

# POLITECNICO DI TORINO

---



## III Facoltà di Ingegneria dell'Informazione Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria delle Telecomunicazioni

### TESI DI LAUREA MAGISTRALE

MISURE DI CAMPO ELETTRICO GENERATO IN AMBIENTE DI VITA  
DA STAZIONI RADIO BASE UMTS E ANALISI DELLA RELAZIONE  
CON LA POTENZA IN ANTENNA

---

In Collaborazione Con:



RELATORE ACCADEMICO:  
PROF.SSA PAOLA PIRINOLI

CANDIDATO:  
MARZIA MATHIOU

Novembre 2011



# 1 Sommario

Ringraziamenti.....	4
1. Prefazione.....	5
1.1 ARPA Valle d’Aosta .....	6
1.2 Vodafone Italia.....	8
2. Il Campo Elettromagnetico.....	10
3. Reti Di Telefonia Mobile .....	23
3.1 Trasmettitore e Ricevitore.....	23
3.2 Copertura Territoriale: Celle .....	25
3.3 Rete Radiomobile.....	26
3.4 Progettazione Di Una Cella .....	28
3.5 Tecniche Di Accesso Multiplo .....	31
3.6 Tecniche Di Codifica.....	34
3.7 Tecniche Di Modulazione.....	36
3.8 Multipath e altri disturbi del segnale .....	39
3.9 ISI – Interferenza Intersimbolica.....	46
4. Tecnologie Di Comunicazione Mobile .....	50
4.1 Breve Storia Del telefono.....	50
4.2 Tecnologie Di Comunicazione.....	53
4.2.1 TACS.....	53
4.2.2 GSM .....	56
4.2.3 UMTS .....	65
5. Esposizione Della Popolazione – Normativa .....	78
6. Strumenti, Metodi Di Misura e Simulazioni .....	105
7. Strumento di Misura e Software .....	151
8. Misure ed Elaborazioni.....	179
8.1 Descrizione Siti e Sorgenti .....	180
8.2 Metodologie di Misura .....	184
8.3 Simulazioni.....	187
8.4 Dati, Grafici ed Elaborazioni .....	191
9. Conclusioni .....	223
APPENDICE A – Codice Completo Software .....	234
APPENDICE B – Macro Microsoft Excel .....	254
APPENDICE C – Grafici Campo Elettrico/Potenza - Campo Elettrico/Traffico.....	257
BIBLIOGRAFIA .....	275



# Ringraziamenti

---

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutato e supportato nel mio lavoro di tesi.

La professoressa Paola Pirinoli per il tempo dedicatomi e per avermi seguito nella stesura della tesi. Il direttore generale dell’Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente, nella persona del dottor Giovanni Agnesod, il direttore tecnico, Ing. Marco Cappio Borlino, per il supporto tecnico e i preziosi consigli, i tecnici della sezione Radiazioni Non Ionizzanti, Ing. Leo Cerise e Erik Imperial, e in particolar modo la collega ed amica dottoressa Valeria Bottura per il costante supporto morale, per il suo importante contributo tecnico e per avermi seguito e consigliato in ogni fase del mio lavoro.

Un sentito ringraziamento va anche all’Ing. Davide Vaccarono e all’Ing. Stefano D’Elia, del gruppo “Campi Elettromagnetici” di Vodafone Italia NV, per il prezioso aiuto tecnico, per il sostegno nelle fasi cruciali del lavoro e per la disponibilità sempre dimostrata.

Un grazie al mio ragazzo, dott. Daniele Pession, per avermi supportato e sopportato in tutti questi mesi e per il suo prezioso aiuto. Grazie anche ai miei genitori e a Melissa, agli zii, nonni e tutti quelli che hanno creduto nel mio lavoro.

Lavoro svolto in collaborazione con:



# 1. Prefazione

---

L'aumento della sensibilità nei confronti della possibile nocività delle onde elettromagnetiche è dovuto principalmente alla diffusione della telefonia cellulare. La tecnologia per la trasmissione cellulare richiede che le antenne entrino a far parte in maniera più capillare del tessuto urbano. Questo poiché il segnale deve essere in grado di "seguire" l'utente, per poterlo raggiungere dovunque egli sia. Il territorio è quindi suddiviso in piccole zone, dette celle, e a capo di ogni cella deve essere presente una stazione radio base (SRB), fornita di una o più antenne. Per tale motivo, soprattutto in città, le antenne si sono moltiplicate ed essendo poste su edifici e palazzi sono sicuramente più visibili delle antenne di radio diffusione.

Proprio a causa di questa invasività le emissioni elettromagnetiche delle stazioni radio base sono altamente controllate e le modalità di confronto con i limiti imposti dalla normativa sono molto cautelative: a tal fine si valutano le esposizioni alla potenza massima. La condizione di emissione della massima potenza non è molto realistica, nel senso che le reti sono sempre progettate in modo sovradimensionato per minimizzare il rischio di congestione del traffico telefonico. Questo porta i gestori di telefonia mobile a chiedere alle autorità di controllo che venga considerata in sede di valutazione modellistica preliminare alla realizzazione degli impianti, nel confronto con i limiti normativi, una potenza irradiata inferiore rispetto a quella massima, sulla base di considerazioni probabilistiche.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è verificare la possibilità di trovare dei coefficienti da applicare alle simulazioni teoriche eseguite partendo dai dati di progetto di una SRB utilizzando la tecnologia UMTS per avere una visione più realistica dell'impatto elettromagnetico che tale impianto può provocare sull'ambiente circostante. Tali coefficienti vanno ricavati confrontando misure di campo elettrico sul campo, simulazioni teoriche e traffico telefonico relativi a una SRB.

Durante questo lavoro di tesi è sorta la necessità di sviluppare un software di controllo da remoto, che consentisse di controllare via PC lo strumento per l'esecuzione delle misure in modo prolungato nel tempo definendone le

impostazioni e le modalità di acquisizione dei dati. Lo sviluppo di tale software è stato quindi parte integrante e fondamentale del lavoro.

Una volta sviluppato e testato il software, si è potuto iniziare a eseguire le misure vere e proprie. Sono state prese in considerazione più postazioni di misura che rispondessero alle caratteristiche volute: la scelta è ricaduta su tre siti, di cui due in Valle d'Aosta e uno nella cittadina di Ivrea. Sono state eseguite una o più sessioni di misura per ogni sito prescelto, eseguendo misurazioni anche di 27 ore consecutive. La metodologia di misura è stata variata nel corso del lavoro in quanto il primo metodo utilizzato non dava risultati congrui con l'obiettivo posto.

Per poter comprendere se il sito poteva rispondere alle caratteristiche volute e per scegliere il punto di misura più appropriato sono state eseguite delle simulazioni con i software a disposizione presso ARPA Valle d'Aosta.

Conclusa la fase di misura, si è proceduto alle elaborazioni dei risultati. E' stato possibile mettere a confronto i dati di potenza e di traffico forniti dall'operatore con le misure di campo elettrico. E' stata calcolata la correlazione tra le sequenze di dati di potenza e di campo elettrico, ottenendo risultati attesi. Meno prevedibili sono stati i risultati ottenuti confrontando i dati di traffico con quelli di campo elettrico.

In seguito è stata eseguita una seconda elaborazione, atta a comprendere se fosse possibile trovare i coefficienti da applicare alle simulazioni per avere una visione più realistica dell'impatto elettromagnetico della SRB. Tale elaborazione ha dato risultati differenti a seconda del sito considerato, tenendo anche conto che i tre siti prescelti hanno caratteristiche tecniche e territoriali differenti fra loro: ciò si è dimostrato un risultato interessante che l'operatore di telefonia con il quale si è collaborato durante il lavoro intende approfondire.

## **1.1 ARPA Valle d'Aosta**

La tesi è stata svolta in collaborazione con l'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Valle d'Aosta. Più in particolare sono stata seguita dai tecnici dell'Area "Radiazioni Non Ionizzanti" (NIR), facente parte della sezione "Agenti fisici". L'ARPA è un ente strumentale della Regione Autonoma Valle d'Aosta che svolge attività conoscitive e di prevenzione e tutela in campo ambientale. Le sue

principali attività comprendono il controllo di fattori fisici, chimici e biologici che caratterizzano l'ambiente nelle sue diverse componenti, aria, acqua e suolo; esegue il monitoraggio degli effetti delle dinamiche globali di cambiamento meteorologico sui territori alpini e svolge analisi di laboratorio chimiche, biologiche e microbiologiche.

L'area operativa NIR si occupa dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici nello spettro di frequenza da 0 Hz a qualche decina di GHz, che va dalla tensione della rete elettrica alle frequenze in gioco per i collegamenti in ponte radio. Per quanto riguarda la parte a Radiofrequenza (10 kHz – 300 GHz), tra le varie mansioni svolte vi è il rilascio di pareri per l'installazione di nuovi impianti, previa una simulazione teorica e dove ritenuto necessario misure in campo. Tali simulazioni richiedono che siano noti i dati tecnici dell'impianto, la localizzazione esatta e i vari diagrammi di antenna. Nel caso in cui l'analisi teorica indichi che nelle zone a permanenza prolungata di persone il valore di campo elettrico supera il valore di attenzione previsto dalla normativa nazionale, l'Agenzia rilascia parere negativo alla realizzazione dell'impianto. Quando invece i dati di simulazione indicano valori inferiori al valore di attenzione ma superiori alla sua metà, viene rilasciato un parere condizionata alla verifica degli effettivi livelli di esposizione misurati dopo la realizzazione dell'impianto. Se, infine il valore calcolato è inferiore alla metà del valore di attenzione l'ARPA rilascia un parere positivo alla realizzazione dell'impianto. In presenza di più impianti sulla stessa area del territorio le simulazioni sono eseguite tenendo conto dei contributi di tutti gli impianti.

Le simulazioni sono sempre eseguite in condizioni di massimo carico per tutti gli impianti, condizione che per gli impianti di telefonia mobile non si verifica mai o, comunque, si verifica con probabilità molto limitata. Da queste considerazioni nascono le motivazioni alla base dello sviluppo del presente lavoro.

L'ARPA Valle d'Aosta ha reso disponibile la documentazione teorica e la strumentazione necessaria per le dovute misure, (l'analizzatore di spettro e varie antenne/sensori), e i software di simulazione necessari per lo studio.



## 1.2 Vodafone Italia

Il lavoro di tesi è stato svolto grazie anche alla partecipazione dell'azienda Vodafone Italia NV che ha fornito i dati di traffico e di potenza delle stazioni radio base prese in esame. E' stata inoltre messa a disposizione la sede di IVREA (TO) per la realizzazione di una sessione di misura, in quanto il tetto dell'edificio, dove sono presenti antenne di telefonia mobile, è accessibile facilmente e in sicurezza per l'installazione della strumentazione di rilievo.

Vodafone è suddivisa in diversi dipartimenti e aree e per questo lavoro di tesi è stato svolto in collaborazione con il dipartimento di Radio Network Engineering appartenente alla Direzione delle Tecnologie. Tale dipartimento si occupa dei temi riguardanti l'accesso radio alla rete ed è suddiviso in 5 gruppi: campi elettromagnetici, copertura radio e pianificazione frequenziale, ottimizzazione, hardware e traffico, nuove tecnologie.

Le attività riguardano sia il supporto ai dipartimenti operativi che si occupano di progettazione di nuove stazioni radio base e del monitoraggio/ottimizzazione di quelle esistenti, sia la funzione d'interfaccia con i vendors e le altre funzioni aziendali (italiane o del gruppo VF).

In particolare il gruppo CAMPI ELETTROMAGNETICI con il quale si è collaborato direttamente:

- coordina tutti gli sviluppi e gli impatti sull'ingegneria derivanti dai limiti di esposizione umana alle radiofrequenze e dalle normative tecniche riguardanti le metodologie di calcolo e misura dei campi elettromagnetici, definendo le opportune linee-guida operative di progetto;
- partecipa alle attività di standardizzazione e ai gruppi di lavoro nazionali e internazionali sui campi elettromagnetici, interfacciandosi con le agenzie e le istituzioni ambientali (ISPRA, ARPA, ISS) e supportando i dipartimenti regionali su tutti i temi relativi ai campi elettromagnetici, incluso il Catasto Nazionale.

In generale sono sempre valutati tutti gli aspetti che concorrono alla realizzazione della rete radio, dalla localizzazione migliore per l'antenna alla progettazione della copertura cellulare più adeguata, tenendo conto sia della capacità che dovrà avere la SRB, sia della sua caratterizzazione radioelettrica completa (tipologia di antenna, tilt elettrico o meccanico, potenza emessa, meccanismi di power control o diversità).

## 2. Il Campo Elettromagnetico

---

I primi due principi fondamentali dell'elettromagnetismo, sintetizzati da Gauss, dicono quanto segue:

- Un corpo carico produce nello spazio circostante delle linee di forza elettriche, il cui flusso attraverso una superficie chiusa è pari alla somma delle cariche poste al suo interno divisa per la costante dielettrica;
- Una corrente elettrica che circola in un conduttore produce delle linee di forza magnetiche attorno al conduttore, il cui flusso attraverso una superficie chiusa è sempre nullo.

La prima affermazione è detta Teorema di Gauss del campo elettrico mentre la seconda viene detta anche Teorema di Gauss del campo magnetico. Il primo teorema ha il seguente significato fisico: esiste il monopolo elettrico, cioè la carica elettrica singola, ed essa è sorgente di campo elettrico. Il secondo teorema ci dice invece che il campo magnetico è solenoidale, in altre parole che le linee di forza sono sempre chiuse, e non esiste il monopolo magnetico. Spezzando un magnete in due, infatti, si trovano sempre due magneti dotati entrambi di polo nord e polo sud. Il fisico scozzese James Clerk Maxwell cercò di individuare le equazioni fondamentali per descrivere completamente tutti i fenomeni elettromagnetici. In altre parole, egli cercava per i campi elettrici e magnetici qualcosa di analogo alle leggi di Newton per la meccanica. Le leggi di Gauss per il campo elettrico e per il campo magnetico, quella di Ampère e quella di Faraday costituivano un insieme di equazioni che permettevano di affrontare un gran numero di situazioni riguardanti i campi elettrici e magnetici. Per questo motivo Maxwell le analizzò, per verificare se erano sufficienti a descrivere e risolvere qualsiasi problema che riguardasse i campi elettrici e magnetici.

Le equazioni di Maxwell sono riportate nella tabella sottostante:

1.	Legge di Gauss per il campo elettrico	$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \frac{q}{\epsilon}$
2.	Legge di Gauss per il campo magnetico	$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$
3.	Legge dell'induzione di Faraday	$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\phi(\mathbf{B})}{dt}$
4.	Legge di Ampere - Maxwell	$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0(I + \epsilon_0 \frac{d\phi(\mathbf{E})}{dt})$

**Tabella 2.1 – Equazioni di Maxwell**

In termini qualitativi le quattro equazioni esprimono i seguenti concetti:

- Il campo elettrico è generato da cariche elettriche, da cui escono linee di forza dirette radialmente.
- Non esistono poli magnetici isolati, e quindi non esistono punti nello spazio in cui entrano o escono più linee di campo magnetico.
- Un campo magnetico variabile induce nei conduttori una forza elettromotrice.
- Le correnti elettriche generano, nello spazio che le circonda, un campo magnetico le cui linee sono chiuse e si avvolgono intorno alla corrente che le produce.

Una delle conseguenze della formulazione di Maxwell è la produzione di onde elettromagnetiche quando abbiamo campi elettrici o magnetici che variano rapidamente nel tempo. Nel 1886 Heinrich Rudolph Hertz riuscì a eseguire un esperimento che evidenziò la presenza di tali onde.

Prima di arrivare al ragionamento che portò Maxwell a scrivere le sue equazioni, bisogna fare un passo indietro e ricavare le definizioni e i concetti principali dei campi elettrico e magnetico.

Tutti i fenomeni elettrici e magnetici hanno origine dalle cariche elettriche. La carica elettrica, una delle proprietà fondamentali della materia, viene trasportata principalmente da elettroni e protoni. Ogni oggetto attorno a noi è costituito da atomi, i quali sono costituiti a loro volta da elettroni e protoni. In una condizione normale, il numero di elettroni e protoni posseduti da ciascun atomo è uguale, in modo da creare un equilibrio; in questo caso si dice che l'oggetto è a carica neutra. Quando invece un oggetto viene "caricato", ovvero possiede una carica elettrica

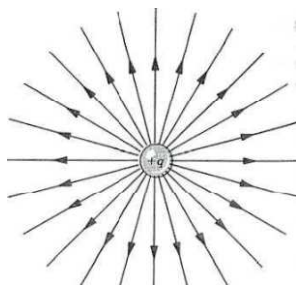
positiva o negativa, significa che il numero di protoni o di elettroni sono in numero maggiore rispetto all'equilibrio. In particolare, un numero maggiore di elettroni conferisce all'oggetto una carica negativa, al contrario della carica positiva che si ha quando sono i protoni a essere in numero maggiore rispetto agli elettroni. L'intensità di carica trasportata da un elettrone è la stessa trasportata da un protone, cambia solamente il segno. In realtà, anche in condizione di carica neutra, l'oggetto possiede una carica, che è la somma algebrica delle cariche positive e negative (ognuna col proprio segno) in esso contenute. Le cariche elettriche che esistono quindi in natura sono di due tipi: quelle positive e negative. Le cariche di ugual segno si respingono, mentre quelle di segno opposto si attraggono. Questo tipo d'interazione può essere descritto come una forza che le due cariche esercitano. In particolare la legge di Coulomb afferma che la forza esercitata da due cariche è direttamente proporzionale al loro prodotto, mentre è inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza e alla costante dielettrica nel vuoto.

$$\mathbf{F} = k_0 \cdot (q_1 \cdot q_2) / r^2 \cdot \vec{u} \quad (2.1)$$

dove  $k_0 = 1/(4\pi\epsilon_0) = 8.99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$  e  $\vec{u}$  è il versore.

La carica elettrica viene solitamente indicata con la lettera  $q$  e si misura in Coulomb nel sistema metrico internazionale.

Tutti sappiamo che, se strofiniamo su della lana un oggetto di plastica, esso si carica elettricamente e attira o respinge piccoli frammenti di carta. Notiamo quindi che



**Figura 2.1 - linee di forza del campo elettrico per una carica positiva**

l'oggetto di plastica caricato elettricamente è in grado di "perturbare" elettricamente lo spazio attorno a sé, cioè riesce a fare in modo che altri oggetti elettricamente carichi risentano di forze dovute alla sua presenza.

Possiamo quindi pensare che, se in un certo spazio sono presenti delle cariche elettriche, quello spazio sarà perturbato dalla presenza di quelle cariche; si dice che quando la carica campione viene a trovarsi in questa regione di spazio subisce l'azione di una forza. Secondo questa rappresentazione, si può dire che lo spazio è divenuto sede di un campo di forze. Se consideriamo questa forza per unità di carica

<sup>1</sup> I vettori verranno sempre rappresentati con le lettere in grassetto.

campione, otteniamo la grandezza che prende il nome di campo elettrico e si indica con E.

