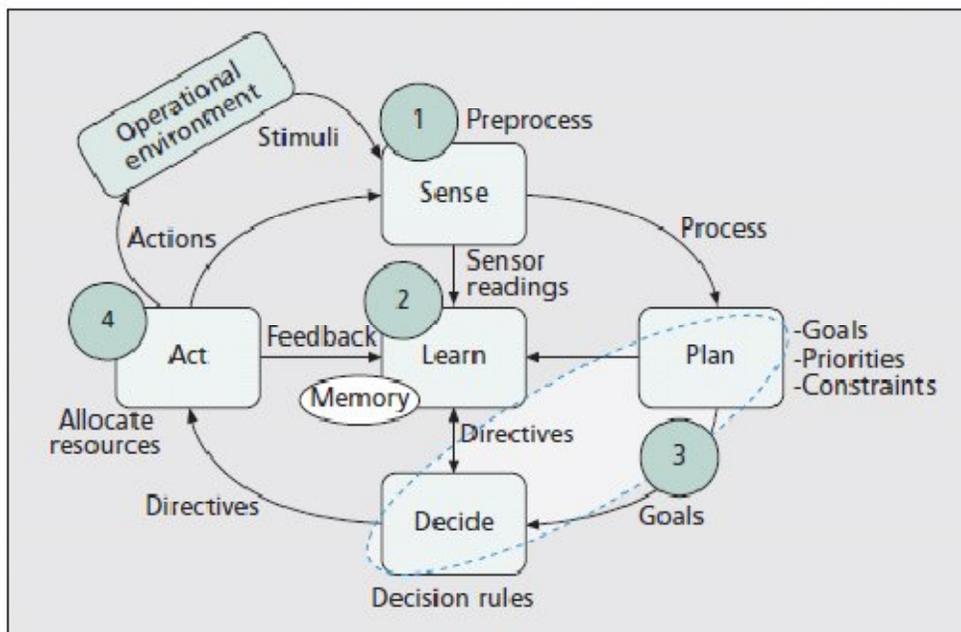
## Capitolo 4

### Applicazioni Future: Cognitive Radio

Cognitive Radio (CR) è un modello promettente per far fronte al problema della scarsità di frequenze che sta emergendo come il risultato di un incremento della necessità di connettività sempre e dovunque [5]. In breve CR è definito come un dispositivo della rete wireless in grado di adattarsi al suo ambiente lavorativo tramite rilevamento (*sensing*) al fine di agevolare comunicazioni radio efficienti.

Una CR, con la sua capacità cognitiva, è in grado di rilevare lo spettro radio, individuarne i buchi e accederne fino a quando gli utenti con licenza (detti anche utenti primari) non utilizzano la banda. Tuttavia realizzare questo modello di Cognitive Radio pone problemi difficili che devono essere ancora risolti completamente come la rilevazione affidabile dei buchi nello spettro e lo sgombero immediato delle frequenze appena l'utente primario deve utilizzarle [5].

Secondo la *Federal Communications Commission* (FCC): "Un Cognitive Radio è un dispositivo radio che può adattare i parametri di trasmissione sulla base dell'interazione con l'ambiente in cui opera" [5]. Questa interazione può portare ad un'attiva negoziazione o comunicazione con gli altri utenti che utilizzano lo spettro e/o ad un rilevamento passivo e un processo decisionale all'interno della radio. A tal fine, la CR è pensata per eseguire il processo ciclico illustrato in figura 4.1.



**Fig. 4.1** Ciclo cognitivo: CR è un dispositivo attivo che eseguendo il ciclo cognitivo, costituito da azioni come rilevazione, decidere e agire, può essere utilizzato per l'efficienza energetica nelle reti [5].

CR rileva (*senses*) attraverso i propri sensori i parametri dell'ambiente operativo. Dopo aver elaborato le rilevazioni dei parametri dell'ambiente, CR pianifica (*plans*) e decide (*decides*) le sue azioni in base agli obiettivi, priorità e vincoli. Decisa la strategia più appropriata, CR agisce (*acts*) di conseguenza. Tutte le fasi del ciclo interagiscono con il modulo di apprendimento incorporato. In altre parole CR impara (*learns*) dalle proprie esperienze il che lo rende anche intelligente.

