

ANALISI CONOSCITIVA SULL'ATTRIBUZIONE, L'ASSEGNAZIONE E L'UTILIZZO DELLO SPETTRO RADIOELETTRICO

Deliverable D02

Documento descrittivo degli indicatori di prestazione (KPI)

Sommario

1	Sigle e abbreviazioni	1
2	Premessa.....	3
3	Struttura del documento	3
4	Il contesto internazionale per l'uso efficiente dello spettro.....	4
4.1	Attività degli organismi internazionali	4
4.1.1	<i>Il Report del RSPG sull'uso collettivo dello spettro</i>	4
4.1.2	<i>Le attività in ambito ETSI</i>	6
4.1.3	<i>Le attività della CEPT</i>	7
4.1.4	<i>Analisi costi e benefici</i>	8
4.2	Gli studi della Commissione Europea.....	9
4.2.1	<i>Valutazione dell'efficienza tecnica</i>	9
4.2.2	<i>Valutazione dell'efficienza socioeconomica</i>	11
4.3	La metodologia europea per la valutazione dell'efficienza d'uso dello spettro: impact assessment	11
4.3.1	<i>Principi generali</i>	12
4.3.2	<i>Metodologia</i>	12
5	Approccio metodologico per la valutazione dell'efficienza d'uso dello spettro	14
5.1	La stima dell'efficienza dell'uso dello spettro	14
5.2	Efficienza tecnica.....	15
5.2.1	<i>Efficienza spettrale</i>	15
5.2.2	<i>Utilizzo della banda</i>	16
5.2.3	<i>Condivisione delle risorse spettrali</i>	16
5.3	Efficienza economica.....	16
5.3.1	<i>Consumer Surplus</i>	17
5.3.2	<i>Producer surplus</i>	18
5.3.3	<i>Dall'Economic Surplus all'efficienza</i>	18
5.3.4	<i>Efficienza e AIP</i>	19
5.4	Efficienza sociale.....	19
5.5	Efficienza dell'uso dello spettro	20
6	La valutazione dell'efficienza d'uso attraverso i KPI	21
6.1	Efficienza tecnica.....	21
6.1.1	<i>Efficienza spettrale</i>	21
6.1.2	<i>Utilizzo della banda</i>	23

6.1.3	<i>Condivisione delle risorse spettrali</i>	23
6.2	Valutazione dell'efficienza economica	23
6.2.1	<i>Calcolo dei KPI per l'Economic Surplus</i>	23
6.2.1.1	<i>Producer surplus</i>	24
6.2.1.2	<i>Consumer surplus</i>	24
6.2.1.3	<i>Applicazioni non commerciali</i>	24
6.2.2	<i>Il calcolo degli AIP</i>	24
6.2.2.1	<i>Assunzioni principali per il calcolo degli AIP</i>	26
6.3	Gli indicatori per l'efficienza sociale	28
6.4	La valutazione dell'efficienza a partire dalla stima dei KPI	28
6.4.1	<i>Indicatori di natura quantitativa</i>	29
6.4.2	<i>Indicatori di natura qualitativa</i>	29
6.4.3	<i>Indicatori misti</i>	31
6.4.4	<i>Costruzione di un indicatore unico per l'efficienza</i>	31
7	Caso di studio: i futuri impieghi della banda L	33
7.1	Le attività in ambito CEPT	33
7.2	Metodologia di lavoro applicata per la Banda L	34
7.3	Valutazione delle applicazioni candidate per la Banda L	35
8	Conclusioni	37
9	Riferimenti bibliografici	37
10	Storia del documento	38
	Appendice A: l'efficienza spettrale per i sistemi d'area	39

1 Sigle e abbreviazioni

Le sigle ed abbreviazioni utilizzate nel presente documento hanno i significati qui sotto riportati.

AIP	Administrative Incentive Prices
AGCOM	Autorità per le garanzie nelle comunicazioni
ARCEP	Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes
ASA	Authorised Shared Access
Autorità	Autorità per le garanzie nelle comunicazioni (ove non diversamente specificato)
BER	Bit Error Rate
BWA	Broadband Wireless Access
BWS	Broadband Wireless System
CBS	Common Base Station
CBA	Cost and Benefit Analysis
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CR	Cognitive Radio
CRS	Cognitive Radio System
CS	Consumer Surplus
Commissione	Commissione Europea (ove non diversamente specificato)
CUS	Collective Use of Spectrum
DAB	Digital Audio Broadcasting
EC	European Commission
ECC	Electronic Communications Committee
ERC	European Radiocommunications Committee
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
ETSI TR	ETSI Technical Report
EU	European Union
Fondazione	Fondazione Ugo Bordoni (ove non diversamente specificato)
FUB	Fondazione Ugo Bordoni
FWA	Fixed Wireless Access
KPI	Key Performance Indicator
IMT	International Mobile Telecommunications
IA	Impact Assessment

ICT	Information and Communication Technology
ITU	International Telecommunication Union
LSA	Licensed Shared Access
LTE	Long Term Evolution
MFCN	Mobile Fixed Communication Networks
PS	Producer Surplus
PMR	Private Mobile Radio
RFID	Radio Frequency Identification
RRM	Radio Resource Management
RRS	Reconfigurable Radio System
RSC	Radio Spectrum Committee
RSPG	Radio Spectrum Policy Group
RSPP	Radio Spectrum Policy Programme
S-DAB	Satellite Digital Audio Broadcasting
SDR	Software Defined Radio
SFN	Single Frequency Network
SNR	Signal to Noise Ratio
SRD	Short Range Device
SRD/MG	Short Range Device Maintenance Group
T-DAB	Terrestrial Digital Audio Broadcasting
TDD	Time Division Duplexing
UE	Unione Europea
Unione	Unione Europea (ove non diversamente specificato)
WGFM	Working Group on Frequency Management
WiMAX	Worldwide Interoperability for Wireless Access

2 Premessa

Il presente documento costituisce il secondo rilascio nell'ambito del progetto "Analisi conoscitiva sull'attribuzione, l'assegnazione e l'utilizzo dello spettro radioelettrico" (di seguito Progetto), svolto dalla Fondazione Ugo Bordoni su incarico dell'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni [1].

In continuità con il primo rilascio [2] e in linea con il calendario e gli obiettivi del Progetto, il documento descrive gli indicatori di prestazione (*Key Performance Indicator* - KPI) da utilizzare per ottenere una valutazione oggettiva delle modalità di impiego e dell'efficienza nell'uso dello spettro radio.

La realizzazione dell'inventario dello spettro è infatti propedeutica non solo alla conoscenza dell'effettivo utilizzo dello spettro in Italia, ma anche alle valutazioni dell'efficienza nell'uso stesso dello spettro. Le considerazioni sull'efficienza d'uso dello spettro rappresentano un tema articolato che comprende non solo aspetti di natura tecnica, ma anche altri fattori come il valore sociale e i benefici economici che derivano o possono derivare da uno specifico uso delle frequenze radio. Di ciò si è tenuto conto nello sviluppo della metodologia di indagine che qui si propone.

La metodologia di indagine qui proposta è in linea con le indicazioni e le scelte formulate a livello europeo e, nell'ambito di tale contesto, intende favorire l'analisi della realtà italiana, anche al fine di promuovere un approccio proattivo alla definizione delle migliori strategie per il perseguimento degli obiettivi fissati dal Programma Europeo per le politiche dello spettro radio.

3 Struttura del documento

Questo documento costituisce il secondo rilascio nell'ambito del progetto "Analisi conoscitiva sull'attribuzione, l'assegnazione e l'utilizzo dello spettro radioelettrico", svolto dalla Fondazione Ugo Bordoni su incarico dell'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni e contiene la descrizione degli indicatori di prestazione (*Key Performance Indicator* - KPI) il cui impiego può consentire una valutazione oggettiva delle modalità e dell'efficienza nell'uso dello spettro radio.

Il documento è strutturato come segue:

- il capitolo 4 contiene una breve descrizione delle attività condotte in ambito internazionale al fine di valutare e promuovere l'uso efficiente dello spettro. Lo scopo del capitolo è anche quello di illustrare esempi di metodologie di lavoro finalizzate alla analisi dell'efficienza nell'uso delle frequenze;
- il capitolo 5 descrive la metodologia che si propone nell'ambito del Progetto per la valutazione dell'efficienza nell'uso dello spettro. La metodologia proposta si avvale dell'impiego di specifici indicatori (KPI), in relazione ai quali si forniscono anche indicazioni sulle modalità di valutazione e utilizzo;
- il capitolo 6 approfondisce le modalità di applicazione della metodologia proposta e descritta al capitolo 5;
- il capitolo 7 descrive, infine, il caso di studio rappresentato dalla Banda L, oggetto di studi, ormai quasi conclusi, finalizzati alla promozione dell'uso più efficiente delle risorse spettrali.

È opportuno sottolineare che alcune delle sezioni presenti nel documento riportano la situazione delle attività e degli studi condotti in ambito internazionale, aggiornata alla data di stesura. Le considerazioni ivi presentate, possono essere soggette a modifiche anche sostanziali in tempi relativamente brevi, alla luce delle numerose e rapide iniziative di analisi oggi in corso sui temi dell'inventario e dell'uso efficiente dello spettro radio.

4 Il contesto internazionale per l'uso efficiente dello spettro

4.1 Attività degli organismi internazionali

In questo paragrafo si considerano le attività svolte nel contesto internazionale da parte di diversi organismi (es. CEPT, ITU), al fine di studiare, sviluppare e promuovere metodologie innovative per la condivisione e l'uso efficiente dello spettro. Tali metodologie prendono in considerazione sia l'impiego di tecnologie innovative come le radio cognitive sia l'adozione di nuovi approcci regolamentari (es. ASA/LSA).

4.1.1 Il Report del RSPG sull'uso collettivo dello spettro

Una metodologia innovativa per agevolare l'accesso rapido e dinamico allo spettro indicata dal RSPG [3] riguarda l'uso collettivo dello spettro radio (*Collective Use of Spectrum - CUS model*).

Il principio che persegue l'uso collettivo dello spettro è quello di permettere ad un numero di utenti e/o dispositivi indipendenti di accedere allo spettro nella stessa gamma di frequenze e allo stesso tempo e in una particolare area geografica precisa, sotto un ben definito insieme di condizioni operative.

Sono stati individuati tre diversi possibili tipologie per l'approccio CUS evidenziate in Figura 1:

- **Categoria A:** è richiesta la licenza d'uso ma risulta possibile la condivisione dello spettro con altri utenti
- **Categoria B:** non è richiesta la licenza d'uso ma è limitato l'accesso a determinate applicazioni o tecnologie
- **Categoria C:** non è richiesta la licenza d'uso e risultano minimi i vincoli per la condivisione dello spettro

Si nota che anche per il modello CUS nei casi in cui vi sia un significativo rischio di interferenza può essere imposto un regime di licenza (Categoria A).

La realizzazione del modello di uso collettivo dello spettro CUS richiede particolari soluzioni tecniche e normative. Le soluzioni tecniche più note sono basate sulle radio cognitive, realizzate attraverso tecniche di sensing dello spettro o geolocation database, mentre gli aspetti normativi più avanzati e ancora in fase di studio sono basati sugli approcci LSA (*Licensed Shared Access*) e ASA (*Authorised Shared Access*).

Allo stato attuale esistono diverse applicazioni che utilizzano il modello CUS nella banda sotto 1 GHz allo scopo di trarre il massimo vantaggio dalle condizioni di propagazione favorevoli, mentre le bande tra 1 GHz e 5 GHz sono prevalentemente utilizzate per applicazioni specifiche (approccio B) che di solito utilizzano un numero consistente di dispositivi.

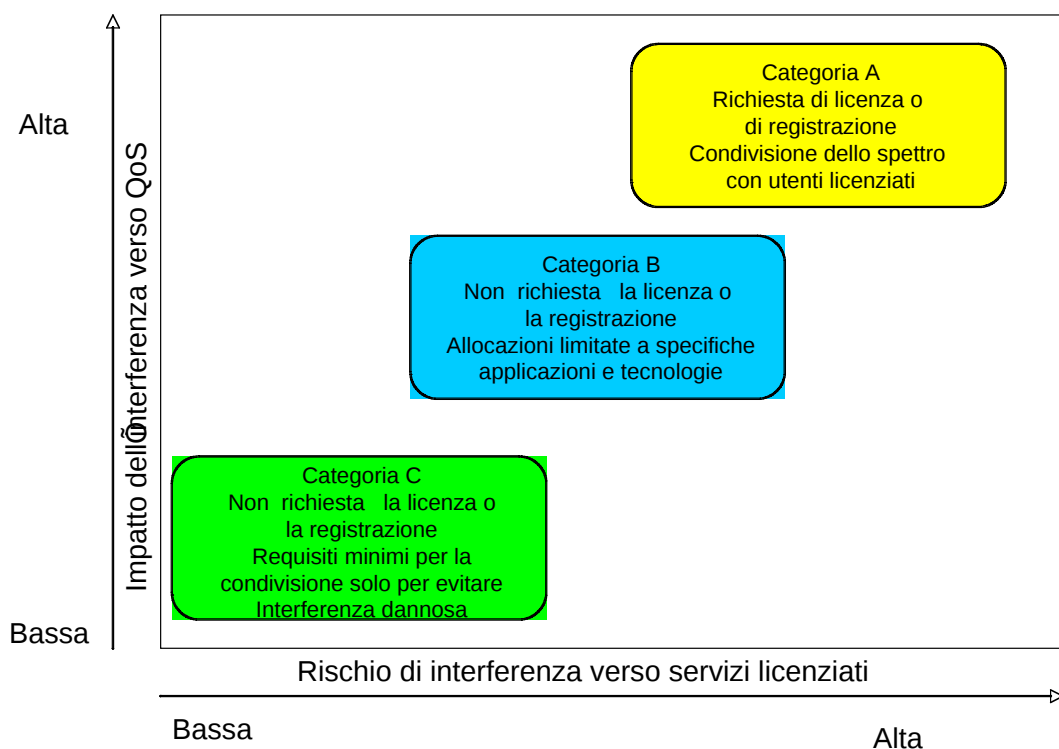


Figura 1. Diverse tipologie di approccio CUS (tratto da [3])

Un esempio specifico di applicazione del modello CUS è rappresentato dai sistemi SRD (*Short Range Devices*) per i quali vengono definite le possibili bande di utilizzo dalla Decisione Europea 2006/771/EC [4] e dalla Raccomandazione dell'European Radiocommunications Committee (ERC) 70-03 [5], suddivise nelle tre categorie di Figura 1 in base a specifiche condizioni di utilizzo dello spettro. Sulla base di un mandato permanente della Commissione Europea alla CEPT, risulta tuttora in fase di revisione l'allegato tecnico della Decisione Europea 2006/771/EC. Il gruppo di lavoro CEPT che si sta occupando di questi aspetti è denominato SRD/MG (*Short Range Device Maintenance Group*), che è responsabile per la definizione e la scelta dei parametri tecnici adatti per la condivisione delle bande CUS specifiche per sistemi e applicazioni quali SRD, RFID e smart metering.

I risultati di maggior successo sono stati ottenuti dall'implementazione del modello CUS nella banda 863-870 MHz (Tabella 1), utilizzata da milioni di dispositivi per applicazioni relative a diversi settori di mercato e spesso caratterizzate da elevati benefici in termini di valore sociale.

Tabella 1. Esempi di implementazione tramite il modello CUS di applicazioni nella banda 863-870 MHz					
Categoria applicazioni	Categoria non specifica SRD	Radio microfoni	Applicazioni di radio identificazione	Applicazioni wireless audio	Allarmi
Esempi	Controlli da remoto	Radio Microfoni	Transazioni a pagamento	Transceivers Audio	Rilevatori fumo
	Automazione edifici	Apparecchi acustici	Controlli di accesso	Guide turistiche	Strumenti di protezione personale
	Sensori		Tracciamento merci	Comunicazioni bi-direzionali	Illuminazione di emergenza

4.1.2 Le attività in ambito ETSI

Le attività condotte dall'ETSI sugli aspetti più innovativi di efficienza d'uso dello spettro si collocano nell'ambito dei sistemi RRS - *Reconfigurable Radio Systems* che si basano principalmente sulle tecnologie SDR (*Software Defined Radio*) e CR (*Cognitive Radio*). Questi sistemi sono in grado di sfruttare la capacità di auto-adattamento e riconfigurabilità delle reti per utilizzare in maniera efficiente lo spettro in funzione delle variazioni dinamiche dell'ambiente radio (es. propagazione, traffico).