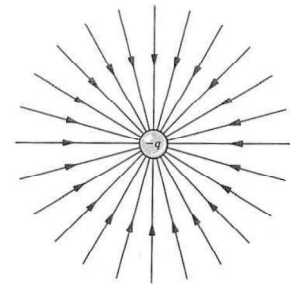
$$\mathbf{E} = \mathbf{F} / q \quad (2.2)$$

La sua unità di misura è N/C (Newton su Coulomb) ma la più utilizzata è V/m (Volt al metro).

Possiamo anche riscrivere il campo elettrico sostituendo la legge di Coulomb per la forza:

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \bar{u} \quad (2.3)$$

Come qualunque altro campo vettoriale, il campo elettrico può essere rappresentato graficamente tracciando nello spazio d'interesse delle linee di forza in modo tale che ogni punto di quest'ultima è tangente al vettore campo elettrico. Inoltre il numero di linee di forza in un volumetto di spazio è proporzionale all'intensità media del campo in quel volume.



Se la carica considerata è positiva le linee di campo si dicono uscenti (si irradiano in tutte le direzioni a partire dalla carica, vedi Figura 2.1) e la carica è

**Figura 2.2 - linee di forza del campo elettrico per una carica negativa**

definita sorgente; se la carica considerata è, invece, negativa le linee di campo sono dette entranti (sono dirette verso la carica) e la carica è chiamata pozzo (vedi Figura 2.2). Le linee di forze escono dalle cariche positive ed entrano in quelle negative.

Se vogliamo calcolare il flusso di campo elettrico attraverso una superficie sferica concentrica con la carica q, il versore normale alla sfera coincide con il versore lungo la direzione radiale,  $\bar{u}$ . L'angolo fra E e  $\bar{u}$  è 0. Sapendo che il campo elettrico ha lo stesso modulo in tutti i punti della superficie sferica e che l'area della sfera è  $4\pi r^2$  possiamo scrivere il flusso elettrico:

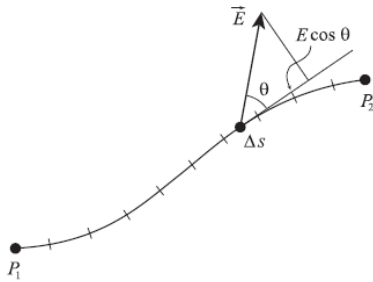
$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = E \oint_S dS = E \cdot S = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} (4\pi r^2) = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (2.4)$$

Il flusso del campo elettrico attraverso la sfera è quindi proporzionale alla carica indipendentemente dal raggio della sfera. Se ci sono diverse cariche all'interno della superficie, il flusso elettrico totale sarà la somma dei flussi prodotti da ciascuna carica. La **legge di Gauss per il campo elettrico** afferma che il flusso elettrico attraverso una superficie chiusa che circonda le cariche  $q_1, q_2, q_3, \dots$  è:

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (2.5)$$

dove  $q=q_1+q_2+q_3+..$  è la carica netta totale all'interno della superficie chiusa.

Consideriamo una zona di spazio nella quale è presente un campo elettrico. Se una carica elettrica  $q$  si muove nel campo passando da un punto  $P_1$  a un punto  $P_2$  lungo la linea  $s$  (Figura 2.3), il campo elettrico compie un lavoro. Per ogni spostamento elementare  $\Delta s$  il lavoro  $\Delta L$  è dato dal prodotto dello spostamento  $\Delta s$  per la



proiezione  $qE \cos\theta$  della forza  $q\mathbf{E}$  nella direzione dello spostamento medesimo (in cui,  $\theta$  è l'angolo fra  $\mathbf{E}$  e  $s$ ).

Per una suddivisione in segmenti  $ds$  molto piccoli, la somma si riduce a un integrale di

**Figura 2.3 - Lavoro del campo elettrico** linea del prodotto scalare  $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$ :

$$L_{12} = q \int_{P_1}^{P_2} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.6)$$

Se in questa zona di spazio è presente solo il campo elettrico, il lavoro  $L_{12}$  è indipendente dalla particolare linea percorsa per andare da  $P_1$  a  $P_2$  e dipende soltanto dai punti estremi  $P_1$  e  $P_2$ . In questo caso è molto utile riferirsi al lavoro compiuto dal campo sull'unità di carica. A questa quantità si assegna il nome di differenza di potenziale (d.d.p.) fra  $P_1$  e  $P_2$ , che è così definita:

$$V_{12} = \frac{L_{12}}{q} = \int_{P_1}^{P_2} \mathbf{E} \cdot \cos\theta \cdot ds = \int_{P_1}^{P_2} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.7)$$

La differenza di potenziale si misura in volt (simbolo: V).

Quando  $V_{12}$  è pari a 0, i due punti sono allo stesso potenziale e si dicono equipotenziali. Questo può avvenire se il campo  $\mathbf{E}$  è nullo oppure se il cammino è tutto perpendicolare alle linee di forze  $\cos\theta=0$ . In genere, le differenze di potenziale vengono espresse rispetto a un punto di riferimento, che possiede caratteristiche peculiari per quella particolare zona di spazio. Spesso questo riferimento è il suolo (terra) o una qualche struttura sufficientemente estesa, cui si attribuisce comunemente il nome di massa. La massa può essere collegata a terra oppure no.

Un flusso ordinato di cariche elettriche costituisce una corrente elettrica. Per convenzione, la corrente scorre nel verso in cui si muovono le cariche positive; nel

caso di cariche negative, pertanto, il verso della corrente è opposto al moto delle cariche. L'intensità della corrente è riferita a una certa superficie ed è data, per definizione, dalla carica che attraversa quella superficie nell'unità di tempo. Ovvero, se  $\Delta q$  è la quantità di carica che attraversa la data superficie nel tempo  $\Delta t$ , la corrente  $i$  è espressa dal rapporto:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (2.8)$$

L'intensità di corrente si misura in ampere (simbolo: A).

1 ampere = 1 culomb al secondo = 1 C/s.

Il Coulomb può essere, quindi, definito a partire dall'Ampere: 1 Coulomb è la quantità di carica che passa in un secondo attraverso una qualsiasi sezione del filo percorso da una corrente di 1 Ampere.

Quando le cariche elettriche sono in movimento danno origine a un campo magnetico. Le cariche elettriche sono dunque le sorgenti sia del campo elettrico sia di quello magnetico: cariche immobili, solo campo elettrico; cariche in movimento, campo elettrico e campo magnetico.

A differenza delle linee di campo elettrico, che si originano dalle cariche positive e terminano su quelle negative, le linee di campo magnetico circondano le correnti, sviluppandosi in percorsi chiusi senza origine né fine (Figura 2.4).

L'intensità e la direzione del vettore campo magnetico ( $\mathbf{H}$ ) sono tali che l'integrale del prodotto  $\mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$  su una linea chiusa 'l' tracciata nel campo deve essere uguale alla corrente racchiusa da tale linea.

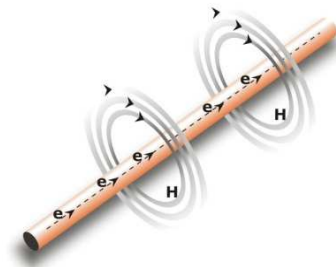


Figura 2.4 - linee di forza del campo magnetico

$$\int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (2.9)$$

L'unità di misura del campo magnetico è l'Ampere/metro.

È molto importante conoscere anche l'induzione magnetica  $\mathbf{B}$ , legata all'intensità del campo magnetico applicato esternamente da una relazione di proporzionalità.

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{H} \quad (2.10)$$

dove  $\mu_0$  è la permeabilità magnetica nel vuoto ed esprime l'attitudine di una sostanza a lasciarsi magnetizzare.



Il suo valore è:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2 \quad (2.11)$$

In un materiale solido si ha:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (2.12)$$

dove in generale la permeabilità del vuoto differisce da quella del materiale considerato.

Il campo magnetico, inoltre, esercita un'azione su una carica elettrica in moto nella regione di spazio da esso occupata.

Detta  $q$  la carica in questione e  $v$  la sua velocità, la forza esercitata da  $B$  su  $q$ , detta forza di Lorentz, è:

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{v} \wedge \mathbf{B} \quad (2.13)$$

dove  $\wedge$  è il prodotto vettoriale.

Una legge molto importante per i campi magnetici statici è la legge di Ampere.

Ampere aveva considerato una corrente rettilinea infinita  $I$ ; il campo magnetico a distanza  $r$  dalla corrente è:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \hat{u} \quad (2.14)$$

Per calcolare la circuitazione intorno alla corrente, prese un percorso circolare di raggio  $r$  che coincide con una linea di forza magnetica. La forza magnetomotrice, ovvero la circuitazione magnetica, è quindi espressa:

$$\oint_L B \cdot dl = B \oint_L dl = BL = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \cdot 2\pi r = \mu_0 I \quad (2.15)$$

La circuitazione magnetica è dunque proporzionale alla corrente elettrica  $I$ , indipendentemente dal raggio del percorso. Questa equazione è valida per ogni tipo di corrente, e non solo per quella rettilinea ed è detta **legge di Ampere**:

la circuitazione del campo magnetico o fmm lungo una linea chiusa che concatena le correnti  $I_1, I_2, I_3, \dots$  è

$$\oint_L B \cdot dl = \mu_0 I \quad (2.16)$$

dove  $I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$  rappresenta la corrente totale concatenata dal percorso  $L$ .

Quando il campo elettrico e il campo magnetico variano nel tempo, nascono importanti fenomeni d'interazione fra loro che non sono presenti nel caso di campi statici. Un campo magnetico variabile nel tempo, infatti, produce un campo

elettrico nelle zone a esso circostanti. Il campo elettrico che ne risulta è analogo a un campo originato da cariche elettriche.

Il campo elettrico così prodotto varia con la stessa frequenza del campo magnetico inducente e le sue linee di forza si concatenano in circuiti chiusi attorno alle linee del campo magnetico generatore (Figura 2.5).

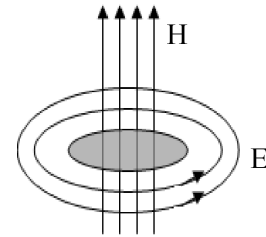


Figura 2.5 - campo E generato da un campo H variabile.

Esiste anche il fenomeno duale: un campo elettrico tempo-variante produce un campo magnetico, anche esso tempo-variante, le cui linee di forza si concatenano in circuiti chiusi intorno alle linee del campo elettrico generatore.

Questo fenomeno è chiamato induzione elettromagnetica ed è stato scoperto quasi contemporaneamente, ma indipendentemente, da Faraday e Henry. Essi avevano notato che, ponendo un conduttore elettrico che forma un percorso chiuso in una regione nella quale esiste un campo magnetico, se il flusso magnetico attraverso in circuito varia nel tempo, si forma una corrente nel circuito mentre il flusso sta variando. La presenza di una corrente indica l'esistenza di un campo elettrico che agisce sulle cariche libere del conduttore; questo campo produce una forza elettromagnetica lungo il circuito detta appunto forza elettromotrice indotta che dipende dalla rapidità di variazione del flusso magnetico. La direzione di questa forza varia a seconda che il flusso aumenti o diminuisca. Indicando il flusso di campo magnetico con  $\phi_m$ , possiamo scrivere:

$$fem = - d\phi_m / dt \quad (2.17)$$

che esprime la **legge di Faraday-Henry**. Tale legge dice che in un qualsiasi circuito chiuso posto in un campo magnetico variabile viene indotta una fem uguale alla derivata rispetto al tempo del flusso magnetico attraverso il circuito con segno cambiato.

Il flusso magnetico attraverso la linea chiusa L è espresso nel seguente modo:

$$\phi_m = \int_S B \cdot ds \quad (2.18)$$

Inoltre, l'esistenza di una fem implica quella di un campo elettrico:

$$fem = \oint_L E \cdot dL \quad (2.19)$$

L'equazione di Faraday-Henry può quindi essere riscritta:

$$\oint_L E \cdot dL = - \frac{d}{dt} \int_S B \cdot ds \quad (2.20)$$

Tale equazione è valida per una linea chiusa  $L$  arbitraria, anche se non coincide con un conduttore elettrico. In questo modo, un campo magnetico dipendente dal tempo comporta l'esistenza di un campo elettrico tale che la circuitazione del campo elettrico lungo un percorso chiuso arbitrario sia uguale e opposta alla derivata rispetto al tempo del flusso del campo magnetico attraverso una superficie avente per contorno quel percorso.

Si potrebbe pensare che esista un'equazione analoga che correli la circuitazione del campo magnetico con la rapidità di variazione del flusso elettrico. Per quanto riguarda la circuitazione del campo magnetico abbiamo a disposizione la legge di Ampere, ma questa si riferisce a campi statici.

Quando i campi dipendono dal tempo possiamo riscrivere la corrente così:

$$I + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S E \cdot dS \quad (2.21)$$

ottenendo:

$$\oint_L B \cdot dl = \mu_0 \left( I + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S E \cdot dS \right) \quad (2.22)$$

che qualora usassimo per i campi statici ricondurrebbe alla legge di Ampere in quanto l'ultimo termine sarebbe nullo. Tale modifica alla legge di Ampere fu proposta da Maxwell e pertanto tale legge viene definita **legge di Ampere-Maxwell**.

Osservandola si conclude che l'effetto di un campo elettrico dipendente dal tempo è l'aggiunta di un termine di corrente che Maxwell chiamò corrente di spostamento. Concludendo, la legge di Ampere-Maxwell afferma che un campo elettrico dipendente dal tempo comporta l'esistenza, nella stessa regione, di un campo magnetico tale che la circuitazione del campo magnetico lungo un percorso chiuso arbitrario sia proporzionale alla derivata rispetto al tempo del flusso del campo elettrico attraverso una superficie delimitata dal percorso stesso.

Campi elettrici e magnetici rapidamente variabili non rimangono quindi fra loro disaccoppiati: l'uno dà origine all'altro e, in sostanza, entrambi danno origine a un'unica entità chiamata campo elettromagnetico. Il campo elettromagnetico ha natura ondulatoria e si propaga allontanandosi dalla sorgente da cui trae origine.

Il campo elettromagnetico presenta caratteristiche profondamente diverse a seconda se si è vicino o lontano alla sorgente che lo produce: possiamo parlare di

“zona di campo vicino” o “zona di campo lontano”. Se consideriamo la distanza  $r_L$ , definita come la maggiore tra

$$r_R = \lambda \quad (2.23)$$

e

$$r_F = d^2 / \lambda \quad (2.24)$$

(dove  $\lambda$  è la lunghezza d’onda e  $d$  è la dimensione della sorgente, assumibile come il diametro di una sfera a essa circoscritta) allora possiamo individuare la zona di “campo lontano” come l’insieme di punti distanti dalla sorgente più di  $r_L$ ; viceversa i punti a distanza minore di  $r_L$  appartengono alla zona di campo vicino.

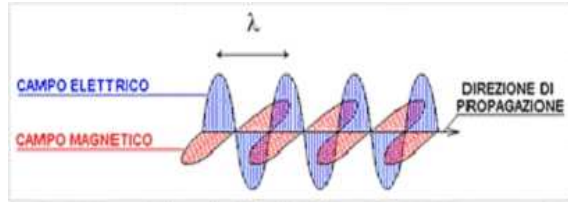


Figura 2.6 - campo elettrico e magnetico

Nella zona di campo lontano, il campo elettromagnetico è approssimabile con onde piane in cui la direzione di propagazione è perpendicolare al fronte d’onda. Il campo elettrico e magnetico sono perpendicolari tra loro e perpendicolari alla direzione di propagazione. Essi oscillano in modo sinusoidale mantenendosi in fase l’uno rispetto all’altro (Figura 2.6).

Con una successione di spostamenti nello spazio e ritardi temporali, le perturbazioni del campo elettromagnetico si propagano nello spazio con una velocità che, seppure elevatissima, non è infinita. In altre parole, l’apparizione del campo EM a una certa distanza  $L$  dalla sorgente non è immediata, ma si manifesta lì dopo un certo ritardo  $\tau$ . Il rapporto fra la distanza  $L$  e il tempo  $\tau$  definisce la velocità di propagazione  $v$  del campo elettromagnetico. Il valore numerico di questa velocità è determinato dalla costante dielettrica  $\epsilon$  e dalla permeabilità magnetica  $\mu$  del mezzo, in cui l’onda EM si sta propagando, secondo la formula:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2.25)$$

Nel caso che la propagazione avvenga nello spazio vuoto, i valori di  $\epsilon$  e  $\mu$  valgono rispettivamente  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m e  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m. La velocità che si ottiene in questo caso è nota col nome di velocità della luce nel vuoto; essa è indicata comunemente col simbolo  $c$  e vale:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \quad (2.26)$$

ovvero  $2.998 \times 10^8$  m/sec; un valore estremamente elevato che, come afferma la teoria della relatività, non può essere superato dalla velocità di nessun'altra entità fisica (particella materiale o forma di energia).

Il piano individuato dalla direzione di propagazione e dal vettore  $\mathbf{E}$  si dice piano di polarizzazione. Se questo piano rimane immutato, l'onda è detta a polarizzazione lineare. Se invece il vettore  $\mathbf{E}$  ruota si dice che l'onda ha polarizzazione ellittica. La polarizzazione circolare è un caso particolare di polarizzazione ellittica in cui il modulo di  $\mathbf{E}$  rimane costante durante la rotazione.

Alla propagazione del campo elettromagnetico corrisponde un trasporto di energia elettromagnetica, che avviene nella stessa direzione e con la velocità dei fronti d'onda. La potenza per unità di superficie trasportata dall'onda è:

$$S = |\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*| \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.27)$$

Dato che  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{H}$ , in campo lontano, sono legati dalla relazione:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\eta} \hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{E} \quad (2.28)$$

dove  $\eta$  è l'impedenza d'onda, la densità di potenza si può anche esprimere in funzione del solo  $\mathbf{H}$  o del solo  $\mathbf{E}$ :

$$S = \eta H^2 = E^2 / \eta \quad (2.29)$$

A distanza dalla sorgente i campi elettromagnetici si distribuiscono su superfici sempre più ampie.

Il campo elettrico e il campo magnetico sono perpendicolari tra loro e seguono la seguente relazione:

$$|\mathbf{E}|/|\mathbf{H}| = \eta \quad (2.30)$$

La conservazione dell'energia comporta quindi che l'intensità dei campi diminuisca quando l'onda si allontana dalla sorgente. In altre parole al crescere della distanza  $r$ , la superficie dei fronti d'onda cresce proporzionalmente a  $r^2$  e  $S$  decresce come  $1/r^2$ . Tutto ciò è vero se ci troviamo in campo lontano. Avvicinandosi alla sorgente, i campi EM cambiano struttura e proprietà in maniera sostanziale. Invece della configurazione che avevamo nella zona di campo lontano, in cui campo elettrico e magnetico dipendevano l'uno dall'altro, qui i campi presentano una configurazione che è determinata dalla distribuzione di cariche e di correnti sulla sorgente, e questa distribuzione, a sua volta, dipende dalla geometria della sorgente, le proprietà elettriche dei suoi componenti e il tipo di collegamento fra sorgente e

generatore. Tali campi sono comunemente indicati con il nome di campi reattivi. La distanza critica cui avvengono i cambiamenti suddetti è dell'ordine della lunghezza d'onda  $\lambda$ . La transizione non è brusca ma graduale. Si può comunque affermare che la componente reattiva è quella senz'altro prevalente in punti che distano molto meno di una lunghezza d'onda (meno di  $0.1\lambda$ ) dalle cariche e dalle correnti da cui i campi hanno origine.