Il modello CR è stato proposto come un approccio generale per una maggiore efficienza nei sistemi di comunicazione wireless. Inoltre dal punto di vista "green", lo spettro è una risorsa naturale che non deve essere sprecata ma condivisa.

Inizialmente il concetto di “Cognitive Radio” prevedeva l'applicazione al solo dispositivo d'utente, quindi al terminale mobile. Ultimamente, però, negli ambienti di ricerca e di standardizzazione si sta assistendo ad una generalizzazione del concetto di CR, in modo da applicarlo a qualsiasi dispositivo della rete. In particolare, si parla sempre più di Cognitive Radio Systems, vale a dire di sistemi radio nella loro interezza (terminale e rete) basati su capacità cognitive [11]. Un'applicazione molto importante dei CRS è quella delle *Cognitive Networks* (CN) dove il concetto di “Cognitive Radio” viene applicato al dominio della rete. Pertanto, una CN è una rete in grado di adattare il proprio comportamento in base alla conoscenza dell'ambiente in cui si trova [11].

Le prestazioni in termini di efficienza energetica di una Cognitive Radio Network sono state studiate in [12] e qui di seguito vengono riportati alcuni risultati in modo conciso. Il lavoro in [12] è focalizzato a livello MAC (*Medium Access Control*).

La rete CR si assume operante in frame (figura 4.2), ciascuna divisa in un tempo di sensing ( $\tau_S$ ) e in un tempo di trasmissione/silenziio ( $\tau_T$ ). Quindi l'utente CR deve trasmettere i dati ed eseguire le rilevazioni sullo spettro ogni frame. Più è lungo il tempo di rilevamento più accurata è la rilevazione, al contrario più è lungo il tempo di trasmissione più è l'energia utilizzata. Se il canale è occupato dall'utente primario allora si aspetta un tempo di silenzio e si riprova il frame successivo. Inoltre si considera la possibilità che la trasmissione venga bloccata perché l'utente primario necessita del canale per trasmettere. Durante il sensing si ipotizza che si possano trovare  $K$  canali disponibili per la trasmissione. Per quanto

riguarda il canale si utilizza il modello di Rayleigh con rumore gaussiano a media nulla e varianza  $\sigma^2$ .

La potenza utilizzata in un frame è composta da tre componenti: la potenza dei circuiti  $P_C$ , la potenza di sensing  $P_S$  e la potenza di trasmissione  $P_T$ . La potenza dei circuiti è la potenza media utilizzata dai dispositivi elettronici ed è fissata. La potenza di sensing è la potenza utilizzata per il rilevamento dello spettro, in generale è molto piccola rispetto alla potenza di trasmissione che dipende dal rate e dalle qualità del canale. Quindi otteniamo l'energia consumata in un frame:

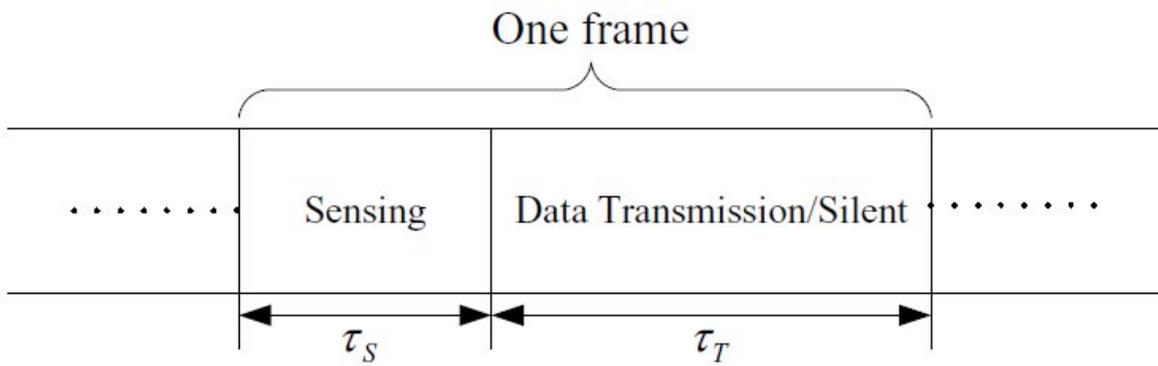
$$E(\tau_T) = P_C(\tau_S + \tau_T) + P_S\tau_S + \sum_{k=1}^K P_k\tau_T$$