La tecnologia SDR sta guadagnando forte interesse per settori di mercato legati anche alla pubblica sicurezza in quanto consente di estendere la durata di apparati a basso costo sempre più diffusi e utilizzati nelle reti radio. Un altro aspetto importante della tecnologia RRS è di rendere possibile l'interoperabilità di diversi standard radio.

ETSI ha recentemente istituito un comitato tecnico che si occupa degli aspetti di standardizzazione di diversi sistemi e applicazioni in grado di operare con la tecnologia RRS. Le attività del comitato includono studi sulla fattibilità del RRS, aspetti di standardizzazione, raccolta e definizione dei requisiti RRS, identificando eventuali criticità delle norme esistenti. Il lavoro si concentra sulle architetture funzionali per SDR, Cognitive Radio e ottimizzazione delle risorse, SDR per stazioni radio base, e analizza e studia anche il ruolo delle RRS nei settori di pubblica sicurezza e della difesa.

Il Comitato tecnico RRS è articolato in quattro gruppi di lavoro:

- **RRS 01:** Aspetti del sistema
- **RRS 02:** Architettura delle apparecchiature radio
- **RRS 03:** Architettura funzionale e Canale Pilota Cognitivo
- **RRS 04:** Pubblica Sicurezza

Le radio cognitive rappresentano una delle possibili tecnologie di cui si può avvalere un sistema RRS.

Nel report ETSI TR 102 802 [6], sono descritti i diversi scenari possibili per l'uso dello spettro e le relative architetture di rete per lo sviluppo della tecnologia CR. In particolare, sono state individuate quattro diverse classi di scenari di utilizzo dello spettro radio per i sistemi radio cognitivi:

- spettro dedicato (bande licenziate);
- spettro condiviso (bande non licenziate);
- uso secondario dello spettro in bande licenziate;
- spettro dedicato per sistemi cognitivi.

In Figura 2 si mostra l'architettura proposta per la gestione dello spettro radio per sistemi radio cognitivi che prevede diversi livelli:

- **Livello di regolamentazione dello spettro**
A causa della scarsità dello spettro radio si prevede che la regolamentazione continuerà a svolgere un ruolo nella assegnazione dello spettro per i diversi servizi di radiocomunicazione. Le tecnologie radio cognitive svolgeranno un ruolo fondamentale per rendere più flessibile e dinamica la gestione dello spettro. La parte di regolamentazione continuerà a svolgere un ruolo significativo come terza parte neutrale tra i vari utilizzatori dello spettro (scientifica, governativa, aeronautico, marittimo, ecc.) per risolvere i possibili problemi di interferenza.
- **Livello di protezione degli utenti del servizio primario**
Applicabile nel caso di scenario che prevede un uso secondario da parte dei sistemi di radio cognitive.
- **Livello per la gestione della coesistenza di diverse tecnologie**

- Livello di Radio Resource Management (RRM): specifico per ogni tecnologia cognitiva
- Livello di apparati radio riconfigurabili: i parametri radio di ogni nodo della rete CR possono essere opportunamente modificati dal livello superiore di RRM.

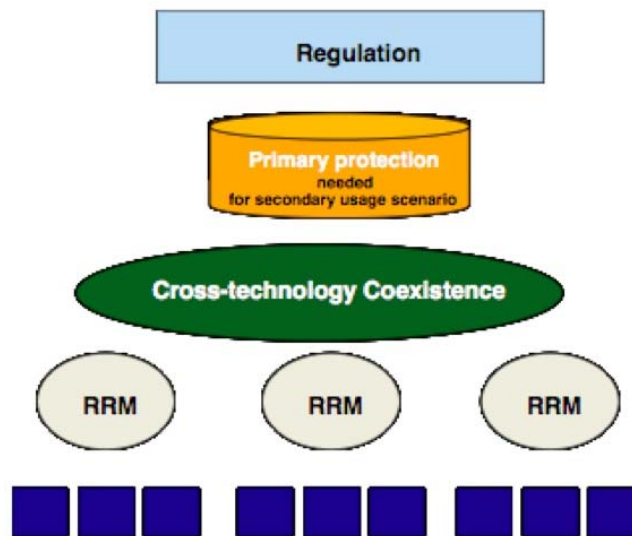


Figura 2. Livelli gestione dello spettro radio per sistemi CS (fonte: ETSI [6])

4.1.3 Le attività della CEPT

In ambito CEPT gli studi sull'uso efficiente dello spettro possono essere categorizzati rispetto le seguenti tematiche:

- Approcci innovativi di condivisione dello spettro:
 - Sistemi radio cognitivi
 - LSA/ASA
- Valutazioni sull'efficienza d'uso dello spettro per bande specifiche, tra cui:
 - Analisi della banda L
 - Analisi della banda TDD a 2 GHz
 - Analisi della banda 3.4-3.6 GHz
 - Uso futuro della banda 2.3-2.4 GHz

Le attività citate si trovano attualmente ciascuna in un diverso stato di avanzamento.

Tra le attività in fase di completamento vi sono gli studi del gruppo di lavoro SE 43 che si occupa della definizione dei requisiti tecnici e operativi per il funzionamento dei dispositivi cognitivi nei possibili spazi bianchi della banda 470-790 MHz. L'utilizzo degli spazi bianchi è fondamentalmente basato sull'impiego di tecniche cognitive.

Analogamente, le valutazioni condotte al fine di promuovere l'uso efficiente della banda L, sono state quasi ultimate dal gruppo di lavoro WG FM50, che ha il compito di individuare le applicazioni e servizi che possono risultare più adatti per impiegare questa banda, oggi scarsamente utilizzata.

Tra le attività di maggior rilievo in fase di prossimo avvio si citano:

- **ASA/LSA:** le valutazioni e le analisi dei concetti di ASA e LSA sono stati sinora affrontati dal Correspondence Group on Cognitive Radio Systems (CG CRS), ma nel settembre 2012 è stato istituito un apposito gruppo di lavoro, il WG FM 53 che ha lo scopo di effettuare studi su:
 - White Space Devices, con particolare riferimento alla banda UHF
 - Licensed Shared Access
 - Obiettivi generali sui sistemi radio riconfigurabili (RRS)
- **Banda a 2 GHz:** diversi gruppi di lavoro stanno conducendo studi sulla banda TDD a 2 GHz con l'obiettivo di individuare un elenco di opzioni alternative per l'armonizzazione delle bande 1900-1920 MHz e 2110-2125 MHz (spettro non accoppiato).
- **Banda 3400-3800 MHz:** si è in procinto di intraprendere studi sulla modifica delle condizioni tecniche in materia di armonizzazione dello spettro nella banda 3400-3800 MHz che risulta attualmente poco utilizzata per lo sviluppo dei sistemi WiMax.
- **Banda 2.3-2.4 GHz:** è stato da poco istituito un nuovo gruppo di lavoro dedicato alla banda 2.3-2.4 GHz, il WG FM52. Il gruppo dovrà sviluppare una decisione ECC finalizzata ad implementare misure armonizzate per reti di comunicazione fisse e mobili (MFCN), inclusi i sistemi radio a banda larga. L'avvio di uno specifico gruppo di lavoro fa seguito ad un questionario al quale le Amministrazioni della CEPT hanno risposto in precedenza. Nel questionario stati indicati i sistemi ritenuti più adatti all'uso futuro di questa banda quali i sistemi IMT (LTE e anche WiMax), BWA, BWS, applicazioni mobili o servizi e tecnologie che si basano sul principio della neutralità nell'uso dello spettro.

4.1.4 Analisi costi e benefici

Una possibile metodologia per identificare nella fase 6 dell'IA la migliore opzione per la banda considerata è l'analisi e il confronto dei costi e benefici che deriverebbero da ogni diversa opzione. Tale metodologia CBA (*Costs and Benefits Analysis*) prevede l'applicazione dei seguenti principi fondamentali:

- i costi e i benefici possono essere di tipo finanziario o non finanziario;
- bisogna applicare il principio di proporzionalità: bisogna concentrarsi sui costi e benefici più significativi e non su quelli di minor importanza;
- deve essere indicato con chiarezza chi sostiene i costi e chi riceve i benefici;
- i costi e benefici devono essere valutati sia per servizi commerciali che per gli enti governativi competenti e non si devono concentrare solo sullo sviluppo del mercato delle comunicazioni elettroniche, ma devono essere valutati globalmente tenendo conto degli interessi economici dei servizi già presenti sul mercato e della pubblica utilità;
- l'analisi dei costi e benefici in settori al di fuori della conoscenza abituale di ECC sarà effettuata attraverso un processo di consultazione tra le parti interessate;
- quando si introduce un nuovo servizio/applicazione, la valutazione d'impatto dovrebbe coprire la valutazione delle conseguenze per i servizi già esistenti nella banda che dovranno condividere con i nuovi servizi;
- dovrebbero essere valutati anche i benefici che la CEPT e gli Stati membri potrebbero ottenere (IVA, imposte sul reddito, diritti di spettro).

Quando possibile, i costi e benefici dovrebbero essere quantificati. Risulta in generale più complesso quantificare i benefici in quanto si differenziano a seconda degli operatori, produttori e consumatori/utenti interessati alla banda considerata.

Devono essere chiaramente identificate e descritte le sorgenti di informazioni e la qualità dei dati. Le incertezze devono essere indicate ai fini della completezza e trasparenza. Nei casi in cui costi e benefici non possono essere quantificati con precisione, è possibile individuare delle stime (es. intervalli in Euro da/a) oppure può essere fornita una valutazione qualitativa.

4.2 Gli studi della Commissione Europea

Nell'ambito degli studi che la Commissione Europea ha avviato nell'ottobre del 2011, attraverso il ricorso a consulenti, già introdotti in [2], sono state formulate alcune considerazioni e valutazioni preliminari circa l'efficienza dell'uso dello spettro radio nell'intervallo di frequenze compreso tra 400 MHz e 6 GHz.

I risultati conseguiti dai consulenti sono stati resi pubblicamente disponibili di recente [7], dopo la presentazione preliminare avvenuta nel corso di un workshop tenutosi il 6 luglio 2012 e vengono brevemente richiamati di seguito.

L'approccio proposto dai consulenti della Commissione identifica tre differenti forme di efficienza, necessarie per valutare complessivamente l'efficienza nell'uso dello spettro:

- efficienza tecnica
- efficienza economica
- efficienza sociale

Non è possibile descrivere e quantificare nessuno dei termini precedenti attraverso una singola metrica e per questo occorre identificare una opportuna metodologia di valutazione. L'efficienza economica e l'efficienza tecnica sono descritte in un unico indicatore di efficienza socioeconomica.

La valutazione dell'efficienza di una banda permette di facilitare l'identificazione di possibili miglioramenti nell'uso dello spettro, in linea con quanto descritto in [9]. Occorre, tuttavia, tener presente che prima di attuare un intervento che possa potenzialmente portare ad un miglioramento nell'efficienza d'uso dello spettro, è necessario valutare con attenzione anche i costi (es. costi di migrazione di una applicazione da una banda ad un'altra banda) derivanti da tale intervento.

4.2.1 Valutazione dell'efficienza tecnica

Gli studi della Commissione identificano 4 indicatori sostanzialmente indipendenti sulla base dei quali valutare l'efficienza tecnica nell'uso dello spettro:

- **Grado di utilizzo:** quanto e per quanto tempo una data risorsa spettrale è realmente utilizzata.
- **Trend della domanda:** in aumento, stabile o in diminuzione.
- **Tecnologia:** efficienza relativa della tecnologia, riportata con lo stato dell'arte.
- **Estensione geografica:** copertura o estensione geografica a livello nazionale dell'area in cui una certa risorsa è utilizzata.

I KPI indicati, devono poi essere opportunamente combinati per ottenere un indicatore di efficienza tecnica.

L'efficienza tecnica nell'uso dello spettro può difficilmente essere quantificata in modo preciso e, anche qualora ciò fosse possibile, disporre di un dato quantitativo asettico potrebbe ingenerare confusione. Gli studi della Commissione hanno ritenuto quindi più utile procedere ad una valutazione quantitativa più grossolana, ma maggiormente significativa. Un approccio di tal genere presenta anche minori svantaggi di fronte alle difficoltà oggettive nel reperire le informazioni sulle diverse bande. Va ad ogni modo ribadito che per le applicazioni e le bande per le quali non erano disponibili informazioni o tali informazioni erano disponibili solo in forma limitata, non è stato possibile procedere con le valutazioni di efficienza. La Figura 3 presenta i diversi livelli di qualità delle informazioni che è stato possibile reperire per le diverse bande oggetto di studio, mentre la Figura 4 riporta la valutazione dell'efficienza tecnica relativa nell'uso di tali bande. Come

si può notare per quanto riguarda l'Italia non è stato possibile procedere con le valutazioni di efficienza a causa della scarsa disponibilità dei dati necessari.

Per quanto riguarda le famiglie di servizi/applicazioni come quelli in capo al settore della Difesa, i PPDR, i servizi scientifici o la sicurezza aero-marittima, le scelte su possibili modifiche nell'uso dello spettro devono essere condotte sulla base di precise scelte politiche, considerando quante e quali difficoltà si possono potenzialmente incontrare nell'attuare interventi indirizzati alla riduzione delle eventuali inefficienze nell'uso dello spettro.

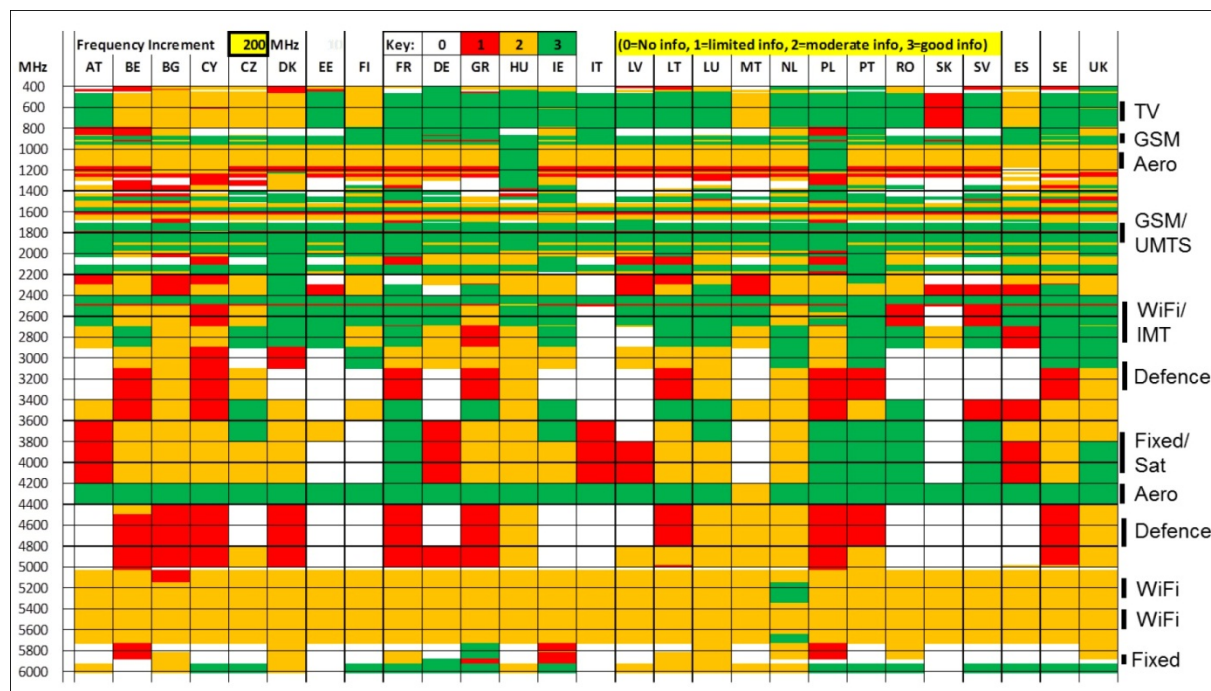


Figura 3. Livelli di qualità delle informazioni disponibili (fonte: [7])