Per quanto riguarda il campo elettrico reattivo, le linee di forza non si richiudono in anelli intorno alle linee di campo magnetico, ma partono dalle cariche di un segno e terminano su quelle di segno opposto; inoltre l'intensità del campo varia nel tempo. Essa oscilla sostanzialmente in fase con la tensione del generatore; l'energia immagazzinata nei campi reattivi non abbandona la sorgente, cioè non viene irradiata, ma è emessa e riassorbita continuamente. L'emissione è massima quando il generatore raggiunge il suo massimo ed è completamente riassorbita un quarto di periodo dopo, quando la tensione del generatore passa dallo zero e i campi hanno intensità zero. Analogamente, il campo magnetico è localizzato intorno alle correnti che percorrono i vari elementi metallici che costituiscono il radiatore e le sue linee di forza si avvolgono in anelli attorno alle correnti. A causa del comportamento molto simile a quello dei campi statici (da cui differiscono praticamente solo perché la loro intensità oscilla nel tempo) i campi reattivi sono indicati anche con il termine di "campi quasi statici". Inoltre i campi reattivi possiedono alcune proprietà uniche rispetto ai campi statici, tra cui:

- Il campo reattivo è in sostanza confinato nei pressi della sorgente in un volume che si estende fino a distanze dell'ordine di frazioni di  $\lambda$  (usualmente  $\lambda/10$ ).
- A esso non è associata potenza irradiata e il suo mantenimento non richiede erogazione di potenza reale da parte del generatore. Solo se nel campo reattivo sono presenti oggetti capaci di assorbire energia, una certa potenza reale fluisce dal generatore a questi oggetti.
- Il campo elettrico e magnetico hanno in genere configurazioni molto complesse. Queste dipendono in maniera specifica dalla struttura geometrica ed elettrica dei conduttori che costituiscono la sorgente, secondo le modalità riassunte nei due punti seguenti.

- Il campo elettrico ha in ogni istante distribuzione spaziale e intensità uguali a quelle che avrebbe se l'insieme di conduttori che formano la sorgente fosse alimentato da un generatore elettrico d'intensità uguale al valore istantaneo del generatore effettivo. Le linee di campo elettrico partono dalle cariche positive e si richiudono sulle cariche negative. Il campo ha valori più elevati in prossimità dei conduttori su cui si ha maggiore densità di carica, e cioè in prossimità di spigoli, punte o zone a piccolo raggio di curvatura, e in special modo laddove conduttori con differenza di potenziale elevata si avvicinano fra loro.
- Il campo magnetico è concentrato essenzialmente in prossimità di conduttori su cui fluiscono correnti intense ed ha distribuzione simile a quella descritta nel caso di correnti costanti. Il campo decade rapidamente man mano che ci si allontana dai conduttori, specialmente se il conduttore di andata e quello di ritorno sono fra loro vicini.
- Nella regione di campo vicino, le ampiezze  $E$  e  $H$  non sono legate da un rapporto costante, né esiste una maniera semplice per dedurre una dall'altra. Pertanto, quando i campi sono entrambi presenti, è necessario procedere a una misura separata delle rispettive intensità e anche direzioni.

## 3. Reti Di Telefonia Mobile

---

L'innovazione introdotta dai sistemi radio mobili riguarda la possibilità di slegarsi dall'immobilità del telefono, avendo la possibilità di usufruire di servizi simili o analoghi a quelli offerti dalla rete fissa pur muovendosi liberamente su tutto il territorio. L'unico mezzo per accedere a un utente in movimento sono le onde radioelettriche. Come le onde radio viaggiano libere in uno spazio condiviso, così l'utente può comunicare muovendosi liberamente nei luoghi delle sue attività; la grande flessibilità della propagazione delle onde radio consente di raggiungere l'utente nelle condizioni più disparate inviandogli informazioni sempre più sicure, complesse e complete.

La trasmissione di un moto vibratorio per mezzo delle onde è alla base di molti fenomeni fisici. La velocità con cui si propaga l'onda dipende dalle caratteristiche del mezzo su cui essa viaggia. Poiché la velocità ha valore finito ne consegue un ritardo nell'azione dell'onda in funzione dello spazio percorso. Ciò è espresso dall'equazione di propagazione dell'onda  $y(t) = f(t - \Delta t)$ . Le onde sonore sono un esempio di onde meccaniche, in quanto prevedono lo spostamento di particelle materiali. In realtà tale fenomeno è solo apparente giacché le particelle non abbandonano la loro posizione ma vibrano attorno ad esse. Ciò non toglie che l'onda trasporta effettivamente energia, che passa da una particella in vibrazione a un'altra adiacente. Per quanto riguarda le onde elettromagnetiche, il loro moto ondulatorio non richiede alcun supporto fisico. Infatti, come già citato nel capitolo 2, un campo elettrico in variazione causa la nascita di un campo magnetico le cui linee di forza sono chiuse e concatenate con le linee di forza elettriche e viceversa. Le onde elettromagnetiche non necessitano, quindi, di un supporto materiale ma di un generico spazio libero che possieda caratteristiche dielettriche.

### 3.1 Trasmettitore e Ricevitore

Gli estremi del collegamento radio sono costituiti da apparati ricetrasmittenti. Il trasmettitore deve essere in grado di generare onde radio e di sovrapporre a esse l'informazione da trasmettere. Al trasmettitore si produce un'oscillazione radioelettrica, chiamata portante, caratterizzata da una determinata frequenza e da



una sufficiente energia (potenza) che ne determinino la capacità di propagarsi coprendo la distanza che lo separa dal ricevitore. Sulla portante viene poi applicata una modulazione, in modo che il segnale rappresentante l'informazione, ovvero la modulante, si sovrapponga alla portante. La modulante è rappresentata da un segnale con spettro complesso, pertanto necessita di una banda minima di frequenza a uso esclusivo. La portante alimenta un'antenna che rappresenta l'interfaccia con lo spazio circostante: è qui che l'energia assume la configurazione fisica di campo elettromagnetico. Lo spettro del segnale emesso sarà costituito, oltre che dalla portante, anche da un insieme di righe che rappresentano l'informazione e che costituiscono le bande laterali. Nel caso delle modulazioni numeriche, un requisito fondamentale è di generare uno spettro quanto più possibile stretto e compatto; capace cioè di non andare a interferire con lo spettro di una possibile altra portante.

Il ricevitore deve essere in grado di captare il segnale elettromagnetico ed estrarne l'informazione; ciò non è sempre un compito facile in quanto l'antenna in realtà "sente" una moltitudine di onde radio e deve essere in grado di selezionare il segnale indirizzato al ricevitore. L'operazione di filtraggio che consente di utilizzare una finestra di ascolto solo sul canale che porta l'informazione desiderata viene definita selettività. In questo modo si lascia transitare solo e per intero lo spettro dell'onda modulata, eliminando drasticamente tutto il resto. Oltre a dover selezionare il canale corretto, il ricevitore deve controllare automaticamente il guadagno in modo da compensare la grande variabilità del segnale ricevuto ed essere in grado di demodulare il segnale in modo efficiente e senza distorsione.

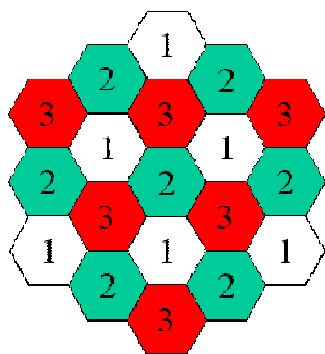
Per quanto riguarda la telefonia mobile, le antenne più utilizzate sono le antenne a schiera, in quanto conviene l'utilizzo di antenne non eccessivamente direttive, poiché data l'aleatorietà della posizione relativa delle antenne, il trasmettitore dovrà essere in grado di raggiungere il ricevitore ovunque si trovi, mentre il ricevitore dovrà essere in grado di ricevere il segnale da qualunque direzione provenga.

Appare pertanto evidente l'importanza di disporre di antenne dalle caratteristiche radiative anche molto diverse; uno dei metodi più utilizzati per sagomare opportunamente il diagramma di radiazione consiste nella realizzazione di antenne complesse "assemblando" antenne più semplici secondo determinate

configurazioni geometriche ed elettriche. Il campo irradiato dall'antenna complessiva (detta Array o Schiera) è dato ovviamente dalla sovrapposizione dei campi irradiati dai singoli elementi (solitamente fra loro uguali, pur non essendo necessario); per ottenere antenne molto direttive, occorre che tali campi interferiscano costruttivamente nelle direzioni desiderate e distruttivamente in tutte le altre. Il singolo elemento utilizzato per la costruzione di tali schiere è solitamente un dipolo.

### 3.2 Copertura Territoriale: Celle

Per poter soddisfare tutte le richieste di chiamata da parte degli utenti, i



trasmettitori dei segnali di telefonia devono raggiungere tutto il territorio in modo da garantire la copertura pressoché ovunque. Ogni antenna, detta SRB (Stazione Radio Base), può emettere un segnale a una potenza massima che non può essere infinita; per questo motivo il territorio è suddiviso in porzioni più

**Figura 3.2.1 – Copertura a celle** piccole dette celle (vedi Figura 3.2.1), la cui estensione dipende dalla potenza e sensibilità della SRB e dagli ostacoli presenti. Al di là dei confini virtuali della cella si fa in modo che esista una nuova cella generata da una successiva SRB, in modo che il collegamento non si perda. Lo sconfinamento da una cella alla successiva, che avviene quando un utente in conversazione si muove sul territorio, pone alcuni problemi sul trattamento di quella chiamata. La probabilità che si abbia uno sconfinamento aumenta in funzione della durata della conversazione e della dimensione della cella. In ambito urbano, dove le celle hanno solitamente un diametro minore, gli utenti cambiano cella anche più volte nell'arco di una conversazione. Per questo motivo è necessario individuare una procedura, detta Handover, in grado di gestire questi passaggi tra celle. La funzione di Handover prevede il monitoraggio continuo della qualità della conversazione, il degradamento della quale viene interpretato come sconfinamento dalla cella; in tal caso si attiva una serie di operazioni, che iniziano con la ricerca di un canale libero nella cella di destinazione e terminano con la commutazione della chiamata sul nuovo canale individuato. Per poter raggiungere un qualsiasi utente al quale sia indirizzata una chiamata, è necessario che la rete conosca in ogni istante la

posizione esatta di tutti gli utenti. A tal fine il territorio è diviso in aree di chiamata, che vengono considerate le unità territoriali minime per la localizzazione di un utente mobile, dette location area (LA). L'identificativo della LA viene inserito nell'apposito registro, VLR (Visitor Location Register), che è accessibile a tutta la rete; in tal modo la rete ha a disposizione elementi sufficienti per indirizzare la chiamata, inoltrata in modalità broadcasting nella LA che corrisponde alla localizzazione dell'utente. Ovviamente gli spostamenti dell'apparato mobile modificano i parametri della sua localizzazione e se cambia la sua LA è necessaria l'attuazione di una procedura di updating, in modo da aggiornate automaticamente e in tempo reale l'identificativo della LA associata. La rete possiede anche uno o più HLR (Home Location Register), banche dati in cui sono stabilmente registrati identità e profilo di ogni utente; fra questi vi è anche l'identificativo del MSC/VLR (Mobile Switching Center / Visitor Location Register) che ha temporaneamente in carico l'utente. Tale dato è estremamente importante nel caso di chiamata destinata a tale apparato mobile. Sia la procedura di handover che quella di localizzazione richiedono che preventivamente ogni apparato sia riconosciuto dalla rete; deve quindi essere presente una memoria nella quale siano presenti i dati degli utenti autorizzati a esercitare azioni nella rete stessa.

### **3.3 Rete Radiomobile**

Da quanto visto, è chiaro che al di là delle funzioni puramente radioelettriche della rete radiomobile, si richiede al sistema un'intensa attività elaborativa, che si manifesta in una serie di funzioni e procedure supportate da elaboratori e banche dati geograficamente distribuiti. La parte fissa della rete radiomobile realizza funzioni di elaborazione, commutazione e database raggruppate in siti detti MSC connessi fra loro a maglia, che si aggiornano reciprocamente sulla localizzazione degli utenti e ne realizzano l'interconnessione; alcuni di questi possiedono un'interfaccia verso la rete fissa PSTN (Public Switched Telephone Network). I canali radio attivi sull'interfaccia radio di una cella possono essere distinti in canali di controllo e canali di traffico. Ciascuna cella solitamente possiede un canale di controllo e un numero di canali di traffico sufficiente a smaltire le telefonate che la cella può servire. Un MSC è generalmente realizzato con un sistema di commutazione per telefonia fissa opportunamente modificato e ampliato, sia nel

software sia nell'hardware. L'applicazione radiomobile necessita di varie funzioni speciali, non richieste dalla rete fissa, tra cui:

- gestione delle procedure di instaurazione del collegamento con il terminale mobile (call set up);
- disconnessione del collegamento in caso di bassa qualità del segnale;
- gestione delle procedure di passaggio da una cella all'altra (handover);
- gestione delle banche dati relative ai profili di utente (HLR) e alla loro localizzazione (VLR);
- procedura di roaming per utenti entranti o uscenti da altre aree MSC.

HLR e VLR sono registri dedicati all'identificazione e la localizzazione degli utenti nella rete. HLR consiste in un database in cui viene inserito il profilo dell'utente, comprendente i suoi identificativi, le chiavi d'accesso, le prestazioni del servizio e altro ancora. VLR consiste in un database in cui vengono memorizzate temporaneamente le informazioni necessarie per la localizzazione.

Una SRB viene progettata per soddisfare un numero di richieste di connessione molto minore rispetto al numero di utenti possibili che possono richiedere una connessione. Ciò è possibile in quanto non succede mai che tutti gli utenti presenti in una cella richiedano un servizio contemporaneamente. In alcuni casi particolari, come l'ora di massimo traffico o un evento particolare, gli utenti che possono richiedere il servizio aumentano sensibilmente e può pertanto presentarsi una probabilità di perdita, ovvero le vie d'interconnessione offerte non sono sufficienti a soddisfare le richieste d'accesso, le ultime delle quali vengono rifiutate. La misura del traffico telefonico è data dal rapporto tra il volume di traffico e il tempo di osservazione. Esistono strumenti rilevatori di traffico che registrano il numero medio d'impegni nell'arco di un'ora e la durata media di un impegno. L'unità di misura dell'intensità di traffico è l'Erlang, un numero che rappresenta la media degli organi di interconnessione contemporaneamente impegnati durante il periodo di osservazione. Il grado di perdita è il parametro fondamentale per definire il numero massimo di utenti e quindi la capacità del sistema. Come capacità del sistema si intende genericamente il massimo numero di utenti che il sistema stesso è in grado di gestire, con un prefissato grado di perdita.

### 3.4 Progettazione Di Una Cella

Per quanto riguarda la distribuzione dei segnali radio e televisivi sul territorio, bisogna considerare che una trasmissione di tipo diffusivo può coprire agevolmente un territorio assai esteso impiegando poche stazioni trasmettenti poste in siti dominanti, che utilizzino trasmettitori con potenze elevate e con sistemi d'antenna aventi diagrammi di radiazione adeguati ai contorni dell'area geografica il cui servizio è atteso. Nei primi sistemi radiomobili italiani i siti delle Stazioni Radio Base venivano scelti con criteri assai simili, in cui l'area di copertura veniva rilevata sperimentalmente individuando i confini laddove la qualità della conversazione decadeva sotto prestabiliti valori a causa dell'attenuazione del collegamento. Tale tecnica è presto stata sostituita dalla copertura cellulare in quanto non consentiva sufficienti valori di efficienza spettrale. Con la tecnica della copertura cellulare il territorio viene frammentato in un numero elevato di aree elementari dette celle. La tipica forma adottata nelle reti radiomobili prevede celle di forma esagonale adiacenti tra loro; nella realtà le dimensioni delle celle non sono regolari e uniformi poiché dipendono da numerosi fattori tra cui la presenza di ostacoli e le caratteristiche radioelettriche degli apparati (potenza del trasmettitore e sensibilità del ricevitore). Ogni cella è originata da una

SRB adeguatamente dimensionata per offrire la copertura voluta; nel caso più semplice l'antenna della SRB possiede un diagramma di radiazione omnidirezionale ed è posta al centro della cella. La banda a RF

assegnata al servizio radiomobile di un determinato gestore è suddivisa in canali radio, il cui passo di canalizzazione dipende dalla larghezza dello spettro dopo la modulazione. Agli M canali di un gestore corrispondono M portanti, suddivise in N gruppi, in modo che a ogni gruppo corrisponda un numero di canali radio S tali per cui  $S = M/N$ . A ogni cella è assegnato un gruppo  $N_i$  di canali; ciò significa che la SRB avrà S trasmettitori ciascuno operante su una delle frequenze portanti appartenenti al gruppo assegnato. N celle esauriscono M canali disponibili per il sistema. L'insieme delle N celle adiacenti in cui si utilizzano tutti gli M canali costituisce il raggruppamento elementare detto cluster (vedi Figura 3.4.1), che si ripete con regolarità geometrica.

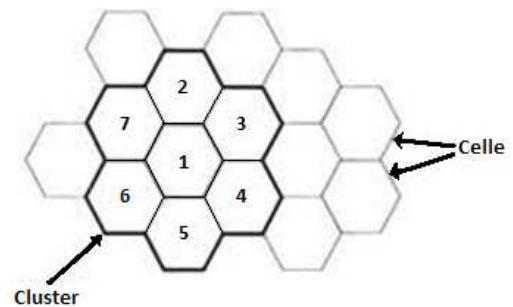


Figura 3.4.1 - rappresentazione di un cluster

Un cluster è riutilizzato molteplici volte sul territorio, e con ciò si applica il principio del riuso delle frequenze, mediante il quale uno stesso canale può essere utilizzato contemporaneamente da un numero elevato di utenti che si trovano in cluster diversi. A fronte di tale vantaggio si crea però il problema dell'interferenza cocanale; tale problema è affrontato in fase di progetto scegliendo la configurazione del cluster, il dimensionamento delle celle e i parametri della SRB in modo da non superare un valore di soglia minimo del rapporto tra segnale utile (C) e segnale interferente complessivo sopportato dal sistema (I): C/I.