dove  $K$  è il numero di canali utilizzabili simultaneamente per la trasmissione da parte dell'utente CR.

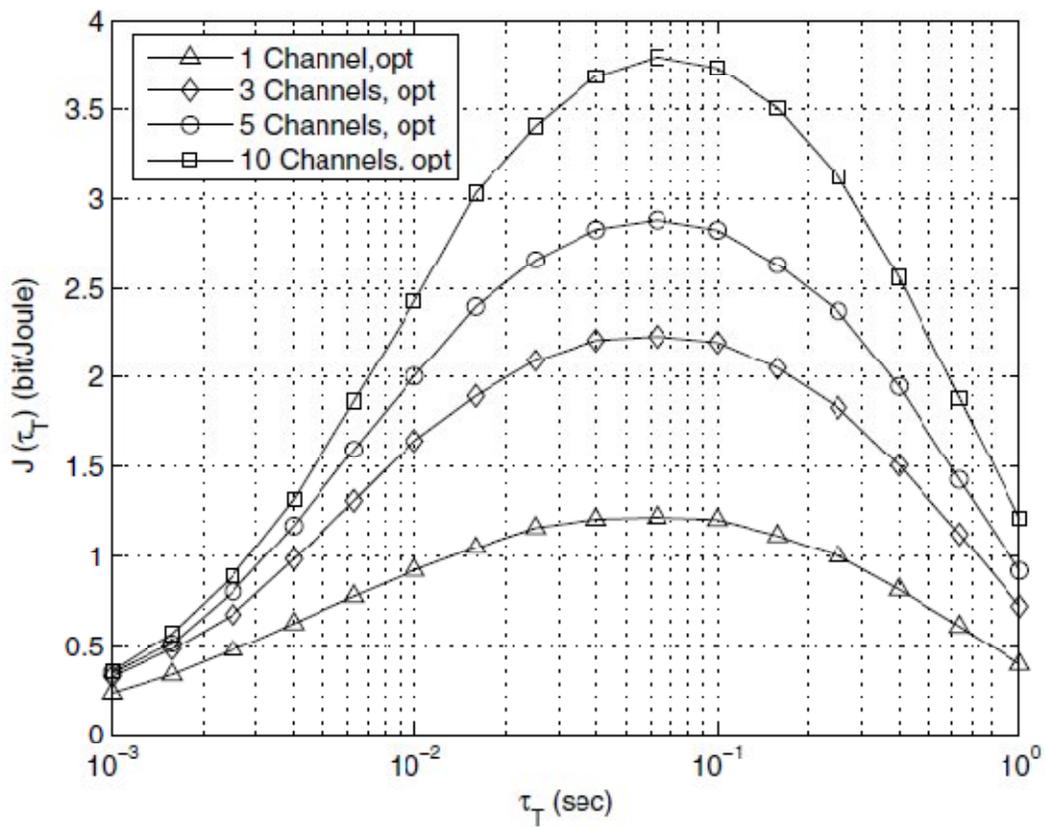
Il rate medio della Cognitive Radio Network in un frame:

$$R(\tau_T) = \frac{\sum_{k=1}^K [(1 - q_I^S(\tau_T))r_k] \tau_T}{\tau_S + \tau_T}$$

dove  $q_I^S$  è la probabilità che l'utente CR trasmetta in un canale e che l'utente primario utilizzi lo stesso, mentre  $r_k$  è il rate di trasmissione sul canale  $k$ -esimo.