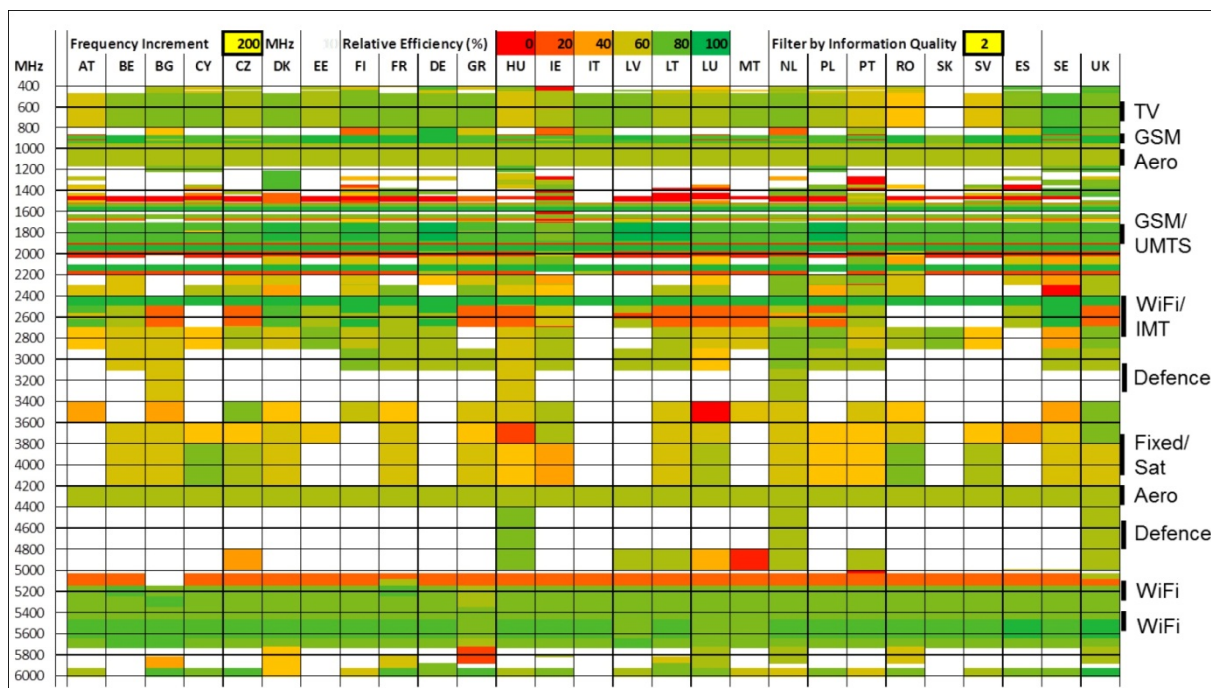


Figura 4. Valutazione dell'efficienza tecnica relativa nell'intervallo di frequenze tra 400 MHz e 6 GHz nei diversi Stati Membri (fonte: [7])

4.2.2 Valutazione dell'efficienza socioeconomica

Le valutazioni condotte dai consulenti della Commissione circa l'efficienza socioeconomica nell'uso dello spettro, rappresentano un punto di partenza per ulteriori studi di approfondimento.

Ai fini della valutazione è stato utilizzato un solo indicatore derivato da dati pubblicamente disponibili su:

- Valore economico incrementale derivante dal guadagno/perdita dovuta a modifiche delle allocazioni spettrali.
- Valore medio delle allocazioni.
- Valori delle aste o stima del costo opportunità per un insieme di bande/applicazioni.

I dati raccolti sono principalmente, ma non esclusivamente, di natura economica.

Le stime di efficienza socioeconomica, come quelle di efficienza tecnica, sono fornite in modo incrementale per valutare se esiste un utilizzo dello spettro di valore superiore all'uso corrente. I risultati ottenuti sono presentati in Figura 5 per famiglie di applicazioni; è stata adottata una normalizzazione rispetto al valore/MHz stimato per l'impiego delle frequenze da 600 MHz a 1 GHz per il servizio mobile. I colori utilizzati indicano la dimensione dei blocchi di spettro incrementali (blu: fino a 10 MHz; grigio: da 10 a 20 MHz; rosa: oltre 20 MHz).

	400-600 MHz	600 MHz - 1 GHz	1-2.1 GHz	2.1-3 GHz	3-4 GHz	4-6 GHz
Cellular/BWA	0.01	1	0.5	0.1	0.01	0.001
Broadcasting (Terrestrial)	0.5	0.1	0.01	0.001	0	0
PMR/PAMR	0.1	0.1	0.01	0.01	0	0
Fixed links	0.1	0.1	0.005	0.001	0.001	0.001
PMSE ⁴²	0.1	0.1	0.01	0.001	0.001	0.001
Satellite (civil)	0.1	0	0.005	0.005	0.005	0.001
SRDs ⁴³	1	1	0.1	0.01	0.001	0.001
WTDS (WiFi)	1	1	1	1	0.1	0.1

Figura 5. Valutazione incrementale dell'efficienza socioeconomica nell'intervallo di frequenze tra 400 MHz e 6 GHz (fonte: [7]).

4.3 La metodologia europea per la valutazione dell'efficienza d'uso dello spettro: impact assessment

L'*Impact Assessment (IA)* rappresenta una metodologia generale di studio definita in ambito Europeo¹ per valutare l'impatto delle politiche di gestione dello spettro radio, considerandone i relativi costi e benefici. Le

¹ <http://ec.europa.eu/governance/impact>

valutazioni di impatto non devono tuttavia essere considerate alla stregua di analisi economiche applicate a decisioni tecniche, ma rappresentano lo strumento che permette di valutare la correttezza delle scelte tecniche, tenuto conto delle ricadute economiche e sociali. La metodologia di studio che implementa le valutazioni di impatto è descritta nel documento ECC Report 125 [8]; essa deve essere applicata alle possibili opzioni regolamentari applicabili ad una certa banda, al fine di identificare e promuovere l'uso efficiente dello spettro.

Si riportano nel seguito i principi generali dell'IA e la descrizione della metodologia di implementazione dell'IA. Si osservi fin da ora che la metodologia proposta in ambito ECC è stata applicata a casi reali ritenuti di particolare interesse a livello internazionale, come ad esempio il caso della Banda L (1452-1492 MHz), sul quale si tornerà al capitolo 7.

4.3.1 Principi generali

I principi generali che devono essere considerati nelle valutazioni di IA possono essere riassunti come segue:

- Le valutazioni di impatto devono fornire una stima dei costi e benefici delle diverse opzioni analizzate per l'utilizzo della banda;
- L'opzione di non intervenire sullo stato attuale d'uso della banda deve sempre essere presa in considerazione;
- È necessario considerare l'impatto delle scelte considerando anche gli effetti sugli utenti operanti in bande adiacenti;
- Le valutazioni di impatto dovrebbero rappresentare una parte fondamentale del processo decisionale per la regolamentazione dello spettro;
- Le valutazioni d'impatto devono essere ispirate al principio di proporzionalità e mirano ad avere un basso livello di incertezza utilizzando i dati pertinenti disponibili per ridurre questa incertezza. Tutte le aree di incertezza devono essere chiaramente identificate.
- Le valutazioni di impatto non sono da intendersi come un'analisi economica ma sono uno strumento di supporto per dimostrare che la decisione tecnica adottata è corretta sulla base del confronto e analisi di diverse opzioni tecniche.

La valutazione d'impatto dovrebbe prendere in considerazione l'intera gamma di costi e benefici sia di tipo commerciale che di tipo sociale coinvolgendo tutti gli stakeholders interessati e considerando anche gli effetti sull'ambiente (es. emissioni di carbonio).

La credibilità della valutazione di impatto dipenderà dalla qualità e accuratezza dei dati quantitativi per la valutazione dei costi e dei benefici. Si dovrà segnalare quando i dati sono carenti o parziali e identificare le incertezze che ne derivano.

4.3.2 Metodologia

La metodologia per il completamento dell'impact assessment (IA) è articolata in diverse fasi di seguito elencate:

1. Fase 1: identificazione del problema

Il problema che occorre affrontare può essere identificato in risposta ad un sollecito proveniente dall'ECC, dal gruppo WGFM o su richiesta della Commissione Europea.

2. Fase 2: identificazione e descrizione degli aspetti tecnici e normativi e degli obiettivi per le diverse applicazioni (criteri di confronto):

- compatibilità dell'applicazione con il quadro regolamentare in atto;
- disponibilità di apparati su larga scala – stato della standardizzazione;

- combinazione/condivisione con altre applicazioni/utizzi;
- massimizzazione benefici sociali e economici;
- armonizzazione per massimizzare le economie di scala
- compatibilità con l'uso attuale della banda sia all'interno che fuori dalla CEPT

3. Fase 3: opzioni regolamentari per le diverse applicazioni

Devono essere studiate le opzioni regolamentari che consentono di combinare su una medesima banda più applicazioni con la condizione che ci sia almeno una Amministrazione che supporta la possibilità di utilizzare diverse applicazioni nella stessa banda e che i requisiti minimi di banda per ogni specifica applicazioni siano soddisfatti;

4. Fase 4: recupero dei dati e delle informazioni sulle applicazioni

Sulla base dei criteri definiti nella fase 2 occorre recuperare le informazioni non disponibili per le applicazioni di interesse.

5. Fase 5: impatto sulla concorrenza (solo se ritenuto opportuno)

Sarebbe opportuno individuare eventuali impatti sulla concorrenza causati dalle opzioni considerate. Potrebbe essere importante valutare il rischio di opzioni che hanno un effetto negativo sul funzionamento dei mercati al fine di tenerne conto nel processo decisionale.

6. Fase 6: valutazione dell'impatto

Individuazione delle soluzioni migliori (*killer application*) sulla base dei risultati degli studi delle diverse applicazioni utilizzando i criteri di confronto definiti nella fase 2.

7. Fase 7: monitoraggio e valutazione

Per poter valutare l'effetto futuro delle decisioni, è importante definire quali sono i risultati attesi e in quali tempi si prevede di raggiungere gli obiettivi previsti. Sarebbe inoltre opportuno promuovere un'attività di controllo dei risultati ottenuti per verificare ad esempio se i costi e benefici attesi si sono concretizzati nei tempi previsti.

5 Approccio metodologico per la valutazione dell'efficienza d'uso dello spettro

5.1 La stima dell'efficienza dell'uso dello spettro

Il primo passo della metodologia proposta consiste nella valutazione dell'efficienza globale dell'uso dello spettro, che si ottiene combinando i diversi fattori che compongono l'efficienza stessa.

Generalmente con il termine “efficienza” si indica la quantità di benefici (output) che si possono ottenere con una data quantità di risorse (input).

$$\text{Efficienza} = \frac{\text{output}}{\text{input}}$$

Più nello specifico, considerando l'uso dello spettro, l'output può essere considerato la quantità di informazione trasmessa (bit), mentre come input si può considerare la quantità di spettro che viene utilizzata (o che parimenti è resa inutilizzabile per altri usi).

Tuttavia, per una valutazione accurata dell'efficienza nell'uso dello spettro non è sufficiente considerare gli aspetti di trasporto delle informazioni, ma si deve identificare una metodologia più completa che identifichi e permetta di stimare tutti i distinti elementi che concorrono alla determinazione dell'efficienza stessa.

Dal punto di vista metodologico, in linea con quanto descritto al paragrafo 4.2, è stato scelto di far riferimento a:

- efficienza tecnica;
- efficienza economica;
- efficienza sociale.

L'efficienza tecnica è un concetto molto vasto che considera, oltre alle scelte tecniche adottate per l'uso dello spettro (es. tecniche di accesso, riuso delle risorse), anche altri parametri di input, come ad esempio le scelte tecniche di dispiegamento della rete, in termini di apparati, che possono anche avere implicazioni per la valutazione degli altri tipi di efficienza (es. gli investimenti per il roll out delle reti di comunicazione elettronica dipendono fortemente dalle scelte tecnologiche adottate nella progettazione della rete). Tutti questi elementi devono essere utilizzati per realizzare l'output più grande possibile con il minimo costo per le risorse. L'efficienza tecnica può quindi essere espressa, in termini generali, come:

$$\eta_t = \text{efficienza tecnica} = \frac{\text{output}}{\text{costo di tutti gli input}}$$

L'**efficienza tecnica** ricomprende anche l'efficienza spettrale, che ne costituisce un termine dominante e che, per questo, è opportuno introdurre concettualmente fin da ora. Sebbene non esista una definizione chiara e univoca applicabile a tutti i servizi wireless, l'efficienza spettrale è solitamente valutata come la massima quantità di informazione che può essere trasmessa con una certa quantità di spettro a disposizione o viceversa la minima quantità di spettro necessaria per trasmettere una determinata quantità di informazione:

$$\eta_w = \text{efficienza spettrale} = \frac{\text{output}}{\text{spettro utilizzato}}$$

Nel successivo paragrafo 5.2 si chiarisce la natura delle valutazioni necessarie per una stima corretta dell'efficienza spettrale e, conseguentemente, di quella tecnica, mentre si rimanda alla Appendice A per una trattazione esemplificativa più ampia riferita al caso specifico dei sistemi d'area.

Per quanto concerne gli altri termini che contribuiscono alla stima dell'efficienza d'uso dello spettro, l'**efficienza economica** è, invece, finalizzata a creare il maggiore valore per l'utente, con il minor numero di input:

$$\eta_e = \text{efficienza economica} = \frac{\text{valore dell'output}}{\text{costo degli input}}$$

Il valore degli output è solitamente legato al tipo di informazioni trasmesse e al vantaggio per l'utente finale (valore del servizio), piuttosto che alla quantità di informazione trasmessa. Il valore attribuito ad un servizio è fortemente dipendente dalla percezione e dall'utilizzo del servizio stesso da parte degli utenti.

L'ultimo elemento che deve essere considerato per la valutazione globale dell'efficienza è l'**efficienza sociale**, per la quale l'output è il valore per il servizio sociale (raggiungimento degli obiettivi dei servizi pubblici, livello di beneficio per i cittadini, la società e l'ambiente).

$$\eta_s = \text{efficienza sociale} = \frac{\text{valore sociale dell'output}}{\text{costo di tutti gli input}}$$

Chiaramente il peso da attribuire a ciascun tipo di efficienza e le modalità con cui vanno combinate le efficienze dipendono dalle tecnologie radio e dai servizi offerti che si considerano: chi pianifica un sistema radio deve considerare l'efficienza spettrale e l'efficienza tecnica dei diversi servizi e delle diverse tecnologie, ma deve poi pesare i costi di ogni servizio con il valore che tale servizio ha creato. Una pianificazione ottimale deve essere, quindi, in grado di massimizzare l'intero sistema delle efficienze, che chiaramente richiede un compromesso tra le diverse componenti delle efficienze stesse, le quali non potranno essere massimizzate tutte contemporaneamente.

5.2 Efficienza tecnica

L'efficienza nell'uso dello spettro, valutata dal punto di vista tecnico, dipende fortemente dal tipo di servizio che si considera (ad esempio sistemi d'area, tra cui i sistemi radiomobili o broadcast, i collegamenti punto-punto o punto multi-punto, tra cui i ponti radio a microonde).

Per ogni sistema, al fine di ottenere una valutazione complessiva circa l'efficienza nell'uso dello spettro, devono essere identificati diversi indicatori (KPI), che coincidono o sono derivabili dai dati già considerati al paragrafo 12.4.4 del Del.01 [2], raccolti per la realizzazione preliminare dell'inventario dello spettro radio. I KPI devono poi essere opportunamente combinati per ottenere la stima corretta dell'efficienza tecnica.

Si è già citata l'importanza della stima dell'efficienza spettrale, come uno dei fattori principali che devono essere valutati per conoscere l'efficienza tecnica, ma vi sono anche altri elementi da considerare per comprendere se lo spettro è utilizzato efficientemente dal punto di vista tecnico.

La metodologia che si propone intende valutare l'efficienza tecnica nell'uso dello spettro in riferimento a tre indicatori (KPI) tra loro indipendenti, che vengono illustrati nei seguenti paragrafi, i quali devono essere opportunamente combinati per ottenere stime corrette:

- efficienza spettrale
- utilizzo della banda
- condivisione delle risorse spettrali

5.2.1 Efficienza spettrale

Nella metodologia che si propone, l'efficienza spettrale rappresenta l'indicatore principale per stimare l'efficienza tecnica e viene espressa come prodotto pesato (con pesi eventualmente unitari) di tre efficienze parziali:

$$\eta_w = w_s \eta_s \cdot w_f \eta_f \cdot w_t \eta_t$$

dove:

- η_f è definita come efficienza in frequenza e si misura in bit/s/Hz;

- η_t è definita come efficienza nel tempo;
- η_s è definita come efficienza nello spazio.