L'energia di un'onda elettromagnetica decresce all'aumentare della distanza dall'antenna trasmittente: la determinazione della distanza D tra due celle che utilizzano la stessa frequenza è fondamentale per la verifica del rapporto C/I. Anche il raggio R della cella è importante perché dipende dalla potenza effettivamente irradiata dall'antenna. Quanto più elevato sarà il numero di celle che compongono un cluster, tanto più il raggio R potrà essere piccolo rispetto a D, detta distanza di riuso. Tali parametri consentono di calcolare il rapporto C/I e viceversa mediante la seguente relazione (D/R è detto rapporto di riuso cocanale):

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad (3.1)$$

dove N è la dimensione del cluster. Il rapporto di riuso condiziona direttamente anche la capacità del sistema: quanto più esso è piccolo, tanto minore sarà il numero N di celle che compongono il cluster, ovvero ogni cella avrà a disposizione un numero di canali più elevato e potrà svolgere più traffico; per contro sarà maggiore C/I il che significa maggiore interferenza e peggiore qualità.

Un'importante caratteristica che contraddistingue i sistemi moderni consiste nella capacità di concentrare le risorse della rete in quelle parti del territorio dove è maggiore la richiesta dell'utenza e comunque nella capacità di adattarsi dinamicamente alla crescita dell'utenza. Sono emerse quindi tre soluzioni importanti, il sectoring, il tilting e lo splitting. La tecnica di sectoring prevede una copertura settoriale del territorio realizzata con antenne direttive e consente di aumentare il riuso dei canali. Una modalità molto utilizzata per implementare il sectoring consiste nel utilizzare antenne direttive nella SRB posta al centro della cella; per esempio si creeranno tre settori utilizzando tre antenne con apertura del lobo orizzontale pari a 120°, oppure sei settori utilizzando antenne con apertura

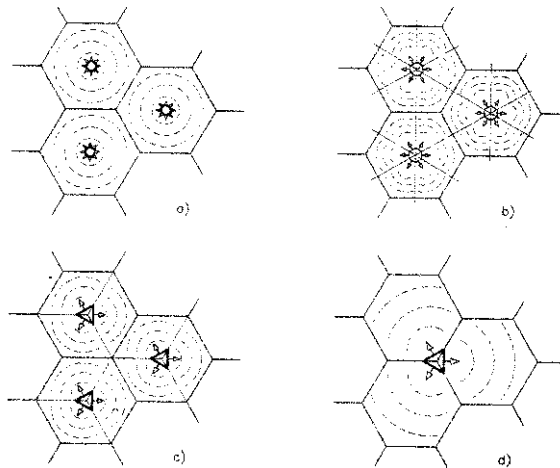


Figura 3.4.2 - Esempi di coperture

pari a  $60^\circ$ . Un'altra possibile soluzione è di spostare la posizione della SRB, dislocandola dal centro della cella a un suo vertice; tale struttura, denominata "corner excited" o "clover" impiega nelle SRB antenne direttive con apertura  $120^\circ$  poste sul vertice comune di

tre celle esagonali. Tale configurazione, oltre a minimizzare le interferenze rende minimo il numero di SRB necessarie per ottenere la copertura del territorio: con un'unica Stazione Radio Base vengono, infatti, coperte tre celle. Le antenne direttive presentano un elevato guadagno che consente di ridurre la potenza emessa. Ciò è possibile poiché il diagramma d'irradiazione è più ampio sul piano verticale rispetto a quello sul piano orizzontale. Nella Figura 3.4.2 sono indicati degli esempi di copertura cellulare ottenute con antenne omnidirezionali al centro della cella (Figura 3.4.2a), con antenne settoriali a  $60^\circ$ , al centro della cella (Figura 3.4.2b), con antenne settoriali a  $120^\circ$  al centro della cella (Figura 3.4.2c) oppure con antenne direttive a  $120^\circ$  poste alla confluenza di tre celle contigue (Figura 3.4.2d). Sorgono però alcuni problemi: l'energia è prevalentemente emessa verso l'orizzonte, parallelamente al terreno, e quindi potrebbe trasportare un segnale interferente anche a grosse distanze, e in tal modo si crea una carenza d'irradiazione nella zona sottostante l'antenna. Questi problemi vengono facilmente risolti grazie alla tecnica di tilting, ovvero inclinando fisicamente il pannello dell'antenna verso il basso di alcuni gradi in modo che punti verso il terreno e consentendo quindi di definire con più precisione il limite della cella. In caso di aumento del traffico e in ogni modo per avere un riuso maggiore delle frequenze è possibile applicare la tecnica di cell splitting, ovvero suddividendo le celle originali in un numero maggiore di celle.

Diverse esigenze di copertura possono essere risolte con celle di dimensione molto diversa. Per esempio le celle possono venir divise in macrocelle, ovvero celle a raggio compreso tra 1 km e qualche decina di km, small cells, con raggio compreso

tra 0,3 e 3 km, microcelle con raggio tra 100 e 500 metri e infine le picocelle realizzate all'interno di strutture edili.

### 3.5 Tecniche Di Accesso Multiplo

Con il passare del tempo e la maggiore diffusione dei telefoni cellulari, si è posto il problema della limitatezza delle risorse a radiofrequenza. Per quanto si cerchi di liberare bande di frequenza sempre più ampie a favore dei sistemi radiomobili, occorre comunque individuare anche altre soluzioni ai fini di un'estensione del servizio. Sicuramente, come visto in precedenza, una soluzione possibile consiste in un'attenta ed efficiente strategia di copertura cellulare. Altre possibili soluzioni per incrementare l'efficienza spettrale di un sistema radiomobile sono possibili, e tra queste le più utilizzate sono le tecniche di accesso multiplo, di codifica vocale e di modulazione.

Le tecniche di accesso multiplo sono utilizzate per la gestione dell'accesso alla risorsa radio e la sua condivisione da parte di più utenti. Il principio su cui si basano tali tecniche è che ogni singola risorsa è disponibile per qualunque utente della rete, anche se poi, una volta assegnata, rimane a totale disposizione di quel utente per tutta la durata richiesta. Esistono quindi più risorse disponibili sul territorio; qualora un utente voglia connettersi alla rete, fa richiesta mediante l'apposita procedura e la rete gli assegnerà una risorsa che in quel momento è disponibile. Esisteranno, quindi, limitazioni di accesso in funzione del traffico, in base quindi all'ora, alla durata media di una telefonata

in quella precisa cella e pertanto bisogna tenerne conto nella gestione degli accessi multipli. Com'è facile intuire, è indispensabile che la rete conosca in ogni momento lo stato di occupazione delle sue risorse, sia in grado di gestire eventuali conflitti che possono nascere da richieste contemporanee di accesso da parte

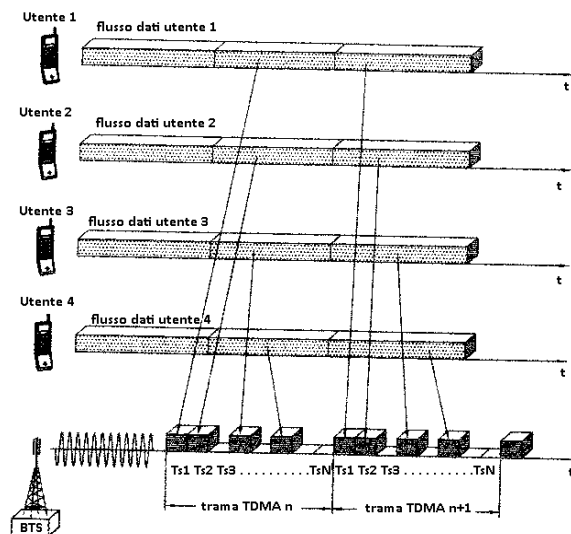


Figura 3.5.1 - Funzionamento della tecnica TDMA di



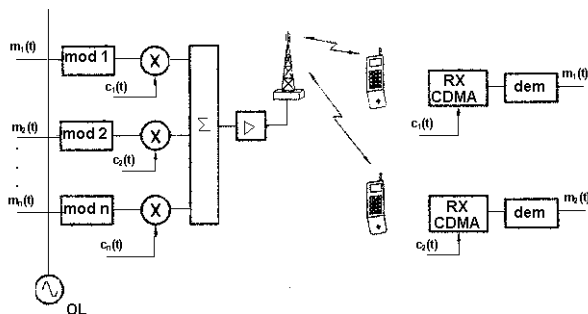
più utenti, e offrire il miglior accesso compatibilmente con le risorse disponibili in quella cella. Le tecniche di accesso multiplo possono essere suddivise in tre grandi famiglie, FDMA, ovvero Frequency Division Multiple Access, ovvero moltiplicazione in frequenza, TDMA, Time Division Multiple Access, moltiplicazione di tempo e infine la moltiplicazione di codice, CDMA.

Per quanto riguarda la telefonia cellulare, almeno fino alla seconda generazione, la tecnica sicuramente più utilizzata è la SCPC-FDMA, acronimo di “Single Channel Per Carrier – Frequency Division Multiple Access” e indica un metodo che assegna a ogni utente un canale a utilizzo esclusivo per l'intera durata della conversazione, scegliendolo tra quelli messi a disposizione dalla SRB.

Nel caso di segnali modulanti di tipo numerico, è utilizzata anche la possibilità di segmentazione temporale per realizzare una condivisione delle risorse radio nel dominio temporale. Si tratta della tecnica TDMA, il cui funzionamento è mostrato nella Figura 3.5.1, nella quale gli utenti accedono contemporaneamente al sistema utilizzando uno stesso canale ma sono distinti dalla diversità di tempo in cui parti ben definite della loro emissione sono attive all'interno dello stesso canale. In pratica, il segnale numerico è suddiviso in intervalli temporali consecutivi, tutti della stessa durata, chiamati time-slot, che si ripetono ciclicamente. Un ciclo completo forma una trama che si ripete anch'essa con regolarità costituendo la base per la formazione di supertrame o ipertrame secondo le necessità di organizzazione dei dati da trasmettere. Dato che la struttura dei dati da trasmettere è interamente digitale, la trasmissione viene suddivisa in blocchi di bit detti burst, aventi dimensione idonea a occupare un time-slot. Con questa tecnica, quindi, una sola portante radio servirà un certo numero di utenti e, in particolare, il sistema GSM mette a disposizione 8 time-slot per trama, ovvero su ogni portante possono comunicare contemporaneamente fino a 8 utenti distinti. All'utente che chiede l'accesso al sistema viene assegnato un time-slot, quando viene il suo turno trasmette il burst di dati e poi rimane in silenzio fino al suo nuovo turno che avverrà nella trama successiva. In tal modo, l'apparato mobile non scambia informazioni con la rete in continuità, ma solo nel tempo assegnato. L'utente finale riceverà ciclicamente un burst per la durata del time-slot assegnato, una volta per trama, sulla portante del canale radio con cui è connesso alla rete. Per il resto del tempo

entrambi i dispositivi mobili sono potenzialmente inattivi, anche se in realtà sono in grado di utilizzare tali intervalli d'inattività per compiere altre funzioni.

Altra possibile soluzione per moltiplicare segnali numerici è il metodo CDMA (Code



**Figura 3.5.2 - Funzionamento della tecnica CDMA**

Division Multiple Access), descritto nella 3.5.2, una tecnica di accesso multiplo che si differenzia dalle altre perché consente agli utenti di trasmettere non solo sulla stessa frequenza, ma anche nello stesso tempo. La separazione tra gli utenti si ottiene assegnando a ciascuno un codice diverso, che codifica in modo univoco l'informazione di quel utente specifico, in modo da distinguerla da tutte le altre. La tecnica CDMA deriva dalle tecniche a diffusione di spettro, spectrum spreading, che consistono nell'espansione dell'energia spettrale su una banda molto più estesa di quella che sarebbe prodotta dallo spettro del segnale in banda base. Questo allargamento si ottiene applicando alla portante già modulata un'ulteriore interazione con un codice, rappresentato da una sequenza pseudo casuale; grazie a questo "mascheramento" la connessione radio presenta grande resistenza ai disturbi e particolari caratteristiche di criptazione; il codice, che realizza l'effetto di espansione dello spettro, rappresenta anche una chiave di segretezza, infatti, solo la sua conoscenza consente di ricostruire l'informazione in ricezione. Usando questa tecnica, quindi, la distinzione tra N canali è operata grazie all'ortogonalità fra N le funzioni accedenti allo stesso trasmettitore; sulla stessa portante possono coesistere N modulazioni contemporanee trasmesse su spettro espanso, che ogni ricevitore decodificherà sulla base della conoscenza della rispettiva sequenza pseudocasuale correlata con il canale desiderato. La decorrelazione, detta anche ortogonalità, tra i codici consente di estrarre il segnale d'informazione annullando l'effetto delle reciproche interferenze che potrebbero rappresentare il limite di questa tecnica. In effetti, sulla stessa portante e senza distinzione di tempo il CDMA gestisce N flussi informativi che potrebbero altrimenti creare un'enorme interferenza reciproca. Nella realtà le distorsioni e i disturbi subiti dai segnali

degradano le condizioni di ortogonalità e ciò rappresenta una limitazione al numero di canali sovrapponibili. Il limite di capacità del sistema è, quindi, dato dal peggioramento di qualità dovuto al livello d'interferenza residua dopo l'operazione di despreading, ovvero di ricostruzione dell'informazione. A priori non esiste una soglia massima al numero di utenti sulla portante radio; ogni volta che viene richiesto un nuovo accesso, il servizio può sempre essere concesso, con la limitazione di un degrado della qualità di tutti gli altri utenti attivi. Il processo si può ripetere fino a quando il livello della qualità scenderà sotto a un prestabilito valore di soglia. E' comunque possibile, in condizione di emergenza, accettare per un tempo limitato un numero di utenti superiori a quello stabilito attraverso i criteri di qualità. Ciò fa sì che il CDMA possieda un degradamento di qualità graduale, detto anche "*soft degradation*". Sicuramente questa tecnica va anche a creare conseguenze sulla potenza. Infatti, l'uso di una potenza esagerata rispetto al minimo necessario realizza un brusco impoverimento della qualità globale, con il risultato di emarginare gli utenti più sfavoriti in termini di qualità e in definitiva provocando un effetto di riduzione della capacità della cella. L'eccesso di potenza potrebbe verificarsi quando l'apparato mobile è molto vicino alla SRB. Se non si prendessero provvedimenti, tutti i segnali degli altri utenti che giungono attenuati a causa della maggiore distanza non potrebbero essere ricevuti correttamente. E perciò necessario che tale problema sia gestito dalla rete in modo che tutti i segnali giungano allo stesso livello di potenza, per esempio mediante l'utilizzo della funzione di power control. Altra caratteristica saliente del CDMA è il fattore di riuso pari a 1: consente quindi l'impiego dello stesso canale radio in tutte le celle e i settori, anche adiacenti, di un sistema cellulare, in quanto l'isolamento tra i canali è garantito dall'ortogonalità dei codici anche tra ricetrasmittenti diversi, purché siano tenuti sincronizzati come frequenza e temporizzazione della trama.

### **3.6 Tecniche Di Codifica**

La comunicazione si fonda ormai esclusivamente sul trattamento numerico dei segnali: tutte le informazioni che vengono scambiate nella rete sono rappresentate da flussi di simboli numerici. Tra queste informazioni, nel caso di telefonia cellulare, c'è sicuramente anche la voce dell'utente, ovvero un segnale analogico, che deve quindi essere trasformata in un segnale numerico. Tale operazione non è una novità

per la telefonia che ormai da tempo utilizza tecniche di codifica vocale come la PCM, che con metodi semplici effettua campionamento, compressione e codifica del segnale analogico raccolto dal microfono, garantendo prestazioni di elevata qualità per quanto riguarda la comprensibilità e riconoscibilità del parlato. Tuttavia, il lato debole della PCM è che genera un segnale numerico di 64 Kb/s, il cui spettro risulta troppo largo per una modulazione numerica di un sistema radiomobile. Esistono altre tecniche che sono state messe a punto al fine di restringere la banda necessaria per trasmettere la voce umana, anche se la qualità della voce ne risente. I codificatori PCM, citati in precedenza, codificano ogni campione indipendentemente dagli altri; per quanto riguarda la trasmissione telefonica è risaputo che il segnale vocale è abbondantemente ridondante e con variazioni piuttosto lente. Esistono pertanto ampi margini per ridurre il bit-rate di un segnale vocale trattato con PCM; è, infatti, possibile introdurre metodi in grado di riconoscere le ridondanze e di riuscire a predire (data la stazionarietà del segnale) il campione corrente da una combinazione pesata dei campioni precedenti. Ciò comporta un rilevante vantaggio poiché il segnale numerico ottenuto dal codificatore non corrisponde alla codifica diretta del segnale d'ingresso ma alla codifica della differenza tra il segnale d'ingresso e una sua stima o predizione e tale segnale differenza può essere contenuto in una dinamica nettamente inferiore rispetto a quella del segnale PCM; ciò rende possibile ridurre il numero di bit necessari per codificare i campioni, riducendo il bit-rate. Tale tecnica prende il nome di DPCM (Differential Pulse Code Modulation) e riduce drasticamente la ridondanza in quanto trasmette solo le variazioni del contenuto informativo del segnale fonico.

Per quanto riguarda la telefonia cellulare, viene utilizzato, però, un altro tipo di codificatore in grado di migliorare la riduzione della ridondanza analizzando i meccanismi con cui la voce viene generata e ricavando modelli che ne realizzino la sintesi. Tale codificatore utilizza la tecnica RPE-LPC (Regular Pulse Excitation / Linear Predictive Coding) che consente di avere una qualità non troppo inferiore a quella offerta dalla codifica PCM ma sopporta un tasso di errore sulla tratta radio inferiore a  $10^{-2}$  e un ritardo di trasmissione inferiore a 65ms. La tecnica RPE-LPC analizza l'involuppo della voce nel dominio del tempo e della frequenza e da tale analisi ricava dei parametri che verranno usati per sintetizzare la voce, ovvero ricostruirla

al ricevitore. Il segnale vocale viene generato dalle corde vocali in modo all'incirca periodico e la frequenza fondamentale viene poi sagomata dagli organi esterni. Un modello che sia in grado di approssimarlo prevede un treno d'impulsi equispaziati sagomato da un filtro di sintesi con risposta in frequenza tale da riprodurre l'involuppo reale dello spettro del segnale vocale. Per rendere possibile questa modalità di ricostruzione della voce il processo di codifica deve analizzare la voce ed estrarne i criteri di frequenza fondamentale, detta sequenza di eccitazione (tecnica RPE) e di sagomatura (LPC). Dato che la voce, come già detto, ha un andamento che consente di considerarla stazionaria entro intervalli di tempo abbastanza brevi, ogni 20 ms il segnale al trasmettitore viene analizzato estraendone i parametri del filtro di sintesi e le correlazioni tra i segmenti adiacenti che vengono inviati al ricevitore che li utilizzerà per eccitare il filtro di sintesi e riottenere il campione vocale. Per far sì che la ricostruzione non risulti troppo grossolana, il trasmettitore realizza anche il processo di ricostruzione del campione proprio come farebbe il ricevitore e lo confronta con il campione vero: facendone la differenza ottiene un segnale residuo, con caratteristiche più stabili del segnale originale e quindi quantizzabile in modo più efficiente. Tale segnale residuo è composto da rumore bianco e un segnale periodico con frequenza molto bassa che corrisponde al periodo della frequenza fondamentale. Tale informazione viene quindi codificata come sequenza di eccitazione e inviata assieme agli altri parametri già citati. Frammenti del parlato possono presentare correlazioni tra campioni adiacenti; nel codificatore è perciò presente la funzione di predizione a lungo termine che esamina la correlazione a lungo termine dei campioni, riducendo la quantità di bit necessari per ricostruire i parametri quando sono tra loro correlati.