**Fig. 4.2** Struttura di un frame in una Cognitive Radio Network [12].



**Fig. 4.3** Efficienza energetica raggiunta con un differente numero di canali disponibili [12].

$$q_I^S(\tau_T) = \int_0^{\tau_T} p_I(t) dt$$

dove  $p_I(t)$  è la funzione di densità di probabilità della durata del tempo di idle.

In conclusione si ottiene L'efficienza energetica come:

$$J(\tau_T) = \frac{R(\tau_T)(\tau_S + \tau_T)}{E(\tau_T)}$$

da cui si è ricavato il grafico (figura 4.3) il quale illustra la performance di efficienza energetica in relazione al tempo di trasmissione e il numero di canali disponibili per la trasmissione. Si nota che l'efficienza aumenta con il numero di canali disponibili, mentre la durata ottima di trasmissione è invariante rispetto a quest'ultimi.

## **Capitolo 5**

### **Conclusioni**

Il problema del consumo energetico nel settore wireless è cruciale per la crescita sostenibile del settore delle telecomunicazioni. Dato che le reti d'accesso wireless crescono esponenzialmente, è importante mettere l'efficienza energetica come priorità nella progettazione e sviluppo delle reti wireless di prossima generazione. Per quanto riguarda LTE questo lavoro fornisce una panoramica sulle recenti tecnologie che si possono applicare per migliorare in particolar modo l'efficienza energetica nelle Stazioni Base, con uno sguardo anche alle ricerche tecnologiche future, che sono ancora in via di sviluppo, come le Cognitive Radio.



## **Bibliografia:**

- [1] T. Chen, H. Zhang, Z. Zhao, X. Chen: “*Towards Green Wireless Access Networks*”, 5th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM), 2010.
- [2] C. Han, T. Harrold, S. Armour, I. Krikidis, S. Videv, P. M. Grant, H. Haas, J. S. Thompson, I. Ku, Cheng-Xiang Wang, T. Anh Le, M. Reza Nakhai, J. Zhang, L. Hanzo, : “*Green Radio: Radio Techniques to Enable Energy-Efficient Wireless Networks*”, Communications Magazine, IEEE Vol. 49 No. 6, 2011.
- [3] S.Vadgama: “*Trends in Green Wireless Access*”, IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), 2011.
- [4] M. Kakemizu, A. Chugo: “*Approaches to Green Networks*”, <http://www.fujitsu.com>.
- [5] G.Gür, F. Alagöz: “*Green Wireless Communications via Cognitive Dimension: An Overview*”, IEEE Network, Vol.: 25 No. 2.
- [6] G. Schmitt: ” *The Green Base Station*”, 4th International Conference on Telecommunication - Energy Special Conference (TELESCON), 2009.
- [7] Wikipedia: [http://it.wikipedia.org/wiki/Long\\_Term\\_Evolution](http://it.wikipedia.org/wiki/Long_Term_Evolution).
- [8] M. Celidonio, L.Pulcini: “*Il sistema 3GPP-LTE: Aspetti di carattere generale e le tecniche di Trasmissione*”, <http://www.fub.it>.
- [9] R.V. Raja Kumar, J. Gurugubelli: ”*How Green the LTE Technology Can be?*”, 2nd International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology (Wireless VITAE), 2011.

- [10] M.Etoh, T. Ohya, Y. Nakayama: “Energy Consumption Issue on Mobile Networks Systems”, International Symposium on Applications and the Internet, SAINT 2008, 2008.
- [11] E. Buracchini , P. Gorla, A. Trogolo: “Software Defined Radio e Cognitive Radio: un nuovo paradigma?”, NOTIZIARIO TECNICO TELECOM ITALIA Anno 17 No. 3, 2008.
- [12] L. Li, X. Zhou, H. Xu, Geoffrey Ye Li, D. Wang, A. Soong: ”Energy-Efficient Transmission in Cognitive Radio Networks”, 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2010.