Le tre efficienze parziali si riferiscono a tre differenti ambiti tecnologici: η_f è collegata alla capacità di realizzare soluzioni sistemistiche capaci di sfruttare tecnologicamente al meglio le risorse radio; η_t tiene conto dell'uso nel tempo delle risorse radio; η_s è strettamente collegata all'uso nello spazio delle risorse radio (es. estensione dell'area di impiego di una certa frequenza).

Anche in assenza di una definizione di efficienza spettrale applicabile univocamente a tutti i tipi di servizi, con gli opportuni accorgimenti, possono essere condotte valutazioni dei fattori citati (η_w , η_t , η_f) in riferimento a qualsiasi servizio/applicazione. Per alcuni tipi di sistemi, come i sistemi d'area, la formulazione teorica per le valutazioni di efficienza può essere inoltre estesa come illustrato a titolo esemplificativo in Appendice A. Questo permette, con grande versatilità, di valutare l'efficienza tecnica attraverso una formulazione equivalente a quella sopra citata, che può dare risalto ad aspetti eventualmente ritenuti di particolare rilievo, riferiti ad esempio a particolari grandezze o domini (es. efficienza per cella).

È utile quindi sottolineare che la valutazione dell'efficienza spettrale, così come proposta, consente in particolare di:

- valutare l'efficienza spettrale di una tecnologia, stimata su base comparativa rispetto allo stato dell'arte dell'evoluzione tecnologica per un certo servizio e/o in una certa banda;
- stabilire come una data risorsa spettrale viene utilizzata nel tempo;
- valutare come la risorsa spettrale è utilizzata sul territorio, in riferimento ad esempio all'estensione geografica della copertura.

Queste ultime valutazioni, che all'occorrenza possono anche essere messe in evidenza in maniera disaggregata, rispetto al parametro unico di efficienza spettrale, ricalcano gli indicatori per l'efficienza tecnica emersi dagli studi effettuati dalla Commissione Europea.

5.2.2 Utilizzo della banda

Utilizzo della banda. È opportuno disporre dell'informazione circa l'attuale utilizzo di una certa risorsa spettrale. Ad esempio, è noto che alcune bande, designate per specifiche applicazioni non sono mai state oggetto di effettiva implementazione di sistemi che realizzano tali applicazioni. L'indicazione sul mancato utilizzo di una risorsa spettrale, ad esempio, fornisce un'utile e importante indicazione per la valutazione dell'(in)efficienza d'uso dello spettro.

5.2.3 Condivisione delle risorse spettrali

L'uso condiviso delle risorse spettrali può e deve essere declinato in riferimento a diversi aspetti di interesse. La condivisione può ad esempio essere riferita a diverse applicazioni che utilizzano la medesima risorsa spettrale, ma può anche essere estesa a indicazioni circa potenziali criticità derivanti dall'uso di risorse frequenziali adiacenti da parte di applicazioni diverse.

Soprattutto in riferimento al contesto italiano, l'uso condiviso delle risorse spettrali deve anche essere in grado di "catturare" le informazioni relative a possibili problemi di coesistenza di sistemi diversi che operano nella medesima banda, ma su aree geografiche differenti, considerate sia all'interno del territorio nazionale che in riferimento alla suddivisione delle risorse tra Paesi confinanti.

5.3 Efficienza economica

L'efficienza economica ha come obiettivo la creazione del più alto valore possibile per i consumatori e le imprese con la minore quantità di input. In linea teorica, l'efficienza economica può essere espressa come:

$$\eta_e = \text{efficienza economica} = \frac{\text{valore output}}{\text{costo input}}$$

Il valore dell'output è principalmente connesso al tipo di informazioni scambiate e alla loro utilità per i consumatori (valore di servizio) più che alla quantità delle stesse. Per esempio, alcuni utenti potrebbero attribuire maggiore valore a 10 minuti di telefonata con il cellulare piuttosto che ad un'ora di televisione broadcast. Dunque, risulta difficile stimare direttamente tale valore.

Da un punto di vista pratico, un approccio adeguato e percorribile per calcolare efficienza economica può essere basato sui concetti di *Consumer Surplus* (CS) and *Producer Surplus* (PS):

$$\eta_e = CS + PS$$

Nei paragrafi seguenti si descriveranno tali concetti, che di fatto rappresentano gli indicatori per la valutazione dell'efficienza tecnica, con maggior dettaglio.

5.3.1 Consumer Surplus

Il *Consumer Surplus* può essere definito come l'utilità eccedente (o surplus, appunto) al di sopra del prezzo attualmente pagato per un bene. Il diagramma in Figura 6 fornisce una semplice illustrazione grafica del concetto.

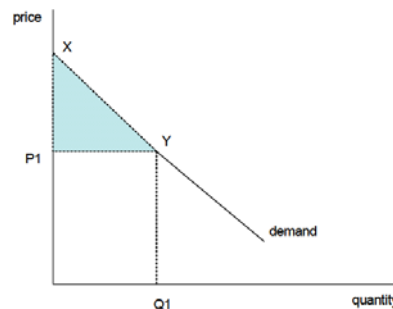


Figura 6. Consumer surplus

La curva disegnata rappresenta una semplice funzione di domanda lineare, che al decrescere del prezzo porta ad una diminuzione della quantità. Posto un prezzo P1, la quantità venduta sarà dunque Q1. Tutti gli utenti che avrebbero acquistato ad un prezzo maggiore di quello fissato ne ottengono, come detto, un surplus, pari alla differenza fra la loro volontà a pagare (cioè il prezzo massimo che pagherebbero per il bene in questione) e il prezzo effettivamente pagato. Il triangolo colorato composto dall'asse dei prezzi, dalla funzione di domanda e dal prezzo P1, indicato in figura, rappresenta graficamente il concetto di Consumer Surplus.

All'aumentare del prezzo del bene, il *Consumer Surplus* quindi diminuirà, poiché ci si avvicina al valore di *willingness-to-pay* (da un punto di vista grafico si muove verso l'alto il cateto del prezzo P1, per cui l'area del triangolo del Consumer Surplus diminuisce). Inoltre, più la curva di domanda è inelastica, maggiore sarà il consumer surplus, poiché tale caratteristica rende maggiore l'angolo di incidenza della curva di domanda con l'asse dei prezzi.

Una criticità associata alla definizione standard del *Consumer Surplus* è che, al variare del prezzo, il reale reddito del consumatore varia. Dunque, per calcolare un indicatore più accurato del beneficio del surplus, si dovrebbe realizzare un aggiustamento in modo da annullare l'effetto della differenza di reddito reale a differenti livelli di prezzo (curva di domanda compensata). Tuttavia, quando l'effetto di reddito non è molto ampio, il *Consumer Surplus* indicato nell'area colorata al di sotto della curva di domanda del mercato è considerato un modo abbastanza realistico di misurare il benessere derivante dall'utilizzo del bene.

5.3.2 Producer surplus

Il Producer surplus è collegato alla nozione di consumer surplus. Esso può essere definito come il ricavo che un'impresa ottiene da un qualsiasi prodotto o servizio al di sopra del minimo che accetterebbe per mantenere lo stesso livello di offerta. In altre parole, il *Producer Surplus* misura la rendita accumulata dal produttore e può essere definito come la differenza fra il fatturato e i costi economici evitabili. La Figura 7 illustra il concetto.

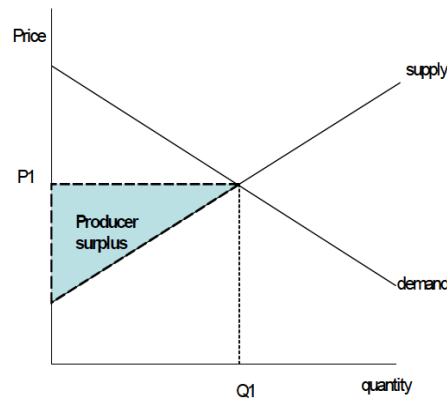


Figura 7. Producer surplus

Alla curva di domanda, vista nella figura precedente, qui si aggiunge la curva di offerta, che al variare del prezzo di mercato associa la quantità prodotta dalle imprese. Poiché le quantità minori di Q_1 verrebbero vendute anche a prezzi minori, il produttore (o l'insieme di essi) ne riceve un surplus pari all'area del triangolo mostrato in figura, che rappresenta la differenza in ogni punto fra il prezzo a cui si vende il bene e quello minimo a cui si era disposti a venderlo (pari ai costi evitabili o marginali), analogamente a quanto succede per il consumer surplus.

Ovviamente, al variare della curva di domanda, varierà il producer surplus. Dunque, quando l'offerta è più elastica, ci si aspetta che il *Producer Surplus* sia più basso di quando l'offerta è relativamente inelastica. È importante tenere presente che, in realtà, il producer surplus, a differenza del consumer surplus, può anche assumere valori negativi. Sebbene un *Producer Surplus* negativo non sia sostenibile nel lungo periodo, i produttori potrebbero essere preparati ad accettare perdite iniziali all'esordio del ciclo di vita di un prodotto, nella fase di creazione del mercato.

È anche molto importante notare che i profitti e i costi riportati nei libri contabili non sono equivalenti a quelli reali. Il calcolo di questi ultimi deve prendere in considerazione l'inflazione ed il reale costo del capitale. Anche se nel grafico non è mostrato, si può facilmente notare come al punto di equilibrio, in cui domanda e offerta si equivalgono e vi è intersezione fra le due curve, possono coesistere entrambi i surplus.

La somma di questi rappresenta il beneficio economico del mercato.

5.3.3 Dall'Economic Surplus all'efficienza

Finora abbiamo analizzato i concetti di Consumer e Producer Surplus, che sommati costituiscono l'*Economic Surplus* di cui la società può beneficiare a seguito dalla presenza sul mercato di un dato bene, che nel nostro caso è rappresentato da un'applicazione o un servizio che utilizzano lo spettro radio.

Per avere una misura dell'efficienza dell'allocazione di una determinata porzione di spettro ad una certa applicazione, si potrà procedere ad una comparazione del surplus derivante dalla diffusione di tale applicazione rispetto a quello derivante da altre applicazioni che potrebbero utilizzare la stessa porzione di spettro. In questo senso, la misura dell'efficienza economica deve essere considerata sempre relativamente ad un insieme di applicazioni alternative. All'emergere di nuove applicazioni essa potrebbe quindi variare.

5.3.4 Efficienza e AIP

Nei paragrafi precedenti per la determinazione del valore economico si è fatto riferimento al concetto di efficienza allocativa. Tale concetto è direttamente connesso a quello di concorrenza perfetta in base al primo teorema fondamentale dell'economia del benessere: *“in un sistema economico di concorrenza nel quale vi sia un insieme completo di mercati, un equilibrio concorrenziale, se esiste, è un ottimo paretiano.”*

In tale senso un'economia efficiente è anche un'economia nella quale esiste una **concorrenza perfetta**. Per concorrenza perfetta si intende un regime di mercato caratterizzato, sia dal lato della domanda che dal lato dell'offerta, da *“omogeneità dei beni, numerosità degli operatori, assenza di intese fra essi, libertà di entrata e uscita dal mercato e perfetta informazione.”*

Chiaramente la concorrenza perfetta spesso rappresenta solo un'ipotesi teorica: in quei casi la necessità di evitare le interferenze tra i diversi operatori che agiscono sullo spettro rende il puro approccio di mercato impossibile da adottare, in assenza di diritti di proprietà ben definiti.

Gli *Administrative Incentive Prices* (AIP – cfr. [10]) furono concepiti nel Regno Unito sulla base del metodo sviluppato da *NERA Economic Consulting* e *Smith System Engineering Limited* nel 1996 [11], ed introdotti nel 1998 con il *Wireless Telegraphy Act*.

Con lo studio Indepen-Aegis-Warwick Business School [12] il metodo NERA venne *generalizzato* in modo da formulare degli AIP consistenti con l'efficienza produttiva tra gli usi, puntando a considerare l'efficienza sia di allocazione che di assegnazione.

In assenza di prezzi determinati dal mercato, **gli AIP ne rappresentano un surrogato** nella valutazione dei benefici economici. In generale, gli AIP sono definiti come tariffe imposte ai possessori di licenze per l'uso dello spettro o a coloro che vantano diritti di fatto sullo stesso. Queste tariffe sono stabilite dal regolatore e riflettono il costo marginale per l'uso dello spettro (e quindi forniscono un incentivo effettivo all'uso efficiente della risorsa). Il costo marginale si riferisce al *costo-opportunità calcolato al margine guardando a come la sostituibilità di una risorsa produttiva complementare varia in risposta ai cambiamenti d'uso dello spettro*.

5.4 Efficienza sociale

Da un punto di vista sociale, gli indicatori di efficienza per propria natura non possono essere quantitativi, ma necessariamente qualitativi. Essi sono ugualmente importanti per la valutazione dell'efficienza complessiva dello spettro, quanto quelli quantitativi di efficienza economica e tecnica.

Questi indicatori dovrebbero essere in grado di misurare se e in che misura i diversi possibili utilizzi dello spettro siano in grado di soddisfare le necessità sociali fissati in sede politica e legislativa, ivi inclusi gli obiettivi posti dall'Unione Europea. Si pensi, ad esempio all'inclusione dei cittadini residenti in aree rurali o dei più anziani, all'invecchiamento della popolazione, ai livelli di diffusione della Banda Larga e alla velocità di connessione, al rispetto dell'ambiente, per citarne solo alcuni.

Analysys Mason e Hogan & Hartson, in uno studio realizzato nel 2008 per conto dell'ARCEP[13] (il regolatore francese) sui possibili utilizzi del dividendo digitale in Francia, hanno stilato una lista ragionevole di impatti sociali che potrebbero essere stimolati dalle diverse applicazioni nello spettro radio:

- Sviluppo dell'educazione e accesso all'informazione
- Supporto per gli scambi culturali e lo sviluppo della comunità
- Inclusione sociale e resistenza all'esclusione
- Contributo ad uno sviluppo sostenibile
- Sviluppo regionale-locale
- Sviluppo di servizi di salute pubblica e di sicurezza pubblica

- Crescita dei vantaggi competitivi regionali
- Ricerca e sviluppo

A questi potrebbero esserne aggiunti altri, individuati a partire dalle priorità politiche esplicitamente previste, sia dai diversi governi degli Stati membri, sia dalle istanze dell'UE, ovvero desumibili in base alle disposizioni legislative d'indirizzo generale emanate da entrambi i livelli di fonte. Si pensi, a titolo di esempio, alle direttive quadro in materia di telecomunicazioni, di media audiovisivi, di commercio elettronico, di società dell'informazione, o, ancora, agli obiettivi fissati dalle diverse "Agende", come l'Agenda Digitale, l'Agenda di Lisbona, ecc..

Resta inteso che la scelta di quali indicatori sociali includere e, qualora si presentino momenti confliggenti tra indicatori di segno opposto mutuamente escludentesi, che peso assegnare a ciascuno di essi è una scelta squisitamente politica, che rimane in capo alle istanze rappresentative dello Stato democratico e agli organismi di garanzia previsti nel quadro istituzionale.

Nel successivo paragrafo 6.3 saranno illustrati i possibili metodi utilizzabili per trasformare gli obiettivi sociali in indicatori misurabili.

5.5 Efficienza dell'uso dello spettro

L'efficienza di un dato uso di una porzione di spettro deve essere considerata prendendo in esame contemporaneamente tutti i tre concetti di efficienza descritti. Concettualmente si può ottenere un unico indicatore di efficienza E combinando opportunamente i diversi valori di efficienza tecnica, economica e sociale:

$$E = k_1 \eta_t + k_2 \eta_e + k_3 \eta_s$$

In questa sede è necessario sottolineare come non vi sia una vera e propria gerarchia accettata in letteratura fra le tre efficienze, che dunque è opportuno considerare tutte con lo stesso peso.