### 3.7 Tecniche Di Modulazione

L'ultima modalità utilizzata per incrementare l'efficienza spettrale di un sistema radiomobile riguarda le tecniche di modulazione. Una modulazione per essere considerata ottima dal punto di vista delle trasmissioni telefoniche dovrebbe possedere le caratteristiche seguenti:

- non dovrebbe agire sull'ampiezza della portante: esistono tipi di modulazioni numeriche in cui il segnale modulante va a imprimersi non solo sull'argomento ma anche sul modulo della portante, e ciò introduce

distorsioni di ampiezza che causano allargamenti dello spettro e la presenza dell'interferenza intersimbolica (ISI);

- deve produrre un segnale modulato con inviluppo ad ampiezza costante;
- deve generare una portante a radiofrequenza con caratteristiche spettrali tali da minimizzare l'interferenza sui canali adiacenti.

Una modulazione molto utilizzata è la PSK (Phase Shift Keying) in cui ai due possibili livelli modulanti di un segnale binario vengono assegnati rispettivamente due livelli di fase sulla portante da trasmettere. Una sua evoluzione è la 4PSK o 4QAM (Quadrature Amplitude Modulation) molto utilizzata nei ponti radio e per la tecnologia satellitare. Rappresenta un caso di modulazione su due portanti in quadratura ottenute da un unico oscillatore locale sfasandone opportunamente le uscite. Le due portanti sono modulate, con una PSK, con due sequenze dati  $m_I$  e  $m_Q$  ottenute dal segnale  $m$  con una conversione serie/parallelo tale da creare coppie di bit che a ogni istante vanno a modulare contemporaneamente le due portanti in quadratura. Il segnale modulato è ottenuto sommando linearmente le due portanti; è come se avessimo due canali indipendenti con la stessa portante; essi hanno, infatti, una fase reciproca di  $90^\circ$  che consente ai due canali di coesistere senza disturbarsi reciprocamente. La 4PSK consente quindi un risparmio di banda perché moltiplicando per due i possibili stati della portante dimezza la velocità di simbolo e di conseguenza anche lo spettro dell'onda modulata. Un ulteriore vantaggio è che questa modulazione è robusta nei confronti di disturbi e interferenze ma non offre una semplicità circuitale né un'elevata compattezza spettrale, causata principalmente dalle brusche transizioni di fase.

Un'altra famiglia di modulazioni, le CPM (Continuous Phase Modulation), possiede la positiva caratteristica di far variare la fase solo tra posizioni angolari adiacenti, e associa il simbolo da trasmettere non al valore assoluto di fase ma a un valore relativo, una variazione nota della fase della portante. E' in pratica una modulazione con memoria, in cui le variazioni di fase introdotte dal nuovo simbolo tengono conto della posizione acquisita nel tempo di simbolo precedente.

Tra le numerose modulazioni esistenti, la tecnologia GSM utilizza la GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying), che deriva dalla più semplice FSK (Frequency Shift Keying), una modulazione che offre inviluppo ad ampiezza costante in quanto l'ampiezza istantanea del segnale modulate incide solo sulla frequenza istantanea della

portante. E' una modulazione numerica di frequenza in cui i due simboli trasmessi definiscono una prefissata deviazione di frequenza simmetrica rispetto alla portante. Il parametro che definisce la profondità della modulazione, detto indice di modulazione  $m$ , dipende dalla deviazione di frequenza  $\Delta f$  e dal bit rate  $Br$  dei simboli in formato NRZ secondo la formula  $m = \Delta f / 0.5 Br$ .

Un'interessante estensione della FSK si può avere notando che al salto di frequenza imposto dalla modulazione corrisponderà un determinato salto di fase. Tale condizione si raggiunge assegnando un valore di indice di modulazione pari a 0.5; infatti, un salto di  $90^\circ$  si ottiene per  $\Delta f = 0.25 Br$  e quindi  $M = \Delta f / 0.5 Br = 0.25 Br / 0.5 Br = 0.5$ . Quindi adattando la sensibilità del modulatore a questa condizione si otterrà in uscita dal modulatore FSK una modulazione PSK. Tale estensione si chiama MSK, ovvero Minimum Shift Keying, un modulatore che utilizza il minimo valore possibile di deviazione capace di ottenere come effetto l'ortogonalità tra i due simboli trasmessi. La MSK è una modulazione a memoria o differenziale, capace di modificare la fase con riferimento alla posizione assunta dal vettore nel tempo di simbolo precedente. Tale modulazione ha diverse buone proprietà, tra cui inviluppo costante, banda sufficientemente stretta e possibilità di rivelazione coerente. Tuttavia l'estensione dei suoi lobi secondari determina un'interferenza troppo elevata sui canali adiacenti.

Per risolvere tale problema è stata creata la modulazione GMSK, dove la G sta per "Gaussian", che consente di migliorare lo spettro ottenuto dalla MSK inserendo un filtro passa basso di premodulazione. Tale filtro è un passa-basso avente funzione di trasferimento di forma gaussiana alimentato con la sequenza NRZ cui segue un modulatore FSK, costituito da un oscillatore controllato in tensione (VCO) con indice di modulazione pari a 0.5. Il fatto che il VCO venga alimentato con forme d'onda non più rettangolari ma smussate dal filtro evita il problema dei bruschi salti di  $90^\circ$  nella fase della portante e, anzi, accompagna gradualmente lo spostamento di fase tra i due estremi del campo di variazione. Ciò offre il vantaggio di rendere compatto lo spettro e ridurre l'interferenza sui canali adiacenti. Ovviamente è di grande importanza la scelta della banda passante del filtro gaussiano: il parametro utilizzato è la banda normalizzata  $B$  risultante dal prodotto della banda passante a 3 dB per il tempo di bit. Si tratta, cioè, della banda passante normalizzata rispetto all'intervallo di segnalazione  $T$ . In funzione di  $B$ , la risposta all'impulso del filtro

gaussiano varia da un rettangolo perfetto di area unitaria nel tempo di bit ( $B = \infty$ ) a una forma gaussiana, sempre di area unitaria, ma con forma a campana, ovvero ristretta sul picco e allargata alla base. Tale allargamento della base dell'impulso introduce un'interferenza intersimbolica che può essere controllata gestendo il parametro  $B$ . Il parametro tipico scelto per una modulazione GMSK è  $B=0.3$ .

### 3.8 Multipath e altri disturbi del segnale

Come in precedenza spiegato, l'ambiente ideale per una trasmissione radio è lo spazio libero, dove non esistono ostacoli né distorsioni. Risulta facile immaginare che sulla terra tale condizione non occorre mai, e per tale motivo le onde si propagano in un ambiente con condizioni pessime di propagazione. Tali fattori non devono però interessare l'utente finale che esige una qualità ottima, sia per quanto riguarda le comunicazioni vocali, che la sicurezza dei dati trasmessi. Il progetto di una rete radiomobile deve, quindi, tenere conto di tutti i fattori che concorrono a degradare pesantemente la qualità del segnale.

Innanzitutto, la modalità di propagazione di un segnale radiomobile dipende fortemente dalla tipologia di celle utilizzate. Tali celle, utilizzate per la copertura del territorio, vengono suddivise in categorie a seconda della loro dimensione; le celle più grandi sono quelle realizzate dai sistemi satellitari, posizionati in orbita bassa (LEO), e hanno un raggio dell'ordine di centinaia di chilometri. L'attenuazione di propagazione risulta molto elevata a causa della grande distanza tra trasmettitore satellitare e apparato mobile. Per questo motivo non sono tollerate attenuazioni supplementari, quindi il collegamento satellitare è possibile solo all'aperto, all'esterno di edifici, per avere poca distorsione per presenza di ostacoli.

Le macrocelle, che venivano utilizzate principalmente dai sistemi radiomobili delle prime generazioni, hanno un raggio compreso tra 1 Km e qualche decina di Km. Vengono realizzate con trasmettitori di elevata potenza, qualche decina di Watt, e con antenne installate su tralicci molto alti posti in posizioni dominanti rispetto agli ostacoli. L'attenuazione di tratta è semplicemente dovuta alla distanza fisica tra antenna e apparato mobile.

Con l'avvento dei sistemi radiomobili più moderni sono state introdotte nuove tipologie di celle (celle piccole, microcelle e picocelle), in modo da poter offrire una copertura più capillare, soprattutto in ambito cittadino. Le celle piccole presentano



un raggio che va da 0.3 a 3 Km e la potenza richiesta alle SRB è di qualche Watt. Le antenne che generano queste celle sono solitamente installate sugli edifici, a un'altezza che non sempre permette di superare ostacoli artificiali. La propagazione dei segnali risente, quindi, di zone d'ombra che rendono irregolare l'area di copertura.

Le microcelle sono realizzate da SRB che irradiano una potenza compresa tra 0.25 e 1 W, le cui antenne sono installate a pochi metri di altezza, su muri di edifici o su pali e che coprono aree da 100 a 500 metri. Una microcella non ha forma geometrica, poiché offre la copertura nella zona corrispondente agli spazi aperti adiacenti alla SRB, che segue l'andamento di piazze, strade e edifici.

Infine, le picocelle sono poste direttamente all'interno degli edifici che presentano un elevato numero di utenti all'interno: in questo caso, quindi, le potenze si riducono a milliwatt e le antenne sono posizionate in piccoli box localizzati in spazi appositi.

Essendo principalmente posizionate nelle zone abitate, il segnale emesso dalle SRB seguirà diversi percorsi prima di raggiungere il ricevitore, di cui uno solo è considerato il percorso diretto che congiunge in linea retta ricevitore e trasmettitore. Tutti gli altri percorsi saranno contraddistinti dal fatto che il segnale subirà delle deviazioni rispetto al percorso diretto, e in tal modo verranno ritardati e distorti. Ciò è possibile perché un'onda elettromagnetica può subire riflessioni, rifrazioni o diffrazioni, ovvero segue le leggi dell'ottica geometrica. La riflessione avviene quando un raggio colpisce una superficie piana e ne riemerge un'onda con un angolo di riflessione pari all'angolo di incidenza. La rifrazione si ha quando un'onda attraversa strati atmosferici aventi differente densità e in tal modo viene modificato l'angolo di uscita del raggio. Infine, la diffrazione è presente quando il segnale elettromagnetico intercetta uno spigolo e crea al di là di questo una nuova serie di raggi che si propagano in direzione diversa rispetto al raggio di partenza. Tale fenomeno non è affatto negativo poiché, per quanto riguarda le trasmissioni radiomobili, la diffrazione consente di superare ostacoli, come i tetti degli edifici, e offrire servizi in zone altrimenti non raggiunte. Esiste un altro fenomeno di per se negativo ma che aiuta la propagazione del segnale telefonico: lo scattering, fenomeno per il quale si presuppone la presenza di oggetti radi e aventi superficie rugosa, che diffondono in varie direzioni raggi secondari. Possono appartenere a

tale categoria gli alberi nei tessuti urbani, che portano quindi un beneficio non indifferente alla propagazione.

Anche il percorso considerato diretto possiede delle attenuazioni dovute alla distanza fisica tra i due apparati ricetrasmittenti. In uno spazio libero da ostacoli, l'attenuazione dovuta alla lunghezza del collegamento dipende proprio da tale distanza e dalla frequenza del sistema, secondo la seguente relazione:

$$A = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi d f}\right)^2 \quad (3.2)$$

$$A(dB) = 20 \log\left(\frac{c}{4\pi 10^3 10^6}\right) - 20 \log(d_{Km}) - 20 \log(f_{MHz}) \quad (3.3)$$

$$A(dB) = 32.4 + 20 \log(d_{Km}) + 20 \log(f_{MHz}) \quad (3.4)$$

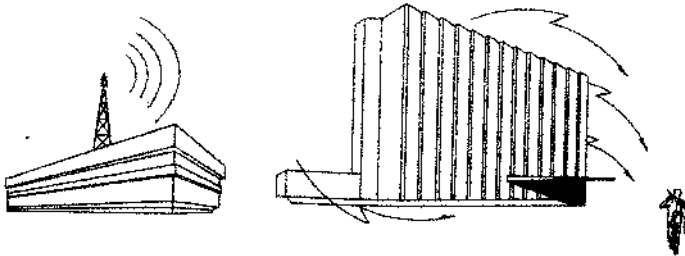


Figura 3.8.1 - Esempio di Fading Lento

Inoltre, per il calcolo del segnale ricevuto si dovrà tenere conto della potenza del segnale emesso al trasmettitore e il guadagno dei due sistemi radianti. Nella realtà, come già accennato, l'ambiente di

propagazione non è libero ma pieno di ostacoli e in tal caso l'attenuazione aumenta sensibilmente e per il suo calcolo vengono utilizzati modelli più complessi.

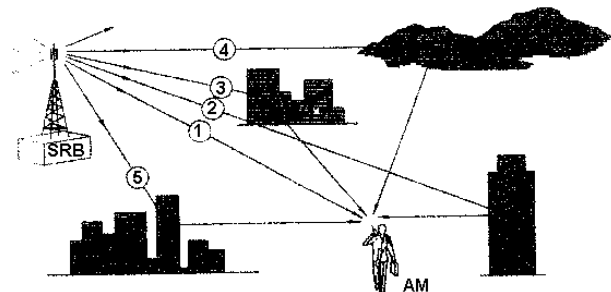
Altro aspetto interessante da tenere in considerazione è che nel nostro caso la mobilità dell'apparato mobile complica le cose e perciò crea condizioni di grande variabilità dell'attenuazione. Tutto ciò viene denominato fading, e può essere riscontrato quando la qualità della conversazione peggiora sensibilmente. Per esempio, la presenza di edifici tra l'utente e la SRB provoca forti variazioni del campo ricevuto riconducibili ad una zona d'ombra che dipende dalle dimensioni dell'ostacolo; in questo caso si parla di fading lento. In tal caso vengono d'aiuto quei fenomeni dell'ottica geometrica citati prima.

Come già detto, però, oltre al cammino diretto sono presenti numerosi percorsi "alternativi" dovuti all'ampiezza del diagramma verticale, la ridotta altezza dal suolo della SRB e i numerosi oggetti che riflettono il segnale; questo genera il cosiddetto fading veloce. Tali segnali arrivano al ricevitore quasi contemporaneamente al segnale diretto causando non pochi problemi.

Assumendo che ci siano solo due cammini, si ipotizzi che essi pervengano al ricevitore con la stessa ampiezza ma differenza di fase di 180°: i due segnali si sommano e in tal caso il segnale risultante avrà ampiezza nulla. Dato che gli echi del segnale diretto sono senz'altro maggiori di due e che ognuno compie un cammino diverso dagli altri, si può affermare che le possibili relazioni di fase tra ciascun segnale può rispondere solo a considerazioni statistiche e si potranno avere tutte le possibili combinazioni di fase tra i vari echi. In generale, segnali con relazioni di fase casuali producono variazioni sull'ampiezza del segnale in ciascun punto dello spazio sia in senso positivo, amplificando il segnale, che negativo, attenuandolo. Il numero e la profondità dei picchi di attenuazione viene solitamente caratterizzato dalla distribuzione statistica di Rayleigh. Il moto dell'apparato mobile all'interno di questo ambiente crea sul ricevitore un effetto fading rapido o fading di Rayleigh dovuto alla rapida successione dell'ampiezza del segnale tra valori normali o rinforzati e attenuazioni anche maggiori di 50 dB: più i picchi sono profondi e frequenti, tanto peggiore risulta la qualità della ricezione.

La propagazione multi cammino (multipath) genera anche altri effetti negativi.

Come già anticipato, i vari echi, seguendo percorsi differenti tra loro, arriveranno al ricevitore con tempi diversificati: il raggio diretto arriverà dopo un certo tempo di percorrenza mentre



**Figura 3.8.2 - Effetto dei cammini multipli**

tutti gli altri segnali arriveranno ritardati di un certo intervallo di tempo. L'effetto è la dispersione del ritardo del segnale e un parametro fondamentale per la sua caratterizzazione è il delay spread, ovvero la deviazione standard dei valori di tale ritardo rispetto a tutte le componenti del segnale ricevuto.

Per descrivere compiutamente il canale radiomobile occorre conoscere la sua risposta all'impulso, che varia nello spazio ma anche nel tempo, attraverso la conversione operata dalla velocità di spostamento dell'utente. La caratterizzazione del canale in termini di risposta all'impulso è alla base degli studi per realizzare le contromisure; a tal fine per il GSM sono stati definiti alcuni ambienti tipici utilizzabili come riferimento per le prestazioni del sistema:

- TU (Typical Urban): utente situato in una zona urbana, a sua volta ulteriormente suddiviso in:
  - Pedone in movimento lento (< 3 Km/h);
  - Veicolo in movimento normale (< 50 Km/h).
- RA (Rural Area): terminale mobile in ambiente rurale, veicolo supposto con velocità inferiore ai 250 Km/h.
- HT (Hill Terrain): utente situato in zona collinare; veicolo con velocità supposta inferiore ai 100 Km/h.

Di ogni ambiente viene individuata la risposta del canale in termini di ritardo e ampiezza degli echi. Sicuramente tra i vari ambienti il più ostico è l'HT in cui le riflessioni generano blocchi di echi anche molto distanziati.

Esistono, infine, altre cause di disturbo generate al di fuori del sistema trasmettitore-ricevitore: l'interferenza isofrequenziale, l'interferenza da canale adiacente e disturbi da campo elettromagnetico esterno. L'interferenza isofrequenziale è tipica dei cellulari in quanto deriva dal riuso della frequenza del canale in celle più o meno distanti.

L'energia dello spettro radioelettrico è massima in corrispondenza della portante e decresce gradualmente all'allontanamento da questa. Può succedere che porzioni laterali dello spettro ricadano nel canale adiacente sovrapponendosi al segnale. Ciò avviene poiché alcuni tipi di modulazioni originano spettri molto complessi e ricchi di lobi laterali che quindi possono fuoriuscire dalla grandezza prestabilita.

Data la grande densità di energia emessa da tante sorgenti su gran parte dello spettro radioelettrico, anche sulle gamme di frequenza riservate ai sistemi radiomobili vi saranno segnali o rumori che possono degradare la qualità del segnale. I disturbi a radiofrequenza derivano non solo da altri apparati trasmettenti ma anche da sorgenti occasionali che originano il man made noise. Tale rumore proviene da dispositivi, come sistemi di accensione di motori a scoppio o macchine industriali che producono emissioni radioelettriche indesiderate.

Per tutti questi disturbi sono state messe a punto varie contromisure. Come visto, il fading provoca affievolimenti profondi e ripetuti del segnale ricevuto: una possibile soluzione potrebbe essere la trasmissione con un livello di potenza elevato e tale da non consentire l'annullamento del segnale anche in corrispondenza dei minimi della

propagazione. Da studi sulla propagazione radiomobile è emerso che per un'adeguata protezione dal fading sarebbe necessario avere un margine sul segnale ricevuto non inferiore ai 40 dB, ovvero un rapporto di 100 volte la potenza del trasmettitore. In realtà tutto ciò non si attua mai soprattutto perché la qualità del servizio esige il contenimento della potenza irradiata, al fine di minimizzare le interferenze isofrequenziali. Addirittura esistono le tecniche di power control che modificano dinamicamente la potenza emessa per adeguarla al valore minimo richiesto per garantire la qualità del collegamento. E' necessario quindi esplorare altre soluzioni per risolvere il problema del fading, e tra le varie esistenti sono interessanti le tecniche di diversità di spazio, diversità di frequenza e diversità di polarizzazione. Il concetto di diversità è basato sul fatto che le perturbazioni cui è soggetta la propagazione sono correlate con la frequenza del segnale e la sua distribuzione nello spazio. Applicando il principio della diversità è possibile realizzare tra il trasmettitore e il rispettivo ricevitore due o più percorsi radioelettrici in cui le proprietà di decorrelazione statistica tra i segnali che li percorrono consentano di separare nel tempo i punti di massimo affievolimento. Un doppio sistema ricevente potrà disporre di due segnali ricevuti di cui uno sempre migliore dell'altro e con un'operazione di combinazione o commutazione ottenere un miglioramento rispetto ai degni intrinseci di qualità offerti singolarmente dai due segnali ricevuti.

Nel caso della diversità di spazio la realizzazione dei due percorsi fisicamente diversi si ottiene impiegando due antenne in posizione differenziata presso la SRB. Come già visto, a causa del fading rapido il terminale mobile si muove in uno spazio caratterizzato da profonde e periodiche variazioni di ampiezza. Tali variazioni si possono immaginare come stazionarie nelle due dimensioni orizzontali dello spazio; due ricevitori dotati di antenne opportunamente distanziate riceveranno da un ipotetico utente che si muove in tale spazio due segnali con ampiezze non correlate. Esiste una grande probabilità che quando a un'antenna si presenta una forte attenuazione, l'altra riceve un segnale di livello più elevato: a questo punto un opportuno circuito in grado di valutare le due qualità dei segnali dovrà decidere da quale ricevitore prelevare il segnale da utilizzare. In tal modo la diversità di spazio garantisce che il segnale utile selezionato istante per istante sia quello prelevato dal ricevitore che dispone del livello meno affetto da errori. La distanza fra le due

antenne è importante per garantire al massimo l'effetto di decorrelazione che aumenta in funzione della distanza tra le antenne valutata in multipli di  $\lambda$ . Tale soluzione viene, di norma, applicata solo alle stazioni radio fisse, ovvero la diversità agisce solo nel senso up-link, poiché diventa impraticabile da applicare sugli apparati mobili.

Un modo diverso di decorrelare due canali trasmissivi potrebbe essere quello di trasmetterli su frequenze diverse; avere, quindi, un sistema con due ricevitori cui pervenga contemporaneamente lo stesso segnale modulato, ma su due frequenze sufficientemente distanti da offrire la decorrelazione voluta. Questa soluzione è facilmente implementabile nei sistemi numerici, imponendo a un determinato apparato mobile di cambiare frequenza portante a ogni burst, utilizzando a rotazione tutte le frequenze disponibili in quella precisa cella. Tutti gli utenti attivi presenti sulla cella ruoteranno ciclicamente su tutte le frequenze ottenendo il vantaggio di controbattere gli effetti distorcenti della propagazione senza però richiedere al sistema nessuna nuova risorsa. Tale tecnica è anche nota con il nome di Frequency Hopping.

Negli ultimi anni, però, la rapida diffusione della telefonia e delle antenne a essa correlate hanno cominciato a creare problemi dal punto di vista dell'impatto ambientale, creando nella popolazione un timore che questo moltiplicarsi di antenne creasse seri problemi sulla salute. Per tale motivo le tecniche di diversità di spazio non sono utilizzate, poiché richiedono di avere due antenne al posto di una. Un'alternativa alla diversità di spazio è la tecnica della diversità di polarizzazione. Il riferimento convenzionale per l'orientamento della polarizzazione dell'antenna è il piano di terra; il comportamento dell'antenna nei confronti della polarizzazione dipende, quindi, dalla disposizione del dipolo, il cui orientamento fisico è parallelo al vettore campo elettrico. Se il dipolo di un'antenna è perpendicolare al piano di terra, si dirà che la polarizzazione è verticale. La scelta della polarizzazione incide in modo rilevante sulla propagazione dei segnali: l'antenna dell'apparato mobile non deve, però, risentire in alcun modo del diverso orientamento nei confronti della stazione fissa, e dovrà, inoltre, presentare un diagramma di radiazione omnidirezionale. Anche nella sua funzione ricevente l'efficienza di un'antenna è correlata con la polarizzazione: la ricezione è massima in condizioni di coincidenza tra la polarizzazione del segnale incidente e dell'antenna ricevente. All'aumentare

dell'angolo tra le due polarizzazioni, il segnale ricevuto cala fino al minimo che si ha per un angolo pari a  $90^\circ$ , nel qual caso si può avere ricezione nulla o per lo meno molto bassa. Tale effetto di selettività nei confronti della polarizzazione viene utilizzato per ottenere una diversità nei cammini del segnale. Per quanto riguarda il terminale mobile, la sua antenna è molto semplice pertanto la polarizzazione non è mai perfettamente lineare ma presenta un certo ammontare di polarizzazione incrociata; inoltre l'effettiva polarizzazione dipende dall'inclinazione data dall'utente al suo telefonino, per cui l'antenna sarà per lo più inclinata. Per ottenere la voluta diversità, la stazione SRB è equipaggiata con due antenne differenziate per polarizzazione che alimentano due differenti ricevitori. Nel corso di una conversazione, l'utente può modificare più volte e in modo assolutamente casuale la polarizzazione dell'antenna del suo telefonino; nel momento in cui questa tendesse ad allinearsi con il minimo di ricezione di una delle due antenne, sicuramente si avvicinerà al massimo dell'altra. Esisterà uno switch all'uscita dei due ricevitori in grado di commutare istantaneamente sul migliore dei due segnali.

### 3.9 ISI – Interferenza Intersimbolica

Il mezzo trasmissivo produce un degradamento nelle caratteristiche del segnale trasmesso tale da comprometterne il corretto riconoscimento. La caratteristica di trasferimento del mezzo trasmissivo introduce una limitazione in banda dello spettro del segnale numerico; ciò comporta una dispersione dell'energia dell'impulso. Un'altra fonte di distorsione è la cattiva risposta all'impulso dovuta al fading di Rayleigh. Al segnale utile, poi, si sovrappone un rumore di tipo impulsivo, dovuto a interferenze con i sistemi esterni. Inoltre il ricevitore è soggetto al rumore termico, che si genera all'interno di ogni circuito a causa dell'agitazione termica degli elettroni. Il segnale numerico originale, quindi, peggiora le sue caratteristiche

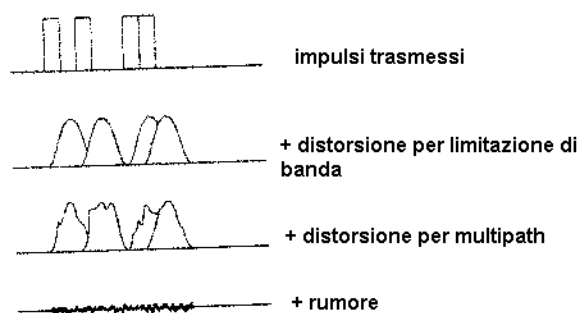


Figura 3.9.1 - Effetto delle distorsioni e ISI sul segnale trasmesso

sia al crescere dei fenomeni che distorcono la forma dell'onda sia all'aumentare dei disturbi captati dal ricevitore. L'effetto principale di tutti questi fenomeni è la difficoltà a identificare il contenuto informativo del

segnale. La deformazione degli impulsi, infatti, ne provoca la dispersione temporale, ovvero l'impulso perde la sua forma rettangolare e si arrotonda e si allarga con code all'entrata e all'uscita: ogni impulso viene interferito dalle code di quelli che lo precedono e lo seguono e si verifica il fenomeno dell'interferenza intersimbolica o ISI. Per riuscire a individuare l'informazione presente nel segnale, si procede con la tecnica della rigenerazione del segnale, ovvero si ricostruiscono i simboli pervenuti distorti e inquinati dal rumore all'ingresso del ricevitore.

La prima operazione da compiere è un recupero del livello del segnale grazie ad un amplificatore che mantiene costante all'ingresso del rigeneratore il livello di picco del segnale anche in presenza di variazioni rilevanti del livello all'ingresso del ricevitore. Successivamente, tramite un processo di equalizzazione si riducono gli effetti della distorsione. A questo punto i simboli sono esaminati da un circuito che ne decide il livello logico con riferimento ad una soglia di decisione. La decisione è anche legata, in realtà, a un criterio temporale; la lettura del simbolo avviene nell'istante in cui è massima la probabilità che lo stesso abbia raggiunto la sua massima elongazione. Questo istante corrisponde approssimativamente alla metà del tempo di simbolo. Il rigeneratore deve conoscere con precisione la temporizzazione della trama ricevuta.

A valle del rigeneratore la nuova sequenza sarà priva di rumore e distorsioni e sarà virtualmente identica alla sequenza originariamente trasmessa a meno di eventuali errori. Il tasso di errore indica l'incidenza di simboli errati nella sequenza di dati rigenerati. L'errore può occorrere quando il livello del rumore è tale da portare il livello del simbolo dalla parte errata della soglia di decisione. Esistono due tipologie di errori, l'errore di omissione quando viene deciso per 0 un simbolo che in realtà era 1 e l'errore di commissione, quando viene rigenerato un simbolo 1 invece di uno 0.

Come affermano i criteri di Nyquist, è possibile minimizzare l'interferenza intersimbolica assegnando alla funzione di trasferimento complessiva del canale trasmissivo una curva di risposta uniforme in frequenza, con banda passante pari a metà della frequenza di cifra dei simboli trasmessi. Questa condizione ottimale offre le migliori condizioni per ricostruire correttamente la sequenza trasmessa a valle di un canale che introduca rumore e distorsioni. Tuttavia, la funzione di trasferimento complessiva risulta la somma di più elementi, da un lato il filtro che forma gli



impulsi nel trasmettitore e i successivi filtraggi a radiofrequenza, dall'altro i filtri di cui è corredato il ricevitore per la necessaria selettività di canale e la ripulitura dei simboli ricevuti. Anche il canale radio limita e sagoma la forma degli impulsi e lo fa in modo casuale e molto variabile. In conclusione la funzione di trasferimento totale varia nel tempo in modo aleatorio; non resta che realizzare nel ricevitore un filtraggio variabile che automaticamente complementi ciò che manca alla funzione di trasferimento desiderata. La cosiddetta equalizzazione adattativa è tanto più necessaria quanto più veloci sono le variazioni delle caratteristiche di propagazione del terminale mobile.

Anche se lo standard GSM non specifica la soluzione migliore, si è scelto come ottimale l'equalizzatore che applica il principio della massima verosimiglianza, Maximum Likelihood Sequence Estimation (MLSE), che non prende in considerazione un simbolo per volta ma una sequenza di simboli che sono tra loro in relazione. Simboli difficilmente riconoscibili perché distorti vengono associati al simbolo più simile a quello in esame; le possibili associazioni sono molteplici, ma a ciascuna viene attribuito un peso che ne rappresenta la credibilità e risulta possibile, quindi, scegliere la sequenza che ha la massima possibilità di essere quella corretta. Questo risultato implica, però, che vengano esaminate tutte le possibili sequenze e che ciascun simbolo sia confrontato con tutti i simboli possibili ad ogni passo. Nell'esaminare le diverse sequenze tramite il criterio MLSE è necessario utilizzare per distinguere ciascuna da tutte le altre; l'algoritmo di Viterbi è una particolare implementazione in grado di minimizzare la complessità elaborativa, in grado di scartare le sequenze considerate meno probabili tra quelle giunte a un certo punto.

Al fine di determinare la risposta istantanea all'impulso, l'equalizzatore deve poter effettuare una stima istante per istante della distorsione del canale e a tale scopo si introduce nella trama trasmessa una sequenza nota che consente di massimizzare la funzione di correlazione. Tale sequenza, detta sequenza di addestramento, viene introdotta a beneficio dell'equalizzatore a ogni burst che diventa quindi l'entità minima della trama su cui si effettua la correlazione delle fluttuazioni del canale. Poiché in condizioni di velocità elevata di spostamento del terminale mobile la risposta all'impulso può variare già all'interno di un singolo time-slot, la sequenza di addestramento viene inserita al centro del time-slot suddividendo il burst in due

porzioni simmetriche. Per effettuare l'equalizzazione del burst ricevuto, l'equalizzatore di Viterbi inizia l'elaborazione dai bit più vicini alla sequenza di addestramento, in quanto è ragionevole pensare che questi dovrebbero subire distorsioni di canale simile a quelle dei bit della sequenza di addestramento. Ciò è possibile in quanto il burst viene memorizzato prima di essere elaborato.

# 4. Tecnologie Di Comunicazione Mobile

## 4.1 Breve Storia Del telefono

Uno dei principali oggetti che ha cambiato radicalmente il modo di vivere delle persone è il telefono. Come già accennato nella parte introduttiva, legati alla sua capillare diffusione vi sono sia aspetti positivi (la possibilità di parlare con persone a grandi distanze) che aspetti negativi (la sempre maggiore diffusione delle antenne per la trasmissione del segnale nel tessuto urbano). Il telefono ha conquistato una posizione di rilievo nelle nostre vite solo negli ultimi cinquanta anni, ma la sua invenzione risale a circa 150 anni prima. Fu negli anni di diffusione del telegrafo, infatti,



**Figura 4.1.1 - uno dei primi telefoni risalente ai primi del 1900**

che inventori e scienziati proposero uno strumento nuovo e più potente, il telefono, capace di trasportare la voce umana a distanze sempre crescenti. Inizialmente era immaginato come semplice sostituto del telegrafo, ma diventò presto un mezzo di comunicazione per tutti, in grado di modificare le abitudini sociali e ridisegnare le



**Figura 4.1.2 - telefono con pila e manovella di chiamata**

relazioni. Fino al 1880, il telefono fu solo uno strumento scientifico utilizzato nei laboratori. A partire dal 1840, molti studiosi si cimentarono nella sua realizzazione come Johann Philipp Reis (Germania), David Hughes (Inghilterra), gli italiani Antonio Meucci e Innocenzo Manzetti, Alexander Graham Bell (Scozia) e Thomas Alva Edison (Stati Uniti).

A partire dal 1881, furono banchieri, agenti di cambio e le ferrovie a usare intensamente i primi servizi telefonici, seguiti da imprenditori e professionisti. Il telefono era considerato un telegrafo parlante più rapido e comodo dell'apparecchio inventato da Morse e gli abbonati potevano comunicare solo con utenti della stessa rete urbana. Dopo la prima guerra mondiale, anche in Italia si

cominciò a usare il telefono non solo per le chiamate di lavoro ma anche per chiacchierare con parenti o amici. Per razionalizzare la gestione del servizio, nel 1923 cinque concessionarie private (Stipel, Telve, Timo, Set, Teti) assorbito le decine di concessionarie esistenti e si spartirono il territorio italiano. Il telefono perse la manovella di chiamata e la pila, mentre il microfono e il ricevitore si fusero in un corpo unico: nacque così la "cornetta" e l'apparecchio diventò più leggero, compatto e facile da usare. A partire dagli anni cinquanta si assistette a un vero e proprio incremento nelle richieste di nuovi allacciamenti



**Figura 4.1.3 - telefono con cornetta e disco combinatore**

telefonici. Il boom economico, gli ingenti flussi migratori interni al nostro Paese e gli investimenti sulle infrastrutture furono tra i motivi principali di questa importante diffusione. Alla fine del periodo 1970 - 1990 il telefono raggiunse ogni casa e ufficio fino a stimare venti milioni di apparecchi, uno ogni due abitanti. Il dispositivo restò invariato nella forma e nel funzionamento, solo il disco combinatore venne sostituito dalla tastiera. La vera rivoluzione avvenne invece "intorno" al telefono, dove iniziarono ad apparire nuovi accessori: segreteria telefonica, fax, cercapersone, contascatti, filodiffusione, apparecchi per vivavoce, rubriche automatiche, videotel. La telefonia mobile e la diffusione di internet modificarono inesorabilmente l'utilizzo del telefono fisso. La telefonia mobile approda in Italia a cavallo tra gli anni Settanta e Ottanta. I primi telefoni mobili, in realtà, erano già apparsi sulle auto della polizia di Detroit già nel 1921 e dal 1946 la compagnia telefonica statunitense AT&T aveva avviato un servizio commerciale. Gli apparecchi comunicavano con un'unica antenna di grande potenza installata su un grattacielo che poteva trasmettere fino a cento chilometri di distanza. Il loro costo però era molto elevato e l'installazione doveva essere fatta su misura per l'automobile: ricevitore, trasmettitore e circuiti elettronici del telefono occupavano l'intero bagagliaio, mentre il disco selettore e la cornetta venivano installati all'interno dell'abitacolo. L'alimentazione veniva fornita dalla batteria della macchina, ma il consumo era piuttosto elevato. Il numero di canali a disposizione per le chiamate era comunque molto inferiore alle richieste di abbonamento e, nonostante le tariffe elevate, non era semplice trovare la linea libera, specialmente nelle ore di punta.



**Figura 4.1.4 - l'ingegner Martin Cooper con il prototipo di DynaTac**

L'ingegnere americano Martin Cooper, che lavorava alla società di elettronica Motorola, il 3 aprile 1973 effettuò per la prima volta una chiamata da un telefono cellulare. L'apparecchio utilizzato era il prototipo Dyna-Tac, del peso di 1130 grammi, senza display né altre funzioni se non quelle di parlare, ascoltare e comporre un numero. La sua batteria aveva 35 minuti di autonomia, ma impiegava più di

dieci ore a ricaricarsi. Eppure rispetto ai telefoni da automobile le dimensioni, il peso e il consumo energetico si erano notevolmente ridotti: questo salto tecnologico fu reso possibile, tra l'altro, dalla diffusione dei transistor. Per comunicare, il Motorola DynaTac si collegava con una stazione ricevente situata a New York, che poi instradava la telefonata lungo le normali linee telefoniche. Se Motorola è stato il primo realizzatore di un telefono portatile e della stazione ricetrasmittente, il principio e lo sviluppo della rete cellulare si devono però ai Bell Labs della AT&T, che nel 1968 avevano proposto un sistema basato sulla suddivisione del territorio in una serie di celle esagonali, ognuna con una stazione ricetrasmittente. In questa rete ciascuna stazione è collegata attraverso normali linee telefoniche a un centro di commutazione per le telecomunicazioni mobili, che ha il compito di dirigere il traffico. Quando l'utente fa una chiamata utilizza uno dei canali disponibili nella cella; spostandosi in una zona servita da un'altra cella, il sistema trasferisce automaticamente la comunicazione su un nuovo canale della nuova cella (roaming), lasciando libero il precedente per altre telefonate. In tal modo, le frequenze usate in una cella possono essere riutilizzate in una cella non molto distante, purché non adiacente. Questa soluzione permise di superare i problemi di sovraffollamento delle linee riscontrati negli esperimenti precedenti.