Come si diceva pocanzi, per quanto riguarda il peso differente per differenti indicatori sociali, anche in questo caso l'assegnare peso differente alle varie efficienze rappresenta esclusivamente una scelta politica del decisore, che potrebbe preferire privilegiare una di esse rispetto alle altre.

Nel successivo paragrafo 6.4 si illustrerà come la stima dei diversi termini di efficienza combinati nella relazione sopra riportata, si possa ottenere a partire dagli indicatori (KPI) individuati, siano essi di natura qualitativa, quantitativa o mista.

6 La valutazione dell'efficienza d'uso attraverso i KPI

6.1 Efficienza tecnica

Come già descritto al paragrafo 5.2, l'efficienza tecnica può essere valutata considerando un'opportuna combinazione di KPI, ricavabili a partire dai dati individuati per ogni servizio/applicazione nel D01 [2] paragrafo 12.4.4. I KPI sono già stati illustrati e si riportano di seguito per comodità:

- efficienza spettrale
- utilizzo della banda
- condivisione delle risorse spettrali

Dall'analisi di tali KPI si può notare come il valore dell'efficienza tecnica tenda a modificarsi nel tempo, perché l'uso della banda, così come ad esempio l'estensione geografica di un servizio e quindi l'efficienza spettrale tendano a variare. L'efficienza tecnica deve quindi essere più che un valore statico un andamento che tenga conto della variazione temporale.

6.1.1 Efficienza spettrale

L'efficienza spettrale, come descritto nel paragrafo 5.2.1, può essere valutata come il prodotto pesato di un insieme di efficienze: efficienza nello spazio, efficienza in frequenza ed efficienza nel tempo.

$$\eta_T = \text{efficienza spettrale} = w_s \eta_s \cdot w_f \eta_f \cdot w_t \eta_t$$

I valori di tali efficienze per ogni servizio o applicazione sono ricavabili a partire dai dati raccolti in fase di inventario dello spettro, come individuato nel Deliverable D01 [2], paragrafo 12.4.4, e possono essere sia di tipo quantitativo, che qualitativo, che misti.

I pesi (w_s , w_f , w_t) con cui combinare l'efficienza in spazio, l'efficienza in frequenza e l'efficienza in tempo dipendono da diversi fattori, tra cui le bande considerate, i servizi e le applicazioni. Vi saranno servizi o applicazioni per i quali alcune delle efficienze precedentemente definite non si applicano, così come il peso da attribuire ad ogni efficienza può essere molto diverso da servizio a servizio. Se si considerano per esempio i PPDR (*Public Protection Disaster Relief*) l'efficienza in spazio sarà certamente un parametro importante, poiché indica quanto il servizio è esteso nel territorio nazionale, mentre assumerà poca importanza l'efficienza in tempo.

L'efficienza tecnica complessivamente sarà quindi un parametro qualitativo che indicherà un livello di uso più o meno efficiente associato ad un particolare servizio in una certa banda.

Il calcolo delle efficienze viene effettuato per ogni servizio e per ogni banda su base comparativa, individuando l'efficienza massima per quel servizio in quella banda di frequenza e normalizzando l'efficienza calcolata rispetto al massimo. Ogni efficienza in spazio, tempo e frequenza sarà poi calcolata a partire dai dati identificati per famiglie di applicazioni in [2].

Possiamo quindi scrivere che:

$$\forall \text{ servizio } i \text{ e banda } j \left\{ \begin{array}{l} (\eta_s)_{i,j} = \frac{\eta_{s_{i,j}}}{(\eta_{s_{MAX}})_{i,j}} = \sum_{u=1}^{N_u} a_u(\text{dati disponibili})_u \\ (\eta_t)_{i,j} = \frac{\eta_{t_{i,j}}}{(\eta_{t_{MAX}})_{i,j}} = \sum_{v=1}^{N_v} a_v(\text{dati disponibili})_v \\ (\eta_f)_{i,j} = \frac{\eta_{f_{i,j}}}{(\eta_{f_{MAX}})_{i,j}} = \sum_{z=1}^{N_z} a_z(\text{dati disponibili})_z \end{array} \right.$$

In questo senso la formulazione di principio enunciata si realizza nella pratica attraverso l'acquisizione di dati che rispondono a specifici formati record, diversi in funzione delle famiglie di applicazioni [2], poiché le efficienze si calcoleranno in maniera differente a seconda del servizio e della banda considerati. Possono infatti verificarsi diverse situazioni in cui uno specifico dato non è definito o non è rilevante per il servizio o l'applicazione che si sta considerando (ad esempio il numero di utenti non risulta un parametro significativo per i collegamenti punto-punto).

L'efficienza in spazio, tempo e frequenza si possono quindi valutare a partire dalla analisi dei dati già necessari e richiesti per l'inventario dello spettro, distinti per i diversi servizi. Ad esempio:

- dall'analisi complessiva delle allocazioni nominali, dei diritti d'uso, delle interfacce radio si possono ottenere dati macroscopici, che si possono ricavare dall'inventario dell'uso dello spettro, secondo il formato indicato ai paragrafi 12.4.1, 12.4.2 e 12.4.3 del Deliverable D01 [2]. Questa analisi può portare a prime macroscopiche valutazioni, che consentono di identificare porzioni di spettro inutilizzate, la ripartizione dello spettro tra usi civili e militari, la frammentazione tra i diversi Stati membri di specifiche bande, possibili difficoltà di coordinamenti bi- o multi-laterali. Questo tipo di informazioni è rilevante per l'analisi del criterio di utilizzo dello spettro finalizzato alla valutazione dell'efficienza spettrale.
- nei casi in cui questo sia ritenuto necessario, i dati per la valutazione dell'efficienza spettrale possono essere ricavati tramite ulteriori azioni, tra cui, ad esempio, campagne di misura. Uno dei metodi che più rendono possibile la valutazione dell'efficienza spettrale è infatti quello di realizzare campagne di misura per raccogliere campioni di dati misurati nelle aree di interesse e creare un database. Ovviamente le campagne di misura hanno anche diverse controindicazioni, prima tra tutte la difficoltà e il costo delle campagne quando le aree da analizzare sono molto estese o l'impossibilità di acquisire informazioni circa il funzionamento o la presenza di servizi passivi (es. radioastronomia). Inoltre, poiché i dati cambiano molto rapidamente nel tempo, le stesse misure richiedono aggiornamenti frequenti. Una soluzione può essere costituita da un numero di stazioni di monitoraggio fisse, ma se è necessaria una buona risoluzione spaziale ci si devono aspettare costi molto elevati. Una possibile alternativa è costituita da campagne di misura basate su veicoli mobili, questi consentono un alto livello di dettaglio in termini di punti di misura, utilizzando un numero relativamente basso di unità mobili. Rispetto alle campagne di misura con stazioni di monitoraggio fisse i costi verrebbero ridotti, ma in più bisogna considerare anche il noleggio dei mezzi mobili e il costo del personale. Come già ricordato in [2], il ricorso a misure sul campo deve essere limitato e deve essere inteso come una attività a valore aggiunto rispetto all'inventario dello spettro radio, da condurre solo in presenza di specifiche circostanze. La metodologia che si propone permette di superare i limiti delle valutazioni interamente ottenute tramite campagne di misura, determinando l'efficienza spettrale tramite l'identificazione e combinazione di opportuni dati tra quelli disponibili, stimati in modo tale da ottenere una valutazione completa dell'efficienza spettrale stessa.

6.1.2 Utilizzo della banda

L'utilizzo della banda può essere definito come la misura di quanto la risorsa spettrale in esame è utilizzata e per quanto tempo, per ciascuno dei servizi o applicazioni considerati.

L'utilizzo della banda è un KPI di tipo qualitativo, che può variare tra i valori “nessun uso” e “uso intenso”. Per ogni tipo di servizio/applicazione, a partire dai dati ricavati dall'inventario dello spettro indicati in [2], si può valutare il valore da attribuire a questo indicatore.

Per esempio per il caso dei sistemi radiomobili si possono definire i seguenti valori qualitativi per l'utilizzo della banda, derivati da considerazioni sull'estensione della copertura geografica e della percentuale di popolazione servita:

- nessun uso: $< X\%$
- uso scarso: tra X e $Y\%$
- uso moderato: tra Y e $Z\%$
- uso intenso: $> Z\%$

Si deve infine sottolineare che un utilizzo intenso della banda è indicativo di alta efficienza nell'uso dello spettro, ma il contrario invece non è sempre vero: bande efficientemente utilizzate possono non avere un utilizzo intensivo, come ad esempio il caso dei PPDR.

6.1.3 Condivisione delle risorse spettrali

La condivisione delle risorse spettrali può essere valutata come il grado di condivisione di più servizi/applicazioni all'interno di una stessa banda. Anche la condivisione delle risorse spettrali è un KPI di tipo qualitativo che può variare tra i valori “nessuna condivisione” e “molto condiviso”, dove il valore “nessuna condivisione” fa riferimento all'assenza di condivisione, mentre il valore “molto condiviso” fa riferimento alla coesistenza di almeno N servizi/applicazioni su una stessa banda.

Per questo KPI bisogna sottolineare che, a seconda del servizio/applicazione, l'assenza di condivisione può non essere indice di scarso uso della banda, ma di difficoltà oggettive collegate ai requisiti delle specifiche applicazioni che non consentono condivisioni con altri servizi, senza per questo implicare un uso inefficiente della risorsa spettrale.

6.2 Valutazione dell'efficienza economica

Date le difficoltà illustrate nel paragrafo 5.3 riguardo al calcolo dell'*Economic Surplus* e l'alternativa mostrata del calcolo degli AIP, di seguito vengono indicati entrambi i metodi di calcolo, di cui di volta in volta si sceglierà il più adatto a seconda della possibilità di ipotizzare la presenza di concorrenza perfetta sul mercato o meno, nonché della possibilità di reperire tutti i dati necessari al calcolo.

6.2.1 Calcolo dei KPI per l'Economic Surplus

Come già ricordato, l'*Economic Surplus* di per sé non è una misura di efficienza ma di beneficio in termini assoluti. Dunque, l'uso di una banda da parte di una determinata applicazione può essere considerato efficiente se presenta valori di surplus maggiori di quelli di altre applicazioni che si considera possano occupare la stessa porzione di spettro. Tuttavia, quando il fine, come in questo caso, è semplicemente l'inventario dell'utilizzo esistente dello spettro e non il refarming secondo il criterio dell'efficienza massima prevista, si può considerare solamente l'*Economic Surplus* derivante dall'attuale utilizzo di ogni banda, in valore assoluto. A valore di riferimento per calcolare un'approssimazione di efficienza può essere preso il valore massimo non tra tutte le applicazioni che potrebbero occupare la banda, ma tra tutti quelli dei servizi dello stesso tipo che già occupano altre porzioni dello spettro, ma che per tipologia possono essere comparate con quella in questione. Per far ciò, dapprima viene mostrato come calcolare il surplus, per poi comparare tutti i surplus delle varie bande su cui uno stesso servizio (o tipologia di servizio) viene operato.

6.2.1.1 Producer surplus

In termini pratici il *Producer Surplus* viene usualmente calcolato come differenza fra il fatturato ed i costi economici. Questi ultimi riflettono il fatto che le risorse della compagnia, che vengono impiegate nella produzione di servizi radio, possono essere utilizzate per produrre valore in un certo numero di modi alternativi. I costi economici sono perciò definiti come il valore di queste risorse (input) nel loro miglior utilizzo alternativo

$$\text{Producer surplus} = \text{Fatturato} - \text{Costi Economici}$$

Mentre il fatturato può essere considerato equivalente ai ricavi dell'impresa indicati nel bilancio, l'individuazione dei costi economici non è così diretta. Possiamo identificare quattro categorie di costi:

- lavoro;
- altri input per la produzione di beni o la fornitura di servizi;
- i beni capitali quali immobili, veicoli, stabilimenti e macchinari. I diritti d'uso dello spettro rientrano in questa categoria, sebbene vada considerato come essi rappresentino solo un trasferimento interno, che non incide sul valore totale dell'Economic Surplus, in quanto viene sottratto qui e aggiunto al surplus totale come beneficio extra per i consumatori/cittadini;
- titoli finanziari.

Dunque:

$$\text{Costi Economici} = \text{costi di (lavoro + altri input + beni capitali + titoli)}$$

6.2.1.2 Consumer surplus

La metodologia per il calcolo del valore di *Consumer Surplus* utilizzata più spesso in letteratura poggia sulla seguente formula, che si basa sui ricavi delle imprese produttrici derivanti dal servizio/applicazione in questione:

$$\text{Consumer Surplus} = \frac{1}{2} \frac{\text{Revenues}}{|e|}$$

Dove e rappresenta una stima della elasticità della domanda del prodotto rispetto al prezzo. Il calcolo di tale elasticità richiede complesse indagini econometriche, per cui il modo più semplice e pratico di procedere è quello di utilizzare valori già disponibili in letteratura che si riferiscano al servizio stesso o a servizi di telecomunicazione simili.

6.2.1.3 Applicazioni non commerciali

Nelle applicazioni non commerciali il *Producer Surplus* resta facile da calcolare, perché comunque si possono identificare delle imprese produttrici degli apparati se non anche erogatrici del servizio, mentre per il calcolo del *Consumer Surplus* si può considerare come consumer l'utente del servizio e stabilire, ad esempio, i costi che tale utente dovrebbe sopportare per raggiungere lo stesso scopo tramite l'utilizzo di un servizio di comunicazione alternativo a quello radio attualmente utilizzato.

6.2.2 Il calcolo degli AIP

Il calcolo degli AIP passa attraverso l'applicazione del metodo di Smith-Nera generalizzato secondo il modello Aegis. In primis il regolatore deve identificare gli usi e le soluzioni alternative che sarebbero in grado di assicurare lo stesso livello di output del servizio. In seguito si calcolano i costi-opportunità, o benefici marginali. Tali valori si stimano come il costo aggiuntivo (o il risparmio) che un'azienda media (o un altro utente ragionevolmente efficiente) registra a seguito del fatto che gli sia stato negato (o aver guadagnato) l'accesso ad una piccola quantità di spettro.

Il costo o il risparmio aggiuntivo dipende dal tipo di azione che si vuole mettere in atto e deve essere calcolato come stima del costo *minimo* tra tutte le possibili azioni che costituiscono un'*alternativa* per l'utente. L'alternativa al minor costo è quella in cui un utente sostituisce lo spettro con un altro input, così che l'output resti invariato. Tali alternative possono includere:

- investire in una quantità maggiore o minore di infrastrutture di rete per raggiungere la medesima quantità e qualità del servizio avendo a disposizione maggiore o minore di spettro
- passare ad una banda di frequenza alternativa per poter fornire il medesimo servizio
- passare ad un servizio alternativo (ad esempio, servizio pubblico piuttosto che comunicazioni private)
- passare ad una tecnologia alternativa (ad esempio, l'uso di fibra ottica o linee affittate piuttosto che link radio fissi oppure il broadcasting satellitare piuttosto che quello tradizionale).

Un'ipotetica procedura iterativa che converge verso un'allocazione ed un'assegnazione efficienti dello spettro radio è la seguente:

1. **Si identificano tutte le bande di frequenza e gli usi associati** componendo una matrice. Si riempiono le celle con le stime dei benefici marginali (**MB_{ij}**) per l'uso *i* (riga) nella banda di frequenza *j* (colonna) applicando l'alternativa al minor costo.
2. Si usano le stime dei benefici marginali per **identificare la direzione dello scambio nella riallocazione dello spettro**: lo spettro deve spostarsi dall'uso con minor beneficio marginale all'uso con quello più alto.
3. Avendo identificato la direzione o la riallocazione, che dipenderà dalla sostenibilità dello spettro e dai benefici marginali, **s'identifica il massimo valore del MB in ogni colonna**, per ogni colonna *j* chiamato **MB*_{ij}**.
4. Se il massimo si trova in un uso che non utilizza attualmente quella frequenza di banda, allora **i prezzi dovrebbero essere fissati nell'intervallo tra MB*_{ij} e il beneficio marginale dell'uso corrente**.
5. È **richiesto un giudizio** rispetto al prezzo effettivo scelto nell'intervallo. Qualora la stima del valore per **MB*** non sia ritenuta sufficientemente precisa, si consiglia, così da non correre il rischio di fissare dei prezzi eccessivi, di scegliere un prezzo di poco superiore al beneficio marginale dell'uso corrente.
6. Se al contrario **il massimo valore è il valore dell'uso attuale** della banda allora si stabilisce il prezzo a quel valore.
7. Avendo impostato i prezzi per lo spettro, le imprese risponderanno cambiando la loro domanda. Dopo un periodo di tempo (fino a 5 anni) i nuovi valori dei benefici marginali emergeranno e la procedura può essere **ripetuta**.