Nel 1983 venne lanciato sul mercato il primo telefono cellulare: si trattava di un Motorola DynaTac 8000X, pesante quasi 8 etti e soprannominato, per la forma poco attraente, il mattone. Fu messo in vendita a 3.995 dollari: a questi prezzi le vendite non esplosero immediatamente. La società aveva



**Figura 4.1.5 - Motorola DynaTac 8000X**

previsto che alla fine del secolo ci sarebbero stati un milione di utenti nel mondo; in realtà nel 2000 c'erano più di 109 milioni di abbonati alla telefonia cellulare solo negli Stati Uniti. In Europa la commercializzazione dei primi telefoni cellulari arrivò nel 1986. Nel 1991 venne lanciato in tutta Europa il sistema di telefonia mobile digitale battezzato GSM, che gradualmente sostituì i vari sistemi analogici presenti in ogni Paese (in Italia la rete TACS). Il sistema digitale consentiva non solo di trasferire la voce ma anche di spedire messaggi di testo, notizie, immagini, e di collegare il telefono al computer. Nel dicembre 1992 nacquero gli SMS (Short Message Service), pensati inizialmente come sistema di comunicazione di servizio per gli operatori della telefonia mobile e diventati poi un fenomeno di costume. Nel 1997, quando la frequenza di trasmissione intorno ai 900MHz iniziò a diventare insufficiente per sostenere tutto il traffico, venne aggiunta quella a 1800MHz e nacquero quindi i telefoni dual band. Il presente è costituito dai telefonini di terza generazione, l'UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), con una capacità di trasferire dati tale (la cosiddetta banda larga) da poter trasmettere anche video e filmati.

## 4.2 Tecnologie Di Comunicazione

### 4.2.1 TACS

Per quanto riguarda il telefono cellulare, la sua storia è suddivisa in “generazioni” che si distinguono in base ad un particolare salto di qualità, o di prestazioni, o di tecnologia. La prima tecnologia utilizzata è stata la tecnica analogica TACS, Total Access Communication System, che utilizza 1000 canali centrati nella banda 890-960 MHz, evoluta successivamente nello standard E-TACS (1320 canali nella banda 872-950 MHz). La tecnica di accesso multiplo utilizzata è la SCPC-FDMA (Single Channel Per Carrier -Frequency Division Multiple Access), in cui l'accesso multiplo è gestito con la divisione di frequenza e assegnando una frequenza a ogni singolo utente. Basato su terminali analogici, il TACS ha il limite di essere eccessivamente legato al territorio: i terminali funzionano solo all'interno dei confini della singola nazione dell'operatore. Il vero problema delle tecnologie TACS e E-TACS, però, sta nell'insicurezza della trasmissione: questo tipo di cellulare poteva essere facilmente intercettato (ascoltando quindi la conversazione tra due utenti) e clonato; potevano cioè essere duplicate le caratteristiche della SIM card a vantaggio di truffe e raggiri.

Per quanto riguarda la sua architettura, il sistema radiomobile analogico è costituito da MSC (Mobile Switching Center), ovvero Centri di Commutazione Servizio Radiomobile, e da Stazioni Radio Base che assicurano la copertura radio del territorio nazionale secondo la tecnica delle celle. Gli MSC contengono l'interfaccia con la rete telefonica pubblica e sono fra loro collegati mediante una rete a maglia completa. A ogni MSC fa capo un certo numero di SRB, che coprono un'area geografica chiamata area di servizio. Quest'ultima è suddivisa in aree di collocazione per consentire una più rapida ricerca degli apparati mobili (AM). Questo è possibile perché quando un AM si sposta da un'area di collocazione a un'altra ne informa l'MSC mediante un'apposita procedura denominata handover.

I vari AM sono contraddistinti da un Serial Number (SN) non modificabile che identifica la ditta costruttrice, il tipo di apparato e la nazione nella quale viene utilizzato. Tale serial number è collegato rigidamente al numero di telefono quindi, quando arriva una chiamata per un determinato AM, la MSC verifica l'associazione e nel caso non corrispondesse non inoltra la chiamata. E' addirittura possibile creare un elenco dei SN non autorizzati all'accesso in rete (apparati smarriti o rubati). Ogni AM è permanentemente individuato in quanto, ogni volta che l'apparato viene acceso, effettua una chiamata, cambia area o comunque ogni 26 minuti, viene effettuata la procedura di affiliazione che ne consente la localizzazione.

In Italia erano utilizzati solo 504 canali dei 1320 disponibili in quanto nella stessa gamma di frequenze era presente il sistema GSM. Ogni canale utilizza due frequenze, una per il senso AM – SRB e una per il verso contrario, distanti 45 MHz con un passo di canalizzazione di 25 kHz. Dei 504 canali, 462 erano disponibili per i canali radio vocali (CV) e 42 per i canali radio di controllo (CC). I canali vocali realizzano il collegamento vero e proprio tra due terminali e vengono selezionati dall'MSC quando deve cominciare una comunicazione e conseguentemente liberati al termine della telefonata, rendendosi disponibili per una nuova conversazione. La gestione di tutti i canali vocali è effettuata dall'MSC che in ogni istante conosce il loro stato di disponibilità. Ogni cella è servita da più canali vocali, il numero dei quali è stabilito in base al traffico. Oltre alla voce, sui CV viaggiano altri segnali: il SAT (Supervisory Audio Tone) che consente di monitorare la qualità del collegamento radio, il ST (Signaling Tone) utilizzato per la procedura di handover e vari dati numerici trasmessi in situazioni particolari. I canali di controllo sono di tipo

numerico e sono denominati FOCC (Forward Control Channel) nel senso SRB – AM e RECC (Reverse Control Channel) nel senso opposto.

Per quanto riguarda la copertura cellulare, è possibile la riutilizzazione delle frequenze evitando o comunque riducendo l'interferenza co-canale. La tecnica impiegata, che viene utilizzata anche per il GSM, prevede la realizzazione di gruppi di celle adiacenti, denominate cluster, aventi tutte frequenze diverse. I cluster adiacenti, nei quali si ripetono le stesse frequenze, sono caratterizzati da un diverso valore di SAT, in modo che un AM possa distinguere un cluster da un altro. Il tono di SAT è però utilizzato, come detto in precedenza, anche per il controllo della qualità della conversazione. La SRB riceve tale tono dall'AM, analizza il rumore e lo confronta con due valori soglia, SNH, ovvero il rapporto S/N per la richiesta di handover, oppure SNR, il rapporto S/N per l'abbattimento della connessione. La qualità del collegamento è valutata anche mediante la misura del campo ricevuto dalla SRB: le soglie sono quattro, SDD (intensità del campo per la richiesta di diminuzione della potenza trasmessa dall'AM), SSI (intensità di campo per la richiesta di aumento della potenza trasmessa dall'AM), SSH (intensità di campo per la richiesta di handover) e SSB (intensità di campo per il blocco del canale vocale).

I cluster sono dimensionati in modo da ottenere una riduzione dell'interferenza co-canale. Il numero K di celle che formano un cluster è selezionato in modo da essere sufficientemente elevato per fare in modo che la distanza minima tra due celle che usano la stessa frequenza risulti abbastanza elevata. Al crescere di K cresce, infatti, anche tale distanza D, secondo la seguente relazione:

$$D = \sqrt{3K} \cdot R \quad (4.1)$$

dove R è il raggio di copertura di ciascuna cella. Il rapporto  $q = D/R$  viene detto fattore di riduzione dell'interferenza co-canale, perché al suo aumentare diminuisce l'interferenza.

Il valore di K non può però essere eccessivamente elevato, in quanto essendo il numero di canali fissato, 504, un valore troppo grande di K può ridurre eccessivamente il numero di canali assegnato a ogni cella, compromettendo la capacità del sistema di smaltire il traffico.

Un buon compromesso fra le due esigenze (bassa interferenza ma alta capacità di traffico) conduce normalmente ad adottare due tipi di copertura:



- cluster di 7 celle con antenne SRB omnidirezionali e posizionate al centro delle celle (struttura center excited), utilizzato in aree a bassa densità di traffico dove sono sufficienti celle di grandi dimensioni;
- cluster a 21 celle, con antenne direttive aventi lobi di irradiazione a 120° poste in corrispondenza dei vertici di tre celle esagonali adiacenti (struttura corner excited), utilizzato nelle aree urbane con grande densità di traffico, in cui sono necessarie celle di piccole dimensioni.

I dati inviati sui canali di controllo sono assemblati in pacchetti e codificati con un codice a protezione di errore, atto a correggere gli errori a livello di singoli bit e a rilevare gli errori doppi o di grado superiore. I messaggi trasmessi sono di quattro tipi:

- messaggi di controllo AM, che vengono inviati a un singolo apparato mobile individuato mediante il suo numero identificativo: messaggi di paging, relativi alla ricerca di un apparato mobile a seguito di una chiamata in arrivo, messaggi di designazione del canale vocale, che indicano all'apparato mobile che deve abbandonare il canale di controllo e sintonizzarsi su un determinato canale vocale, sul quale effettuerà la conversazione e messaggi direct-retry, che indicano all'apparato mobile l'indisponibilità di quel canale vocale; in tal caso viene individuata, tra un massimo di sei celle adiacenti, quella di qualità migliore;
- messaggi di overhead: vengono inviati a tutti gli apparati mobili sintonizzati sui canali di controllo e contengono una serie di dati sullo stato del sistema, quali il numero di identificazione dell'area di collocazione e il gruppo di celle a cui appartiene quella relativa al messaggio in esame;
- risposta al paging, ovvero la risposta a una chiamata;
- accesso da AM: sono i messaggi previsti per poter realizzare la connessione.

#### 4.2.2 GSM

La seconda generazione nasce dall'esigenza di un utilizzo più efficiente delle risorse spettrali e dal desiderio di utilizzare nuove tecnologie numeriche: l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) in Europa standardizza il GSM (Global System for Mobile Communication).

L'aspetto più innovativo introdotto dal GSM è l'impiego di una tecnologia numerica nell'interfaccia radio che rivoluziona in modo totale le precedenti soluzioni della tecnologia analogica, con risultati ampiamente migliorativi sia in termini di efficienza spettrale, sia ai fini di una decisiva sicurezza e protezione dell'informazione, sia riguardo alla resistenza a condizioni sfavorevoli di propagazione e interferenza.

L'innovativa interfaccia radio ha apportato notevoli vantaggi, tra i quali:

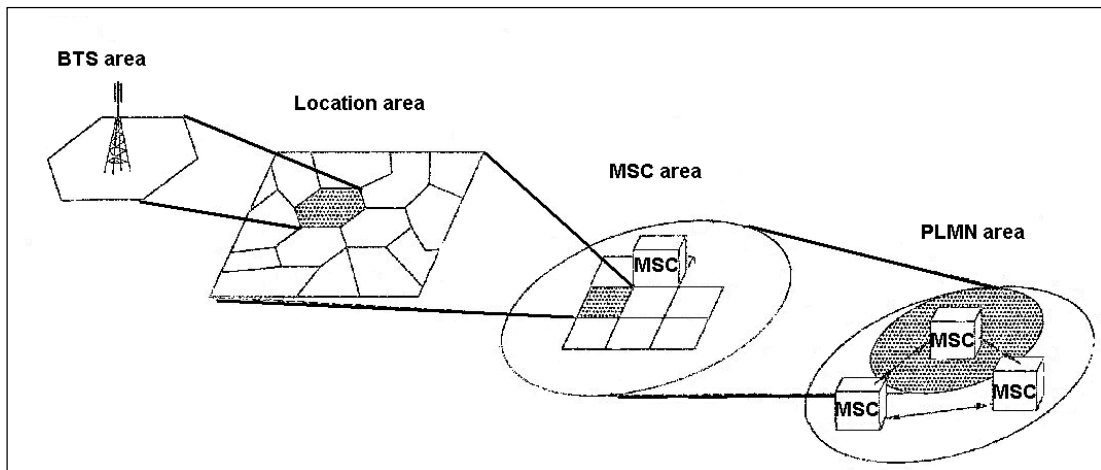
- la possibilità di adottare su ogni canale la metodologia di trasmissione a moltiplicazione di tempo (TDMA, Time Division Multiple Access) in cui una frequenza portante viene occupata da più utenti in successione temporale, al fine di incrementare la capacità di rete;
- minimizzare il grado di interferenza e in tal modo avere celle di minor dimensione e quindi più utenti servibili contemporaneamente;
- aumentare il grado di sicurezza e di riservatezza in generale nelle comunicazioni;
- consentire la trasmissione di dati.

Le frequenze di trasmissione sono definite in 890 – 915 MHz per il canale di up-link, ovvero nella direzione di trasmissione, e 935 – 960 MHz per il canale in down-link, ovvero il canale di ricezione. Il passo di canalizzazione è fissato a 200 kHz, la tecnica di modulazione è la GMSK e la tecnica di accesso multiplo è la TDMA, ovvero la tecnica di accesso multiplo al canale con divisione in tempo, in particolare con 8 time – slot per portante. Ognuno di questi time-slot è gestito senza interferenze con gli altri e a esso è associato un singolo utente. In tal modo il numero di canali fisici disponibili in ogni cella è pari al numero di portanti moltiplicato per 8. In realtà, non tutti i canali sono utilizzati per il traffico ma alcuni devono essere riservati alla gestione del sistema, i cosiddetti canali logici. Questi ultimi sono suddivisi in due categorie, i canali di traffico (TCH) e i canali di controllo (CCH). I canali di traffico vengono utilizzati per la trasmissione di informazioni generate dagli utenti, mentre i canali di controllo sono utilizzati per le segnalazioni, i sincronismi e tutto ciò che riguarda la gestione del sistema.

Come accennato nel paragrafo riguardante il TACS, mentre per la tecnologia analogica il numero di telefono e quindi il serial number era strettamente associato al terminale mobile, nel GSM c'è una netta distinzione tra SIM-card e Mobile Equipment (ME). La SIM contiene tutti i dati relativi all'identità dell'utente e pertanto deve avere un buon sistema di sicurezza. In particolare sono presenti alcuni codici tra cui il codice PIN (Personal Identity Number, generalmente di 4 cifre) che fornisce la chiave di abilitazione al servizio, il codice PUK (PIN Unblocking Key, 8 cifre) che serve per sbloccare l'apparecchio se si è digitato per tre volte consecutive il codice PIN errato all'accensione e il codice IMSI (International Mobile Subscriber Identity) che riporta i dati personali dell'utente. Tutto ciò viene affiancato a chiavi di autenticazione e di cifratura per rendere la comunicazione più sicura. Il Mobile Equipment è costituito da tutto ciò che fa parte dell'apparecchio cellulare tranne la SIM-card. All'interno del ME è cablato in modo sicuro il codice IMEI (International Mobile Equipment Identity) che identifica completamente il mobile equipment e in particolare contiene la casa di costruzione, il luogo di costruzione e il tipo di modello.

Ogni terminale è dotato del sistema Dynamic Power Control che consente di variare dinamicamente la potenza di emissione per avere sempre una comunicazione ottimale ma ridurre al minimo le interferenze.

L'architettura del sistema GSM è caratterizzata da un insieme di aree territoriali diversificate da codici e gestite da strutture di esercizio gerarchiche. La singola cella è denominata BTS, ovvero Base Station, mentre un insieme di celle entro cui l'apparato mobile può effettuare spostamenti senza segnalarlo alla rete, in quanto la sua presenza è già segnalata nel VLR ovvero il registro contenente la localizzazione dei visitatori, è detta LA (Location Area), ovvero area di chiamata. L'insieme delle LA gestite dallo stesso MSC, ovvero dalla stessa centrale radiomobile (MSC=Mobile Switching Center), è detto MSC Area o area di controllo mentre tutta l'area servita da un operatore GSM viene definita PLMN Area, Public Land Mobile Network. Infine l'intera area costituita dalle singole reti di tutti gli operatori delle nazioni che aderiscono allo standard GSM è detta Area GSM o Roaming Area.



**Figura 4.2.1 - Architettura di rete del GSM**

Gli elementi che realizzano la rete fissa sono differenziati a seconda delle funzioni che svolgono; sono individuati i seguenti sottosistemi: BSS (Base Station Sub-system), NSS (Network Switching Sub-system) e OSS (Operation and Support Sub-system). La singola cella è servita da una Stazione Radio Base, detta BTS, e mette a disposizione degli utenti un certo numero di canali fisici e almeno un canale di controllo e segnalazione. Una o più BTS fanno capo a un Controllore di Stazione (BSC = Base Station Controller) che gestisce e controlla le risorse radio e si interfaccia con la centrale radiomobile (MSC = Mobile Switching Center). La MSC appartiene al sottosistema NSS che ha la funzione di gestire la mobilità degli utenti e le connessioni telefoniche sia all'interno della PLMN sia verso le reti esterne. Il sottosistema OSS rappresenta l'insieme delle unità funzionali che consentono all'operatore di gestire e controllare la rete.

Il BSS, o sottosistema di stazione, si occupa delle funzioni relative alla comunicazione radio; comprende le unità funzionali che realizzano la copertura radioelettrica del territorio, sia in termini di gestione delle frequenze, delle potenze, della qualità del collegamento e le relative misurazioni sia ai fini dei servizi legati alla mobilità come la cell selection, l'handover o il location updating. Per fare ciò la BSS si serve di due unità funzionali, la BTS e la BSC.

La BTS è la vera e propria parte radio fissa della rete, comprende gli apparati ricetrasmittenti e le relative antenne. Ogni ricetrasmittente mette a disposizione un certo numero di canali; a seconda del traffico l'operatore può decidere di utilizzare più ricetrasmittitori aumentando il numero complessivo di canali fisici della cella. Oltre al ricetrasmittente vero e proprio la BTS comprende anche una

parte di controllo e una parte di banda base che esegue separatamente per ognuno degli 8 segnali operazioni di codifica di canale ed equalizzazione. In generale la BTS svolge svariate funzioni, tra cui l'effettuazione della codifica di canale, la criptazione della fonia prima che venga immessa sul canale radio, genera la portante a radiofrequenza realizzando la modulazione-demodulazione, controlla la funzione di frequency hopping ed effettua le misure di qualità. Per quanto riguarda la gestione della BTS, il compito è affidato alla BSC che si occupa della progettazione e costruzione delle celle, l'instaurazione e il rilascio di connessioni sui canali assegnati, la gestione degli handover, il controllo e la gestione delle funzionalità dei ricetrasmittitori.