Riassumendo quindi i passi essenziali per determinare gli AIP sono:

1. Per una determinata banda di frequenza determinare **l'uso attuale ed individuare altri possibili usi** per la stessa
2. **Calcolare i costi-opportunità** dello spettro per l'uso attuale della banda e per i suoi altri possibili usi
3. Se vi è un utilizzo che presenta un costo-opportunità superiore a quello dell'uso attuale, impostare **il valore dell'AIP tra i due costi**, ma verso il limite inferiore dell'intervallo di valori.
4. Se non vi è utilizzo con costo-opportunità superiore a quello attuale impostare **l'AIP al valore determinato per l'uso corrente**.

Nella pratica, una volta definiti, gli AIP funzionano come dall'esempio seguente. Si consideri una banda di frequenza a , e si supponga che al momento ci siano quattro utenti (w , x , y , z) che la utilizzano. Avendo ciascuno delle proprie caratteristiche peculiari, i loro benefici marginali dello spettro divergono e sono:

- Valore Marginale (w) = 120
- Valore Marginale (x) = 110 Valore Marginale (y) = 100 Valore Marginale (z) = 90.

Quando il regolatore fissa il valore del prezzo incentivante, ad esempio a 100, l'utente z troverà interesse a restituire la propria licenza d'uso al regolatore, il quale probabilmente a sua volta finirà per fare avere la risorsa agli utenti w o x , che sono quelli che la valutano di più, o a dei nuovi entranti. Se il commercio delle frequenze fosse aperto invece l'utente z venderebbe egli stesso la propria licenza.

6.2.2.1 Assunzioni principali per il calcolo degli AIP

Gli AIP, se calcolati accuratamente, sono molto efficaci nell'assicurare che lo spettro venga usato in modo che la società tragga il massimo beneficio da questa risorsa. Per modellare la struttura di calcolo dei costi-opportunità dello spettro il regolatore deve affrontare una serie di delicati problemi e fare ipotesi in relazione ad una serie di questioni chiave, che si cercherà di indirizzare di seguito. Date le numerose incertezze che circondano il calcolo degli AIP, questi prezzi vengono fissati in modo molto prudente.

- **Variazione marginale di spettro**

Per iniziare, un primo parametro che bisogna definire è la giusta dimensione di una variazione marginale di spettro, dove per marginale si intende un piccolo cambiamento nella quantità di spettro utilizzato. Quindi un aumento o una diminuzione marginale di spettro dovrebbe riflettere l'importo minimo che è o che potrebbe essere di beneficio pratico per l'utente. La quantità di spettro 'marginale' differisce inoltre da servizio a servizio. Per esempio, per servizi PMR marginale è un canale da $2 \times 12,5$ kHz, mentre per le comunicazioni aeronautiche è più grande (25 kHz) e per una rete cellulare o di servizi PAMR è il numero di canali necessari per popolare una singola cella o "Cluster", tenendo conto dei parametri specifici di pianificazione. Così la quantità di spettro marginale dipende dall'uso che si fa delle frequenze in esame.

- **Utente medio**

Nella pratica, dato un certo uso dello spettro, ci sono imprese che troveranno il prezzo degli AIP troppo alto, ed altre che troveranno il prezzo al di sotto del loro beneficio marginale. Per funzionare bene, la selezione dell'impresa rappresentativa deve essere fatta attentamente. Per definire un utente ragionevolmente efficiente su cui stimare i costi medi il regolatore dovrebbe rifarsi a tutte le informazioni disponibili nei propri database, a quelle risultanti da altre fonti e dall'industria in genere. In alcuni casi la relazione tra costi ed ampiezza della banda non è lineare (in particolare per i collegamenti fissi, dove indipendentemente dalla larghezza della banda un'alta percentuale dei costi è di tipo fisso per la sistemazione dell'infrastruttura). In questi casi, mancando la linearità, vi è una grande differenza tra i costi-opportunità per i singoli tipi di collegamento. Un approccio è quello di individuare i costi-opportunità per ogni tipo di collegamento fisso e a partire da questo determinare la media ponderata che riflette la quantità di spettro utilizzata da ogni tipo di link. Similmente, potrebbero esserci diversi sub-utenti che occupano una banda di frequenza, che riflettono diversi mercati finali. È probabile che si dia vita a diverse stime del beneficio marginale in un dato uso. Una singola misura può essere calcolata facendo la media ponderata, dove i pesi da usare potrebbero essere l'ammontare di frequenze nei diversi sotto-usi. Inevitabilmente un certo grado di arbitrarietà è necessario nel figurare il profilo dell'utente medio.

- **Tasso di sconto**

I costi attuali devono essere convertiti in valori annuali attualizzati, in quanto vi sono costi a breve termine e a lungo termine associati alla variazione marginale di spettro radio. Il regolatore dovrà fare delle assunzioni riguardo i tassi di sconto, anche se sarà agevolato dal suo ruolo istituzionale e dai significativi apporti informativi da parte del governo e degli enti interessati. La

valutazione del costo del capitale per ogni settore industriale sarà quindi un elemento essenziale dell'analisi. Ad esempio Aegis ed Indepen nel 2004 considerarono:

- Collegamenti fissi, satellite e broadcasting al 10% su un arco di 15 anni
- Comunicazioni mobili e FWA al 10% su un arco di 10 anni
- Servizi aeronautici al 7, 75% su un arco di 15 anni.

- **Costi di manutenzione delle attrezzature**

Considerando che lo spettro radio è il più delle volte impiegato da parte di industrie ad alta intensità di capitale, i costi di manutenzione possono essere significativi. Di conseguenza, i costi di manutenzione possono avere importanti risvolti sulle valutazioni dei costi-opportunità. Non vi è modo semplice ed univoco di trattare con i costi di manutenzione, anche se un orientamento può essere trovato nei tassi di ammortamento utilizzati nei conti delle società. Nel Regno Unito i costi di manutenzione sono stati fissati sommariamente pari al 12% del capitale iniziale investito.

- **Considerazioni circa la maturità della rete esistente**

Quando la quantità di spettro è variata in un uso, il modo in cui un utente risponde cambiando gli altri input spesso dipende in misura determinante dalla maturità della tecnologia oltre che della rete impiegate. Ad esempio, le reti della banda GSM in Europa sono in gran parte mature, in quanto sono pienamente sviluppate in termini di infrastruttura e di copertura. Quindi un cambiamento marginale nella quantità di spettro impiegata va ad influire solo sulla capacità della rete in quelle aree in cui nelle ore di punta la domanda della rete è ai livelli massimi, e si è prossimi alla congestione. Per calcolare i costi-opportunità in questo caso il regolatore deve capire come la rete GSM opera nelle ore di picco della domanda, e stimare la quantità di infrastrutture (ad esempio stazioni base) che potrebbe sostituire lo spettro mancante.

- **Limiti di congestione e zone scoperte**

Chiaramente il costo-opportunità dello spettro per un utente o per un uso è concettualmente legato allo spettro negato ad altri utenti ed altri usi. Tali costi sono in genere proporzionali alla larghezza di banda utilizzata e, più in generale, alla zona geografica in cui è negato l'uso, vale a dire l'area "sterilizzata" dal servizio. Il concetto di zona sterilizzata è appropriato per i servizi mobili e di radiodiffusione, per i quali il modello assume che la banda venga completamente utilizzata, ma funziona meno bene per i collegamenti fissi dove la congestione è esclusivamente relativa agli specifici siti nodali. In tali casi il costo-opportunità calcolato per una frequenza locale congestionata, come ad esempio quella PMR o CBS (Common Base Station), può essere convertito in un valore nazionale moltiplicando il valore della frequenza locale per un plausibile coefficiente di riutilizzo nazionale. Questo approccio implicitamente assume che l'uso dello spettro sia congestionato a livello nazionale. Bisogna verificare se questa ipotesi è robusta all'atto della conversione dei valori marginali stimati in AIP. Se l'ipotesi non è verificata e vi è un eccesso di domanda di spettro in alcune, ma non tutte le località nazionali, allora il valore nazionale potrebbe essere calcolato come una media pesata dei valori delle aree congestionate e di quelle non congestionate, dove il peso dipende dalla misura di congestione. Un approccio alternativo potrebbe essere quello di avere delle medie pesate su considerazioni di tipo geografico. Ad esempio, per i PMR (Private Mobile Radio) o FWA (Fixed Wireless Access) può essere opportuno applicare la popolazione o il numero di imprese presenti in zona come parametri di peso. Questi parametri forniscono un'indicazione su quanto spettro venga consumato e quindi sulla congestione dello stesso. In altri casi (per esempio per i collegamenti fissi), la congestione del traffico può essere meglio stimata tramite il livello effettivo di utilizzo nelle specifiche località.

- **Variazioni su base geografica e temporale**

Differenze di valore legate alle diversità geografiche possono essere prese in considerazione creando più matrici per le diverse regioni. In alcune regioni dove si verifica un eccesso di domanda, i costi-opportunità giocheranno un ruolo nell'influenzare i prezzi. Allo stesso modo la

valutazione dovrebbe tenere conto del fatto che la domanda varia nel tempo, e che alcuni usi futuri potrebbero non essere conosciuti. A questo fine i prezzi dovrebbero essere rivalutati con una certa periodicità, così da tenere in conto dei cambiamenti della domanda e della tecnologia.

6.3 Gli indicatori per l'efficienza sociale

Posto che l'efficienza sociale è una misura difficilmente trattabile con valori quantitativi oggettivi, per cui ci si deve affidare ad indicatori qualitativi, il problema diventa quale tipi di benefici sociali dovrebbero essere considerati in una checklist di quelle descritte in 5.4.

L'elenco suggerito da Analysys Mason e Hogan & Hartson nel loro studio per l'ARCEP (cfr. § 5.4) sembra costituire una buona base per stabilire l'impatto sociale di una data applicazione nello spettro radio.

Ciascuno dei benefici elencati (Sviluppo dell'educazione e accesso all'informazione; Supporto per gli scambi culturali e lo sviluppo della comunità; Inclusione sociale e resistenza all'esclusione; Contributo ad uno sviluppo sostenibile; Sviluppo regionale-locale; Sviluppo di servizi di salute pubblica e di sicurezza pubblica; Crescita dei vantaggi competitivi regionali; Ricerca e sviluppo) può essere declinato in sotto-indicatori più specifici in modo da valutare particolari problematiche.

Ad esempio, il raggiungimento di uno sviluppo sostenibile in cui gli effetti collaterali delle tecnologie negative per i cittadini sono ridotti al minimo è uno dei principali obiettivi dell'Unione Europea. Dunque, potrebbe risultare utile considerare i seguenti sotto-indicatori per valutare il contributo di una certa applicazione allo sviluppo sostenibile:

- Uso di tecnologie di green ICT
- Esposizione dei cittadini ai campi elettromagnetici

Una volta definito in questo modo l'insieme di obiettivi sociali e politici auspicabili, possiamo associare ad ciascuno di essi una variabile dicotomica che assuma valore 1 nel caso in cui tale obiettivo sia facilitato dall'applicazione considerata e 0 altrimenti. Un'ulteriore opzione consiste nell'ampliare l'intervallo di punteggi per contemplare la possibilità di diverse intensità (bassa, media, alta, molto alta e così via) nel valutare l'indicatore. Possiamo poi definire l'efficienza sociale associata ad una data applicazione come somma (eventualmente pesata, in base alle diverse priorità stabilite in sede di *governance*) di tali variabili:

$$\eta_s = \sum_i w_i o_i$$

Così come per l'efficienza economica, si può avere un'idea dell'efficienza sociale di un dato servizio che opera su una determinata banda, comparando il suo punteggio così calcolato con quello massimo tra tutti quelli della stessa tipologia che occupano altre bande.

6.4 La valutazione dell'efficienza a partire dalla stima dei KPI

Gli indicatori di valutazione descritti in precedenza e riferiti a diversi tipi di efficienza possono essere divisi in tre gruppi a seconda della loro natura: qualitativi, quantitativi e misti.

Poniamo di avere

- | | |
|----------|---|
| j | differenti bande su cui un certo servizio opera |
| m | KPI quantitativi |
| p | KPI qualitativi |
| r | KPI misti |

6.4.1 Indicatori di natura quantitativa

Per un indicatore quantitativo c , consideriamo la sua misura $v_{k,c}$ per una data applicazione oggetto di studio nella banda k ; il punteggio di efficienza assegnato a tale applicazione può essere determinato tramite la seguente equazione:

$$m_{k,c} = \frac{v_{k,c}}{\text{Max}_j v_{j,c}}$$

dove $\text{Max}_j v_{j,c}$ rappresenta il valore massimo delle misure dell'indicatore c per tutte le j diverse bande impiegate dal servizio. Nel caso di scala di misurazione inversa, in cui il valore maggiormente desiderabile per il KPI è quello più basso, il punteggio può essere attribuito sottraendo a 1 il valore normalizzato appena definito:

$$m_{k,c} = 1 - \frac{v_{k,c}}{\text{Max}_j v_{j,c}}$$

A fini esemplificativi, poniamo di avere 4 differenti bande A, B, C e D su cui un particolare tipo di servizio viene realizzato ed esse presentano i valori di misura dell'indicatore c riportati in Tabella 2.

Tabella 2. Esempio per KPI quantitativi	
Banda	Quantificazione del criterio $v_{k,c}$
A	300
B	700
C	900
D	400

Il valore massimo $\text{Max}_j v_{j,c}$ nel caso dell'indicatore preso ad esempio in Tabella 2 è 900, dunque il punteggio relativo a questo indicatore assegnato ad ogni banda secondo la metodologia appena descritta sarà determinabile come in Tabella 3

Tabella 3. Esempio di attribuzione del punteggio di efficienza per KPI quantitativi	
Banda	Punteggio di efficienza $m_{k,c}$
A	$300/900=0.33$
B	$700/900= 0.77$
C	$900/900=1$
D	$400/900=0.44$

6.4.2 Indicatori di natura qualitativa

Dato un indicatore **qualitativo** q , il punteggio per una banda assume valori discreti. Si può presupporre di adottare una scala 0/1 per presenza/assenza oppure ampliare l'intervallo di punteggi per contemplare la possibilità di diverse intensità (bassa, media, alta, molto alta e così via) nel valutare il KPI. L'indicatore q può essere suddiviso in n sottoindicatori, ancora qualitativi, e il valore associato ad ogni sottoindicatore può

ancora essere del tipo 0/1 o su una scala di intensità a più valori. Il valore associato al KPI nel suo complesso sarà facilmente calcolabile come somma dei valori associati a tutti i sottoindicatori:

$$v_{k,q} = \sum_{s=1}^n v_{k,q_s}$$

Il punteggio di efficienza relativo all'indicatore qualitativo deriverà poi dalla normalizzazione del valore per una data applicazione rispetto al massimo valore, così come per il caso quantitativo:

$$m_{k,q} = \frac{v_{k,q}}{\text{Max}_j v_{j,q}}$$

Anche in questo caso, in riferimento ad una scala di misurazione inversa, il punteggio sarà dato da:

$$m_{k,q} = 1 - \frac{v_{k,q}}{\text{Max}_j v_{j,q}}$$

Consideriamo, a titolo esempio ancora 4 bande A, B, C e D, cui si vuole attribuire un punteggio di efficienza rispetto all'indicatore q , che risulta suddiviso in $q_s = 5$ differenti sotto-indicatori (s_1, s_2, s_3, s_4, s_5). In Tabella 4 è riportato un esempio di attribuzione del punteggio di efficienza per ciascuno dei sotto-indicatori qualitativi individuati.

Tabella 4. Esempio di suddivisione di un indicatore qualitativo in sotto-indicatori						
Banda	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	$v_{k,q}$
A	0	1	0	0	0	1
B	1	1	0	0	0	2
C	1	1	1	0	0	3
D	1	1	1	1	1	5

Il valore del punteggio di efficienza complessivo mutuato rispetto all'indicatore q è dunque dato dalla somma dei valori riferiti ai differenti sotto-indicatori (s_1, s_2, s_3, s_4, s_5), riportata nell'ultima colonna della Tabella 4.

Il valore massimo delle misure del KPI in esame, $\text{Max}_j v_{j,q}$, in questo caso è pari a 5 e quindi i punteggi di efficienza rispetto all'indicatore, assegnati alle diverse bande, saranno quelli di Tabella 5.

Tabella 5. Esempio di attribuzione del punteggio di efficienza per KPI qualitativi	
Banda	Punteggio di efficienza $m_{k,q}$
A	1/5=0.20
B	2/5=0.40
C	3/5=0.60
D	5/5=1.00

6.4.3 Indicatori misti

Per un indicatore misto i che contiene al suo interno sia sotto-indicatori qualitativi che quantitativi, possono essere utilizzate entrambe le procedure descritte nei paragrafi precedenti, sommando i valori normalizzati per la parte qualitativa e quantitativa e rinormalizzando sul massimo valore ottenuto.

Ad esempio, si considerino nuovamente 4 bande A, B, C e D ed un indicatore suddiviso in una parte quantitativa ed una qualitativa.

In Tabella 6 sono riportati i punteggi del sottoindicatore qualitativo e di quello quantitativo, che si ipotizza siano il risultato di due separati processi di calcolo realizzati secondo quanto sopra descritto, mentre nella colonna a destra viene riportata la somma dei due valori, che rappresenta la misura per ciascuna banda rispetto all'indicatore nel suo complesso.

Tabella 6. Esempio di suddivisione di un indicatore misto in sotto-indicatori			
Banda	s_1	s_2	$v_{k,i}$
A	0.3	0.4	0.7
B	0.8	0.6	1.4
C	0.5	1	1.5
D	1	0.2	1.2

Il valore massimo delle misure dell'indicatore in esame, $\text{Max}_j v_{j,i}$, risulta quindi pari a 1.5 e quindi i punteggi di efficienza rispetto al KPI, assegnati alle diverse bande, saranno quelli di Tabella 7.

Tabella 7. Esempio di attribuzione del punteggio di efficienza per indicatori misti	
Banda	Punteggio di efficienza $m_{k,i}$
A	$0.7/1.5=0.46$
B	$1.4/1.5=0.93$
C	$1.5/1.5=1.00$
D	$1.2/1.5=0.80$

6.4.4 Costruzione di un indicatore unico per l'efficienza

Una volta assegnato un punteggio ad ogni applicazione k per ogni indicatore, si potrà utilizzare la seguente formula al fine di ottenere un **valore sintetico** che comprenda al suo interno tutti gli m indicatori quantitativi e i p indicatori qualitativi, nonché gli r indicatori misti sulla base dei quali stimare i diversi tipi di efficienza (tecnica, economica, sociale):

$$m_k = \sum_{c=1}^m w_c m_{k,c} + \sum_{q=1}^p w_q m_{k,q} + \sum_{i=1}^r w_i m_{k,i}$$

dove w_c , w_q e w_i sono i pesi associati a ciascun KPI. I pesi possono derivare da una valutazione del differente impatto di ogni indicatore sull'efficienza totale.

I punteggi m_k per $k=1,\dots,j$ risulteranno in tal modo costruiti in maniera coerente per ogni diversa applicazione e dunque consentiranno di valutare l'efficienza relativa delle applicazioni che possono occupare una stessa porzione di spettro di radiofrequenza.

La combinazione dei KPI consente quindi di ottenere le valutazioni cercate di efficienza tecnica, economica e sociale, che combinate a loro volta come descritto al paragrafo 5.5, portano alla valutazione complessiva dell'efficienza dell'uso dello spettro.

7 Caso di studio: i futuri impieghi della banda L

Il lavoro presentato nel presente documento unitamente a [2] propone una metodologia consistente che, a partire dall'inventario dello spettro radio, permette di condurre valutazioni di efficienza dell'uso dello spettro e identifica il grado di efficienza cui una certa banda è utilizzata.

Qualora l'applicazione della metodologia proposta evidenziasse l'esistenza di bande usate in modo poco efficiente, occorrerebbe valutare l'opportunità di procedere con azioni finalizzate a migliorare l'efficienza d'uso. Lo spazio di miglioramento circa l'efficienza tecnica o economica con la quale è utilizzata una banda in una certa area geografica, rappresenta quindi un passo logicamente disaccoppiato dalle misure (se necessarie) da attuare per migliorare l'efficienza.

Quanto mostrato nel presente capitolo, illustra le azioni intraprese in ambito CEPT in merito alla Banda L (1452-1492 MHz), al fine di promuovere un uso più efficiente di tale banda. Le azioni intraprese fanno seguito, dal punto di vista logico, alla constatazione che la Banda L rappresenta per l'Europa una banda scarsamente o per nulla utilizzata e, come conseguenza, caratterizzata da una efficienza d'uso dello spettro pressoché nulla. In questo senso, la Banda L rappresenta un caso da considerare con particolare interesse, in qualità di esempio pratico per la promozione dell'efficienza nell'uso dello spettro.

7.1 Le attività in ambito CEPT

Il Working Group on Frequency Management (WG FM) dell'ECC ha stabilito nel 2011 che occorre rivedere l'utilizzo attuale della Banda L (1452-1492 MHz), poiché le applicazioni per le quali è designata al momento (S-DAB e T-DAB) non hanno prodotto i risultati sperati ed anzi nella maggior parte delle nazioni non sono mai state realmente implementate, nonostante siano passati già dieci anni circa dalla designazione della banda.

A tale scopo lo scorso anno è stato istituito il gruppo di lavoro FM PT 50, il cui mandato riguarda la Banda a 1.5 GHz (1452-1492 MHz), cosiddetta Banda L, allo scopo di perseguire all'interno della CEPT l'armonizzazione dell'uso della banda.

La Banda L è oggi scarsamente utilizzata in Europa e, in tal senso, il Project Team FM 50 ha lo scopo di stabilire con il supporto della metodologia di analisi dell'impatto delle diverse applicazioni, quali usi futuri della banda L risultano più appropriati per la CEPT.

Tra gli obiettivi di lavoro del FM PT 50 si evidenzia lo studio e la valutazione dell'impatto dovuto all'implementazione di diverse possibili applicazioni attuali e future nella banda L. Più nel dettaglio i punti essenziali che il gruppo di lavoro dovrà trattare entro settembre del 2012 sono:

- Identificare la metodologia e i criteri per valutare e confrontare l'impatto dell'implementazione delle diverse possibili applicazioni nella banda L: i criteri di confronto tra le diverse applicazioni possono ad esempio basarsi sulla verifica della compatibilità con la regolamentazione attuale, l'economia di scala, i benefici sociali e economici, la disponibilità di apparati d'utente su larga scala, la possibilità di combinare e condividere diverse applicazioni nella stessa banda L;
- Richiedere, se necessario, attraverso il WGFM, studi tecnici per la compatibilità in-banda e fuori banda L delle applicazioni attuali e future;
- Verificare se sono necessarie ulteriori misure regolamentari rispetto a quelle attuali per rendere possibile l'introduzione di tutte le applicazioni candidate per la banda L;
- Valutare e confrontare l'impatto delle diverse applicazioni seguendo la metodologia definita al punto 1 evidenziando i diversi requisiti che caratterizzano le soluzioni candidate;
- Sulla base dei risultati ottenuti al punto 4, proporre al WG FM quali usi futuri per la banda 1452-1492 MHz risultano più appropriati per la CEPT e indicare se il quadro regolamentare risulta adeguato o necessita di modifiche.

Per quanto riguarda gli aspetti normativi la maggior parte delle Amministrazioni fanno riferimento per la Banda L agli accordi di Maastricht (MA02C007) [14] e alla ECC/DEC/(03)02 [15] (introduzione DAB satellitare). Successivamente si è cercato di rendere più flessibile l'accordo di Maastricht (MA02revC007) rendendo possibile l'utilizzo di questa banda per il Mobile Multimedia downlink e UMTS/LTE downlink. Molte delle Amministrazioni fanno riferimento ad una regolamentazione nazionale che risulta in accordo sia con MA02C007 che con ECC/DEC/(03)02.

All'interno della CEPT la Banda L banda è scarsamente utilizzata. Alcuni Paesi la utilizzano limitatamente ad una sotto parte della banda 1452-1492 MHz per applicazioni e servizi diversi dal broadcasting sonoro quali servizi fissi, servizi mobili, telemetria, radioastronomia. Questi usi diversi da quelli previsti continueranno generalmente finché non sarà implementata la radio digitale o servizi multimediali.

Alcune Amministrazioni hanno già assegnato o stanno per assegnare le licenze nella sotto-banda 1452-1479.5 MHz. Per quanto riguarda invece la parte alta della banda L (1479.5-1492 MHz) alcuni Paesi hanno inviato all'ITU-R richieste per servizi satellitari mentre la licenza per la componente terrestre dell'S-DAB fino è stata assegnata in un solo caso (con scadenza al 31 dicembre 2018).

La Fondazione Bordini ha partecipato attivamente ai lavori del FM PT in qualità di membro della delegazione italiana predisponendo diversi documenti per conto della Amministrazione Italiana. I documenti proposti per la discussione al gruppo FM 50 sono stati accolti con favore ed hanno contribuito significativamente alla stesura del Draft Report che verrà sottoposto alla approvazione del WGFM nel prossimo settembre.

I contributi proposti sottolineano come occorra considerare in maniera congiunta gli aspetti tecnologici, economici e sociali, combinandoli opportunamente per procedere ad una corretta valutazione di impatto per le applicazioni candidate per la banda L.

7.2 Metodologia di lavoro applicata per la Banda L

La metodologia generale di studio che il PT FM 50 ha adottato per condurre i propri studi sulla Banda L è basata sulla valutazione dell'*impact assessment*, descritta al precedente paragrafo 7.1. L'analisi è stata condotta per ciascuna delle diverse applicazioni candidate per operare in banda L. Le valutazioni di impatto sono stilate sulla base di specifici criteri individuati dal gruppo, che tengono conto anche dei benefici economici e del valore sociale applicabili ad una specifica applicazione candidata. Su tali criteri si ritornerà più diffusamente nel paragrafo successivo.

Nella formulazione del problema oggetto di indagine, in linea con l'applicazione della metodologia dell'*impact assessment*, è stato considerato nello scenario di riferimento per la banda L, in Europa. La Banda L è allocata su base co-primaria ai servizi broadcasting, fisso e mobile (escluso mobile aeronautico) e risulta divisa nei seguenti segmenti:

- Terrestre: 1452–1479.5MHz (27.5MHz)
- Satellitare: 1479.5–1492MHz (12.5MHz)

Il segmento terrestre è regolato dagli accordi di Maastricht rivisti a Costanza nel 2007 [14], mentre quello satellitare dalla decisione ECC/DEC/(03)02 [15], la quale deve essere rivista ogni dieci anni sulla base delle domande di mercato.

È stato inoltre considerato che, nonostante la revisione di Maastricht (Costanza 2007) renda possibile un uso più flessibile della banda (es. mobile multimedia downlink), la banda L risulta scarsamente utilizzata nella maggior parte dei Paesi Europei e non sono ancora emerse le applicazioni di maggior interesse per il mercato.

L'attività di lavoro del gruppo WG FM PT50 si è concentrata inizialmente sulla fase 2 prevista per l'IA, cercando di concordare e definire i criteri di confronto delle diverse applicazioni nella banda L. A tal proposito, nel corso dei lavori, si è evidenziato che la metodologia proposta nel ECC Report 125[8] è molto generale e non sono di conseguenza riportati in modo esplicito o dettagliato i possibili i criteri per poter

confrontare le diverse applicazioni nella banda L. Nei criteri proposti dalla metodologia generale, ad esempio, non si considerano le applicazioni reali che già utilizzano una banda.

Le diverse fasi previste dalla metodologia IA sono poi state applicate in sequenza, tenendo presente che la base di partenza per la definizione delle opzioni regolamentari, da sottoporre a valutazione è rappresentata dagli accordi di Maastricht (MA02C007 e MA02revC007) e la ECC /DEC/(03)02 che prevedono come applicazioni possibili per la banda il DAB (T-DAB e S-DAB) e il multimedia downlink.

7.3 Valutazione delle applicazioni candidate per la Banda L

Al fine di valutare il miglior utilizzo possibile della banda, il WGFM ha dapprima inviato un questionario alle Amministrazioni della CEPT, le quali hanno indicato le applicazioni che vorrebbero poter allocare in quella banda ed ha poi attivato il Project Team FM 50. per la stesura di un report nel quale vengano analizzate le varie opzioni regolamentari capaci di accomodare le applicazioni segnalate dalle Amministrazioni, armonizzandone l'allocazione a livello CEPT.

Per far ciò, si sono stabiliti cinque differenti criteri sui quali valutare le applicazioni e dunque le opzioni regolamentari. Tali criteri sono:

1. **Compatibilità con l'attuale quadro regolamentare** con riferimento a;

- Art. 5 Radio Regulations
- ECC/DEC/(03)02
- MA02REVCO07

Il criterio è di interesse poiché meno l'applicazione è compatibile con il quadro regolamentare vigente e più difficoltosa sarà per essa la reale attuazione dell'armonizzazione;

2. **Possibilità di combinare/condividere lo spettro con altre applicazioni, tramite divisione spaziale, temporale, di frequenza o di codice**, al fine di lasciare la maggiore flessibilità possibile alle singole nazioni, anche se si armonizza la banda per i 48 Paesi CEPT;
3. **Benefici economici e sociali derivanti dall'utilizzo dell'applicazione**, poiché essi rappresentano uno dei principali obiettivi della riallocazione della banda rispetto all'attuale utilizzo, fallimentare proprio sotto questi aspetti;
4. **Arco di tempo necessario per l'approntamento del servizio dalla designazione della banda**, poiché una valutazione realistica dei possibili utilizzi dello spettro non può prescindere dalla valutazione dell'orizzonte temporale entro cui le nuove applicazioni saranno realmente disponibili per l'utenza ed inizieranno dunque a produrre i benefici economici e sociali previsti;
5. **Potenziale per l'armonizzazione dell'applicazione all'interno e all'esterno dello spazio CEPT**, poiché l'obiettivo del WGFM è quello di trovare una o più applicazioni per cui armonizzare l'uso della banda L in tutta l'area CEPT, anche al fine di abilitare potenziali economie di scala

La valutazione dei criteri avviene tramite l'uso dei seguenti KPI:

1. Tre variabili dicotomiche del tipo 0/1, ognuna delle quali rappresenta la compatibilità dell'utilizzo della banda L da parte dell'applicazione considerata con le tre diverse regolamentazioni in essere;
2. Numero di applicazioni N_s che possono essere accomodate su base nazionale sul numero N_a di applicazioni non armonizzate dall'opzione regolamentare, ma appartenenti all'insieme di quelle segnalate dalle amministrazioni per l'utilizzo della banda L: N_s/N_a

3. 4 sottocriteri distinti, due dei quali quantitativi (consumer e producer surplus) e due qualitativi (benefici per i consumatori/cittadini e per i produttori, valutati su una scala a quattro valori discreti, da Basso a Molto Alto), in modo da considerare tutti i tipi di applicazioni (commerciali e non) allo stesso modo;
4. Numero di mesi necessari all'operational deployment, calcolati a partire dall'assegnazione della banda;
5. Criterio suddiviso in due sottocriteri qualitativi (potenziale per l'armonizzazione all'interno del CEPT e potenziale per la diffusione dell'applicazione nel resto del mondo), valutati su una scala a tre valori discreti (Basso, Medio, Alto).

Per valutare i punteggi relativi ad ogni criterio, la FUB, per conto del Ministero dello Sviluppo Economico, ha proposto una metodologia simile a quella descritta in questo deliverable, al paragrafo 6.4, riguardo alla normalizzazione dei valori e la combinazione dei criteri. Apportate le opportune modifiche del caso, il PT 50 ha accettato tale metodologia come base per le proprie valutazioni.

Ognuno di tali KPI è che assumono valori tra 0 e 1, è stato pesato diversamente a seconda dell'importanza attribuita dal gruppo di lavoro, secondo la Tabella 8.

Tabella 8. KPI utilizzati per la valutazione delle opzioni regolamentari della Banda L			
Priorità	Numero massimo di punti assegnabili	Identificativo sottocriterio	Criterio
Alta	3	3a	Consumer surplus
	3	3b	Benefici per i consumatori/cittadini
	2	3c	Producer surplus
	1	3d	Benefici per i produttori e l'industria
	9	4	Arco temporale per l'operational deployment
	6	5a	Potenziale per l'armonizzazione all'interno della CEPT
	5	5b	Potenziale per la diffusione dell'applicazione nel resto del mondo
Media	6	2	Possibilità di condivisione con altre applicazioni
	2	1a	Compatibilità con le Radio Regulations (Art. 5)
Bassa	2	1b	Compatibility with MA02revCO07
	1	1c	Compatibility with ECC/DEC/(03)/02

Va notato come il PT 50 abbia scelto di incentrare la valutazione sulle opzioni regolamentari più che sulle singole applicazioni, in quanto il mandato del WGFM riguardava proprio lo stabilire la migliore opzione. Per far ciò, per ogni opzione sono state considerate le medie pesate rispetto all'occupazione della banda dei valori delle applicazioni armonizzate su scala CEPT dall'opzione, per ogni criterio. Sommando fra loro i punteggi relativi ad ogni criterio, come descritto in 6.4 si è giunti così ad un punteggio sintetico per ogni

opzione considerata, potendo in questo modo confrontarle e stabilire quale darà risultati maggiori con ogni probabilità.

8 Conclusioni

Gli indicatori di prestazione e la metodologia qui proposta per la valutazione delle effettive modalità di impiego dello spettro e della relativa efficienza d'uso, costituiscono assieme alla definizione dei formati e delle procedure di acquisizione dei dati, descritte in [2], la base per avviare l'inventario dello spettro radioelettrico in Italia.

Come previsto dal Progetto [1], la metodologia proposta sarà applicata nel prosieguo delle attività per avviare concretamente le operazioni di inventario in Italia.

9 Riferimenti bibliografici

- [1] Delibera N. 707/11/CONS “Definizione di tre Progetti esecutivi di ricerca, ai sensi dell’art.2 della convenzione tra l’Autorità per le garanzie nelle comunicazioni e la Fondazione Ugo Bordoni”, 12 dicembre 2011.
- [2] Analisi conoscitiva sull’attribuzione, l’assegnazione e l’utilizzo dello spettro radioelettrico: Deliverable D01 “Relazione sulla definizione dei formati e delle procedure di acquisizione dei dati”.
- [3] RSPG Report, “Report on collective use of spectrum and other sharing approaches”, novembre 2011.
- [4] Decisione della Commissione Europea 2006/771/CE, relativa all’armonizzazione dello spettro radio per l’utilizzo da parte di apparecchiature a corto raggio, 9 novembre 2006.
- [5] Raccomandazione ERC 70-03 (Tromsø 1997 e successive modifiche), relativa all’uso dei dispositivi a corto raggio, versione 7 maggio 2012.
- [6] ETSI TR 102 802 V1.1.1, “Reconfigurable Radio Systems (RRS); Cognitive Radio System Concept”.
- [7] WIK- Consult, “Inventory and review of spectrum use: Assessment of the EU potential for improving spectrum efficiency”, Study for the European Commission, Bad Honnef, 11 Settembre 2012.
- [8] ECC Report no. 125, “Guidelines for the implementation of impact assessment in relation to spectrum matters”.
- [9] RSPG Opinion on Review of Spectrum Use, 29 febbraio 2012;
- [10] AGCOM, Progetto ISBUL, WP 1.2 “Accesso Radio”, maggio 2010
- [11] NERA Economic Consulting e Smith System Engineering Limited, “Study in the use of spectrum pricing”, Study for Radiocommunications Agency, 1996.
- [12] Indepen Aegis Systems and Warwick Business School, “An economic study to review spectrum pricing”, 2004.
- [13] Analysys Consulting, Hogan & Hartson “Etude sur la valorisation du dividende numérique”, studio per ARCEP, 2008.
- [14] MA02revCO07 Special Arrangement, Final Acts of the CEPT Multi-lateral Meeting for the frequency band 1452 - 1479.5 MHz, Costanza 2007.
- [15] ECC/DEC/(03)02, ECC Decision on designation of the frequency band 1479.5 – 1492 MHz for use by Satellite Digital Audio Broadcasting systems, 17 ottobre 2003.

10 Storia del documento

Versione	Data	Osservazioni	Distribuzione
0.1	giugno 2012	Definizione struttura deliverable	Interna FUB
1.0	12 luglio 2012	Bozza	Interna progetto
1.5	1 agosto 2012	Revisione bozza	Interna progetto
FINALE	9 ottobre 2012	Revisione editoriale e aggiornamento dei contenuti alla luce delle attività in ambito CEPT e EU condotte nel settembre 2012	Interna progetto

Appendice A: l'efficienza spettrale per i sistemi d'area

Come già anticipato al paragrafo 5.1, l'efficienza spettrale η_w può essere definita come la massima quantità di informazione che può essere trasmessa con una certa quantità di spettro a disposizione:

$$\eta_w = \text{efficienza spettrale} = \frac{\text{output}}{\text{spettro utilizzato}}$$

Nel caso dei sistemi d'area l'efficienza spettrale può essere quantificata attraverso un'espressione in cui al numeratore vi sia il beneficio espresso in termini del numero M di utenti che il sistema può accettare, al denominatore il costo, cioè la banda W a disposizione, dove R funge da elemento di normalizzazione:

$$\eta_w = MR/W$$

Si noti che già sul significato di M c'è possibilità di confusione: qui è inteso come il numero dei potenziali utenti che possono fruire di un servizio (ad esempio perché in relazione ad esso hanno sottoscritto un abbonamento) e non come il numero degli utenti contemporaneamente attivi che di fatto usufruiscono del servizio in un preciso momento.

Le considerazioni che seguono sono finalizzate a chiarire cosa si intende per efficienza spettrale η_w e come essa si può valutare, prendendo come caso di studio quello dei sistemi d'area e nello specifico i sistemi radiomobili.

Nel caso dei sistemi radiomobili, la quantità M può ad esempio essere intesa come il numero di abbonati al servizio. Gli utilizzatori del servizio sono caratterizzati da un traffico E_0 e l'uso comune degli N canali, intesi non soltanto in riferimento a canali separabili in frequenza, consentirà di offrire il servizio a un numero di utenti $M_0 \gg N$, fissata la qualità che si richiede al sistema (ad esempio la probabilità di blocco).

Per arrivare all'espressione precedente è necessario precisare un'area A_S , nella quale deve essere garantito con continuità il servizio, e una distribuzione su di essa dell'intensità di traffico telefonico richiesto. Nel caso di sistemi pubblici a grande capacità, l'estensione di A_S è così rilevante (si parla sempre di dimensioni continentali o addirittura globali) che diventa trascurabile l'influenza reciproca tra interno ed esterno ai confini dell'area medesima. Si può dunque operare considerando il sistema sotto esame come isolato da ogni altro sistema al di fuori di A_S . All'interno di A_S invece, possono esistere diverse aree A_{Si} con condizioni omogenee rispetto alla propagazione e alla distribuzione degli utenti (ad esempio aree urbane, suburbane, di campagna ecc.). Nel seguito per semplicità si farà riferimento ad un'unica area omogenea, dove la distribuzione statistica degli utenti sia con buona approssimazione uniforme e si supporrà inoltre che ogni utente sia caratterizzabile con la stessa intensità di traffico in Erlang pari a E_0 .

È inoltre necessario precisare il valore di bit rate R che deve essere assicurato all'utente in relazione al tipo di servizio richiesto, il BER (bit error rate) che gli deve essere garantito e la percentuale di area A_S per svolgere il servizio, anche se il suo valore preciso non è determinante, a patto che sia sufficientemente estesa.

Per riferirsi al caso di trasmissioni di voce, il valore di R corrisponderà alla bit rate fornita dal codificatore vocale, già accresciuto dalla ridondanza necessaria perché possa essere trasmessa con il BER. uniforme già precisato. Anche il preciso valore di R ha influenza relativa se si mantiene identico per ogni sistema da confrontare; il caso di paragoni tra sistemi con diversi codificatori vocali viene qui omissso per brevità. Va comunque sottolineato che in tale ultimo caso si deve dapprima concordare che si tratta di codifiche di identica qualità.

Una volta identificata la chiave di canale, ovvero un insieme di funzioni ortogonali (nel tempo, in frequenza o nel dominio dei codici per esempio) è possibile identificare in maniera univoca ogni comunicazione. Se N è il numero di possibili funzioni ortogonali, ovvero di canali indipendenti, che, a seconda dello schema di modulazione associato, sono in grado ciascuno di contenere il valore prefissato di R , si può allora definire una banda equivalente W_0 :

$$W_0 = W/N$$

come la porzione di spettro necessaria per la attivazione di una singola comunicazione (mono o bidirezionale a seconda della scelta preferita).

La grande efficienza dei moderni sistemi radiomobili è in ogni caso dovuta alla grande capacità di riuso delle frequenze sul territorio, ovvero al concetto cellulare, che nella sua versione classica consiste nel dividere l'area A_s in tante sottoaree (celle). Gli N canali a disposizione vengono divisi nell'ambito di un pacchetto di celle (*cluster*) in modo che celle di uno stesso cluster abbiano canali distinti. La periodicità della struttura del cluster sul territorio consente il riuso dei canali in celle di altri cluster a patto che la distanza tra celle con gli stessi canali sia sufficiente a ridurre l'interferenza mutua entro limiti accettabili.

Il riuso frequenziale è quindi una misura di quanto la capacità e la copertura di un sistema possano crescere ri-utilizzando la stessa risorsa ad una certa distanza nel territorio. Come noto la potenza ricevuta decresce allontanandosi dal trasmettitore, secondo leggi di attenuazione che dipendono dalla dimensione delle celle e da fattori ambientali (come ad esempio ambiente urbano o suburbano). Quando il ricevitore mobile è abbastanza lontano dalla stazione radiobase in modo che il segnale ricevuto sia sufficientemente basso, la medesima frequenza può essere riutilizzata senza provocare interferenza. Un principio simile consente di realizzare, per il sistema televisivo, reti a singola frequenza (SFN - *Single Frequency Network*), che utilizzano la stessa frequenza in tutto un territorio da servire, ottenendo efficienze spettrali molto elevate.

In presenza della sola attenuazione di spazio libero l'effetto filtrante derivato dall'ambiente di propagazione è semplice e omogeneo; se vi sono ostacoli o antenne direttive cambia l'effetto filtrante. Precisata comunque la struttura di filtraggio spaziale presente sul territorio (una componente della quale può essere di natura statistica), l'uso di una strategia appropriata consente infine di offrire il servizio ad un numero di utenti $M \gg M_0$.

L'espressione dell'efficienza spettrale può quindi porsi nella forma:

$$\eta = \frac{R}{W_0} \frac{M_0}{N} \frac{M}{M_0} = \eta_f \eta_t \eta_s$$

dove l'efficienza globale risulta fattorizzata nelle tre efficienze parziali:

$$\eta_f = \frac{R}{W_0}$$

definita come efficienza in frequenza, che si misura in bit/s/Hz;

$$\eta_t = \frac{M_0}{N}$$

definita come efficienza nel tempo;

$$\eta_s = \frac{M}{M_0}$$

definita come efficienza nello spazio.

Le tre efficienze parziali si riferiscono a tre differenti ambiti tecnologici: η_f è collegata alla capacità di realizzare modulazioni compatte in frequenza; la seconda, η_t , si massimizza con l'adozione di opportune strategie di assegnazione dei canali; la terza, η_s , è strettamente collegata con la capacità del sistema di resistere alle interferenze, unitamente alla efficacia del filtraggio spaziale, naturale e progettato, messo in azione.

Nell'ipotesi formulata di traffico uniforme, l'efficienza spettrale può essere sviluppata nel modo seguente, che corrisponde al dispiegamento uniforme di una sistema cellulare, che prescinde quindi da considerazioni collegate alla capacità del sistema.

Innanzitutto se l'area di servizio A_s è divisa in celle in numero pari ad M_c il numero di utenti M può essere espresso come:

$$M = M_c M_s$$

dove M_s è il numero di utenti per cella. È possibile allora riferirsi non all'efficienza globale, ma a quella per cella η_M definita come:

$$\eta_M = \frac{\eta_W}{M_c} = \eta_t \eta_f \left(\frac{M_s}{M_0} \right)$$

È evidente che se l'area A_s è servita con celle sempre più piccole, M_c aumenta e corrispondentemente aumenta anche η_W , mentre η_M non ne viene alterato. Finché è possibile, dunque, conviene aumentare M_c diminuendo il raggio delle celle: il limite a questa procedura risiede nella necessità di non aggravare eccessivamente la gestione della rete, che ripotrebbe risultare troppo appesantita in presenza di un elevato numero di celle (ad esempio nella gestione dell'*hand-over*, che deve essere gestito al fine di assicurare all'utente in movimento il mantenimento della conversazione al passaggio da una cella ad un'altra).

Va quindi sottolineato che nei confronti tra diverse soluzioni sistemiche è possibile riferirsi all'efficienza per cella η_M , che risulta di particolare interesse per confrontare specifici sistemi (es. sistemi radiomobili caratterizzati da diverse condizioni di copertura e/o mobilità).

Se invece si vuole dare la indicazione in assoluto della capacità di un sistema di far fronte ad alte intensità di traffico sul territorio, si può far riferimento, oltre che a η_W , anche al parametro alternativo e definito come:

$$e = \eta_W \frac{E_0}{A_s R}$$

che ha le dimensioni di Erlang/(Hz m²).

Fissato il sistema di mo-demodulazione, risulta solitamente fissato un valore minimo di C/I, rapporto tra segnale utile ed interferente, da garantire. Per assicurare il rispetto dei requisiti in termini di C/I si adotta lo schema del cluster, che consente, attraverso la partizione dei canali utili tra le celle del cluster, di portare gli interferenti ad una conveniente distanza dal trasmettitore utile. Detta m la dimensione del cluster si ha allora per ogni cella un numero di canali n dato da:

$$n = N/m$$

si ottiene allora:

$$\eta_M = \eta_F \left(\frac{M_s}{N} \right) \frac{1}{m}$$

che mostra la ben nota dipendenza di η_M dalla dimensione del cluster.

Nel caso di sistemi ad alta capacità, sia il numero N che il risultante n sono sufficientemente grandi da poter essere ben approssimati con il numero di utenti per canale forniti per N (o n) tendenti all'infinito. Tale valore può essere calcolato una volta fissato il sistema di accesso.

Se si tratta di un semplice sistema con blocco, basta fissare la probabilità di blocco P_b (valori tipici di P_b sono pari a 10^{-2} per i sistemi radiomobili). Si è così messo in evidenza un fattore che può ritenersi indipendente dalle scelte sistemiche successive. Può dunque essere semplificato senza che vengano da ciò toccati paragoni tra i vari sistemi.

Si indicherà quindi con $\overline{\eta_M}$ il valore di η_M normalizzato in tal modo: ciò corrisponde ad aver eliminato η_t nell'espressione precedente e dunque a riferirsi al massimo numero di utenti "attivi" per cella. Poiché spesso si potrà fare riferimento a valori normalizzati, la scelta tra η_M e $\overline{\eta_M}$ non è essenziale nella pratica.

Un ulteriore fattore di interesse per l'efficienza del sistema è l'efficienza in potenza, η_P , definita come il numero di bit trasmessi per l'unità di energia necessaria per realizzare la trasmissione. Per un sistema cellulare l'efficienza in potenza può essere espressa in funzione dell'efficienza spettrale η_W :

$$\eta_P = \frac{C}{S} = \frac{B}{S} \eta_W = \frac{\eta_W}{E_b} = \frac{1}{N_0} \frac{\eta_W}{\text{SNR}}$$

dove C è la capacità (bits/s), S è la potenza ricevuta in Watt, B è la banda disponibile, E_b è l'energia per bit, SNR è il rapporto segnale rumore richiesto e N_0 è la densità spettrale di rumore.

Infine, per completezza, si cita l'importanza dell'efficienza nel tempo, che deve essere opportunamente valutata anche per tenere conto delle possibili significative difformità nell'uso delle risorse spettrali: molte applicazioni, infatti, non utilizzano lo spettro in maniera continuativa e, in funzione del tipo di servizio, la risorsa spettrale può non essere utilizzata 24 ore al giorno.