Il sottosistema di rete, NSS, si occupa di tutto ciò che riguarda la mobilità degli utenti. In particolare, fanno parte di questo sottosistema i due registri, VLR e HLR, che tengono traccia di tutti i dati e gli spostamenti degli utenti della rete. Le informazioni temporaneamente memorizzate nel VLR sono di vario tipo, come il profilo dell'utente, ovvero il suo numero di telefono, i servizi legati al contratto sottoscritto, i parametri per l'autenticazione e cifratura, la localizzazione della MS definita mediante un parametro LAI (Location Area Identity) che corrisponde all'area di localizzazione in cui l'utente si trova. Il registro HLR, invece, mantiene memorizzati in modo permanente il profilo che viene creato al momento della sottoscrizione di un contratto con l'operatore. All'interno del HLR sono gestiti anche dati dinamici, come per esempio l'identificativo della VLR presso la quale è registrato attualmente quel particolare utente come "visitors". Tale identificativo, o VLR number, fa sì che l'HLR mantenga sempre aggiornata, per ogni utente, l'informazione relativa alla MSC/VLR Area che lo ha in carico e ciò consente la rintracciabilità dell'utente su tutto il territorio. Il numero sempre crescente di utenti di telefonia mobile ha fatto sì che l'operatore disponga di più HLR distribuiti sul terreno e perciò è stato necessario identificarle tramite un HLR number che può essere comunicato, su richiesta delle VLR, per ottenere i dati di autenticazione e di abbonamento di un certo utente.

Il sottosistema OSS, o sottosistema di controllo, svolge funzioni di esercizio e manutenzione della rete, che possono riguardare, per esempio, tutte le operazioni da svolgere nel caso in cui si renda necessaria l'introduzione di una nuova cella, o la possibilità di estendere capacità o dimensioni di alcune celle per temporanee

esigenze di traffico. In particolare, il sistema OSS gestisce la configurazione delle entità funzionali della rete, i guasti, la sicurezza, analizza le prestazioni della rete per verificarne la funzionalità e raccoglie i dati relativi al traffico sia per la fatturazione sia per fini statistici.

Approfondendo ulteriormente le caratteristiche principali del GSM, la tecnica è digitale e pertanto significa che il segnale vocale, precedentemente campionato e convertito, è inviato sotto forma di una sequenza di 0 e 1 che rappresentano tensione nulla o tensione a un certo valore soglia. Questo tipo di trasmissione minimizza le interferenze in quanto per avere un cambio di stato, ovvero il ricevitore decide per 1 quando in realtà era stato trasmesso 0, o viceversa, è necessario un rumore sufficientemente elevato.

Come già accennato, la rete GSM possiede due bande di frequenza, 890 – 915 MHz per la comunicazione up-link e 935 – 960 MHz per il down-link. Il sistema GSM utilizza una combinazione delle tecniche di multiplazione a divisione di frequenza (FDMA) e di tempo (TDMA) per la gestione della trasmissione radio. La tecnica FDMA divide la banda di frequenza di 25 MHz in 124 portanti spaziate tra loro di 200 kHz. A ciascuna portante corrisponde un canale di comunicazione radio. La frequenza dell'*n*-esima portante è definita, pertanto, come:

$$f_{\text{UP-LINK}}(n) = 890 + n * 0.2 \text{ MHz} \quad n \in [1, 124] \quad (4.2)$$

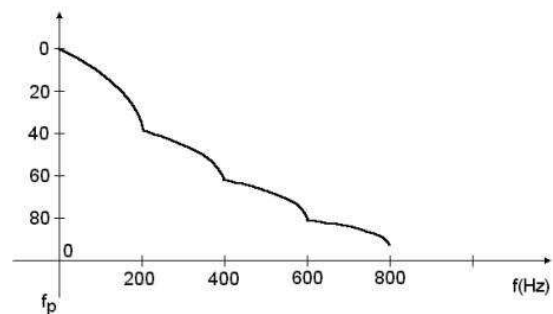
$$f_{\text{DOWN-LINK}}(n) = 935 + n * 0.2 \text{ MHz} \quad n \in [1, 124] \quad (4.3)$$

All'interno della stessa nazione più gestori si devono dividere la banda disponibile. Quindi, le *n* portanti vengono divise per gli *m* operatori assegnando a ognuno *n/m* canali. Inoltre viene applicata la multiplazione a divisione di tempo. Questa tecnica permette di dividere ogni portante in 8 time-slot della durata di 0.577 ms. L'insieme di 8 time-slot, della durata di 4.616 ms, viene definito trama o frame. Un canale è quindi individuato dal *k*-esimo time-slot della *i*-esima trama. In ogni intervallo temporale della trama può essere trasmessa una unità informativa detta burst. In generale, quindi, ogni canale è individuato dal numero di time-slot, di trama e di frequenza portante.

Per non avere simultaneamente ricezione e trasmissione in una Mobile Station, si adotta la metodologia di separare i canali di up-link e down-link anche di 3 time-slot nel tempo. In particolare, se una MS riceve sul *k*-esimo time-slot della *i*-esima portante, ritrasmetterà sul (*k*+3)-esimo time-slot della (*i*-45MHz) – esima portante.

La modulazione digitale più utilizzata è la FSK, Frequency Shift Keying, che trasmette i simboli variando la frequenza della portante. Nella transizione da  $f_0$  a  $f_1$  o viceversa si possono generare dei salti di fase che provocano una discontinuità del segnale con conseguente allargamento dello spettro in frequenza utilizzato. Proprio questo allargamento della banda rende tale modulazione non adatta alle trasmissioni radiomobili. Nasce, quindi, la necessità di ricorrere a una tecnica che garantisce la continuità di fase nel passaggio da un simbolo al successivo. La modulazione scelta per il GSM, come già accennato, è stata la GMSK (Gaussian-filtered Minimum Shift Keying). Tale modulazione deriva dalla MSK (Minimum Shift Keying), con la differenza che la durata del bit è modulata con un impulso gaussiano invece che con uno rettangolare; ciò consente di ridurre la componente fuori banda.

In Figura 4.2.2 è riportata la densità spettrale di una GMSK e si nota subito che a 200 kHz dalla portante le componenti spettrali laterali hanno un'attenuazione di circa 40 dB. Tale situazione è ottimale per il GSM in quanto abbiamo visto che le varie portanti radio distano proprio di 200 kHz tra loro.



**Figura 4.2.2 - densità spettrale della modulazione GMSK**

Il GSM utilizza per la codifica vocale il sistema RPE-LPC con anello di predizione a lungo termine LTP. Tale metodo, descritto nel capitolo 3, è molto resistente agli errori e, pur emettendo un flusso continuo di bit, segmenta la voce in blocchi di durata pari a 20 ms, ossia in campioni sufficientemente statici in modo da poter applicare su di essi i metodi di analisi della griglia di eccitazione (RPE), di sagomatura a breve termine dello spettro del segnale (LPC) e di stima delle correlazioni a lungo termine (LTP).

Per quanto riguarda, invece, la codifica di canale, con lo standard GSM sono state introdotte diverse contromisure per contrastare gli effetti negativi dovuti alle condizioni dell'ambiente in cui si propaga il segnale, come per esempio il fading, la propagazione multipath, l'effetto doppler, le interferenze, ecc., che sono causa di errori sul segnale numerico anche laddove il campo elettromagnetico disponibile al ricevitore sia sufficientemente forte. Le tecniche utilizzate sono perlopiù codici

convoluzionali per la correzione di errori e utilizzano una forte ridondanza che riduce l'efficienza del canale ma non introduce eccessivi ritardi temporali. Il controllo degli errori viene applicato selettivamente a seconda della classe di priorità assegnata alla trama all'uscita del codificatore vocale; i 260 bit della trama vengono suddivisi in tre classi: classe 1a (50 bit), 1b (132 bit) e 2 (78 bit) rispettivamente massima, media e minima priorità. I bit di classe 1 vengono fortemente protetti, quelli di classe 1a sono codificati con un codice che aggiunge 3 bit di parità (Parity Check Bit); in questo modo è possibile rilevare in ricezione l'eventuale fallimento della correzione degli errori di trasmissione. Ai 53 bit così ottenuti vengono affiancati i 132 bit della classe 1b più 4 bit di coda il cui valore è fissato a 0. I 189 bit vengono sottoposti a codifica convoluzionale con rapporto 1:2 (viene aggiunto 1 bit di ridondanza per ogni bit di informazione) che consente la correzione di errori senza la ritrasmissione dell'informazione; si tratta di una correzione FEC (Forward Error Correction). Al ricevitore viene utilizzata una tecnica di decodifica basata sull'algoritmo di Viterbi, le cui prestazioni risultano ottimali qualora i blocchi di informazioni trasmesse terminano con una sequenza nota di bit: ciò spiega la presenza dei 4 bit di coda posti a 0. In uscita dal codificatore si ha così una sequenza di 378 bit, cui vengono aggiunti i 78 bit della classe 2, che non subiscono nessuna ulteriore codifica. Al termine si ha, quindi, un blocco di 456 bit nel segmento di 20 ms equivalente a un bit-rate di 22,8 Kb/s.

Per rendere più efficace il processo della co-decodifica convoluzionale e il meccanismo del FEC risulta necessario minimizzare l'effetto fading di Rayleigh, che si manifesta con la presenza sul ricevitore di errori a burst (a raffica). Esistono varie contromisure, la più adottata è la tecnica dell'interleaving che consiste nel distribuire in modo uniforme su più trame i raggruppamenti di errori introdotti dalla propagazione. Un trattamento preventivo del degrado del segnale è la ricezione in diversità, come già visto nel capitolo 3, che consente di offrire al segnale ricevuto una doppia via rappresentata da percorsi alternativi fra cui il ricevitore può scegliere quello che istante per istante presenta la minore distorsione. Un esempio è il frequency hopping, il cui scopo è quello di diminuire la correlazione del canale fisico con eventuali interferenti. Tale tecnica consente di trasmettere una comunicazione su frequenze portanti diverse a scansione temporale ciclica, mantenendo però lo stesso time-slot assegnato inizialmente. Il frequency hopping, inoltre, rafforza



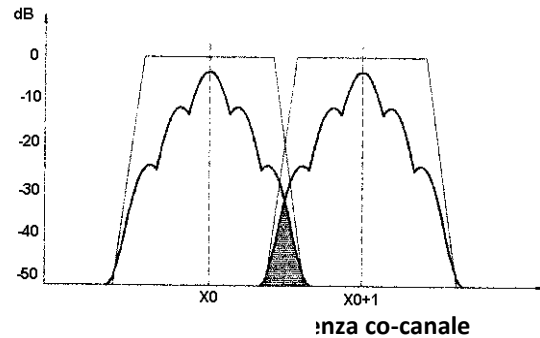
quanto già introdotto dalla tecnica dell'interleaving in quanto se su una cella sono presenti uno o più time-slot con problemi di interferenza, il frequency hopping evita la concentrazione del disturbo ridistribuendolo uniformemente su tutti gli utilizzatori della cella. Tutto ciò serve a minimizzare l'effetto fading, che riguarda l'influenza che gli ostacoli hanno sulla propagazione delle onde elettromagnetiche. Infine, un equalizzatore con capacità adattative potrà compensare le distorsioni di ampiezza e fase subite da segnale radioelettrico nella tratta radio.

Il GSM possiede svariate funzioni molto utili sia per quanto riguarda il risparmio energetico sia per quanto riguarda l'interferenza tra più utenti. Tra queste c'è la DRX, ovvero la ricezione discontinua, che provvede a togliere l'alimentazione a buona parte dei circuiti elettrici dell'apparato quando il MS non è impegnato in una conversazione e mantiene l'apparato spento per la maggior parte del tempo attivandolo solo durante brevi intervalli per mantenere il contatto con la rete. In questo modo si ottiene un risparmio sulla durata della batteria fino al 90%. Con la trasmissione discontinua si spegne il trasmettitore radio durante le pause di emissione della voce dell'utente, in quanto si suppone che l'attività vocale di un parlatore corrisponda più o meno al 50 % del tempo totale di conversazione. Tale tecnica consente un notevole risparmio di energia e riduce l'interferenza media in tutta l'area PLMN. L'attivazione di tale funzione richiede che la rete sia preventivamente informata sia per evitare la soppressione della chiamata sia perché le misure di livello ricevuto ai fini delle misure di qualità siano eseguite solo nelle trame effettivamente ricevute. L'algoritmo DTX analizza lo spettro del segnale vocale e riconosce le pause del parlato quando l'attività è ferma per almeno 4 campioni vocali e genera un'opportuna informazione SID (Silence Indicator).

Siccome il segnale viaggia con velocità finita e impiega un tempo non nullo per propagarsi dalla Mobile Station alla SRB, è importante che l'emissione di ogni MS sia confinata all'interno del time-slot assegnato. Per garantire che non vi sia sconfinamento tra i vari time-slot viene utilizzata la tecnica del Timing Advance: la SRB invia un apposito messaggio alla MS che risponde istantaneamente. In questo modo può calcolare il ritardo e trasmettere l'informazione di Timing Advance alla MS, la quale provvede ad anticipare le finestre temporali di trasmissione e ricezione fino a centrare il time-slot nominale. Al variare della posizione della stazione

mobile, l'SRB provvederà a segnalare la riduzione del Timing Advance nel caso di avvicinamento al centro della cella o di aumentarlo man mano che si allontana.

Una delle funzioni più importanti implementate dallo standard GSM è il Power Control, tecnica di controllo dinamico della potenza trasmessa. Essa prevede la regolazione della potenza fino 30 dB (a passi di 2 dB) al di sotto della potenza massima consentita, eseguendolo in modo indipendente per



ogni time-slot. Tale controllo viene attuato sui dispositivi in modo da ridurre al massimo l'interferenza co-canale: se un MS si trova nei pressi della SRB, e quindi le attenuazioni dovute alla distanza sono ridotte, è sufficiente che utilizzi un livello di potenza minimo, al contrario del caso in cui si trovi ai bordi della cella. Tali tecniche mirano a limitare quanto più possibile le emissioni radioelettriche e a massimizzare l'efficienza spettrale mediante il controllo dell'interferenza co-canale.

### 4.2.3 UMTS

I sistemi di seconda generazione hanno delle limitazioni che hanno portato all'avvento dei sistemi di terza generazione (3G), come per esempio l'UMTS. Tali limitazioni sono dovute alla completa standardizzazione di tutte le interfacce e i protocolli che costituiscono il sistema GSM, vantaggioso in quanto consente l'interoperabilità tra apparati di costruttori diversi ma diventa un ostacolo all'introduzione di nuovi servizi che spesso richiedono una sostanziale modifica sia hardware sia software. Inoltre i sistemi di seconda generazione sono limitati dalla loro struttura verticale, e quindi ogni miglioria o aggiunta di prestazione, coinvolge l'intera rete.

Tali limitazioni, con l'aggiunta di uno spettro radio ristretto, hanno portato alla definizione dello standard 3G, pensato come soluzione del terzo millennio, in grado di offrire le prestazioni e la flessibilità necessarie a fornire i servizi che la società dell'informazione richiede: i media (news, oroscopo, previsioni del tempo, informazioni sportive, ecc), l'entertainment (giochi, ascolto musica, videoclip), commercio elettronico (acquisti on-line) e una larga diffusione di internet. Il passaggio dalla tecnica analogica a quella digitale ha annullato la distinzione tra

comunicazioni riguardanti fonìa, immagini o dati, integrandole in un unico sistema (sistema multimediale) che comporta l'esigenza di uno scambio di informazioni digitali sempre maggiore. Due tra i servizi multimediali più diffusi che l'UMTS è in grado di offrire, sono l'invio di MMS (Multimedia Messaging Service) e l'effettuazione di videochiamate. Il primo arricchisce il servizio già offerto dagli SMS consentendo di inviare messaggi di testo con l'aggiunta di immagini, suoni e video. Il secondo, solo per terminali dotati di telecamera, consente la comunicazione tra utenti non solo audio ma anche video, rendendo più efficace ed espressiva la comunicazione. In Europa lo standard sviluppato per i sistemi di terza generazione è noto come UMTS (Universal Mobile Telecommunication System).

Per le applicazioni UMTS possono essere identificate quattro classi di traffico:

- Conversazionali (servizio voce e videotelefonìa);
- Streaming (tecnica per il trasferimento dati sottoforma di flusso informativo costante e continuo);
- Interattiva (l'utente finale è online e richiede dati a un apparato remoto, web browsing, reperimento di dati);
- Background (traffico dati relativo a e-mail, SMS, ricezione di e-mail, download di database e ricezione di record).

Il sistema di trasmissione dell'UMTS occupa due segmenti dello spettro a radiofrequenza 1885-2025 MHz e 2110-2200 MHz comprendente sia i sistemi terrestri che satellitari. I primi 20 MHz di banda sono assegnati al sistema DECT (Digital European Cordless Telephone), quindi la banda esclusiva per l'UMTS è compresa tra 1900 e 2025 MHz. (1920-1980 MHz e 2110-2170 MHz Componente FDD e 1900-1920 MHz e 2010-2025 MHz Componente TDD). Il segnale occupa una banda di circa 5 MHz. Lo spettro viene suddiviso in porzioni assegnate ai vari operatori, ognuno dei quali ottiene un certo numero di bande di frequenza, solitamente 3 o 4. L'aspetto più innovativo riguarda l'utilizzo di una tecnica di accesso multiplo mediante l'utilizzo di codici, la tecnica CDMA, che sostituisce il TDMA utilizzato per il GSM. La banda di 5 MHz è utilizzata contemporaneamente da più utenti, le cui comunicazioni vengono distinte mediante l'uso di opportuni codici usati sia in up-link che in down-link, i codici di spreading, sequenze pseudo casuali di

8 bit detti chip. La moltiplicazione di un flusso informativo con un codice di spreading ha l'effetto di spalmare l'informazione su una banda generalmente maggiore di quella richiesta dal segnale sorgente: il rate della sequenza in uscita sarà  $n$  volte il rate della sequenza di informazione, dove  $n$  è la lunghezza del chip. La lunghezza della parola di codice è detta Spreading Factor (SF) e determina l'allargamento spettrale del segnale. Per formare tale codice di spreading occorre rappresentare ciascun bit della sequenza di segnale per mezzo di una sequenza di codice; se immaginiamo un tipico segnale polare, il suo spreading sarà ottenuto rappresentando ogni bit pari a 1 con una certa sequenza  $c(t)$  e ogni bit -1 mediante la sequenza negata di  $c(t)$ . Tale operazione è semplicemente ottenibile moltiplicando la sequenza di informazione per la sequenza  $c(t)$ . Risulta subito evidente, come già accennato, che tale operazione aumenta sensibilmente la frequenza di cifra e conseguentemente l'occupazione spettrale incrementa. Per separare i contenuti informativi generati da diverse sorgenti, lo standard CDMA prevede l'utilizzo dei codici di scrambling. Successivamente all'operazione di spreading, il segnale viene moltiplicato chip a chip per opportune sequenze chiamate codici di scrambling o PseudoNoise. Lo scrambling viene utilizzato per diverse funzionalità: per aumentare la capacità del sistema in termini di canali disponibili, consentendo di riutilizzare lo stesso spreading nelle celle adiacenti poiché viene variato lo scrambling; produce rimescolamenti tra i chip generati dallo spreading in modo da evitare la formazione di lunghe sequenze di chip uguali tra loro che ridurrebbero la banda del segnale rispetto a quella nominale; irrobustisce le sequenze informative rispetto ai ritardi temporali dovuti a fenomeni di multipath, che tenderebbero a degradare l'ortogonalità dei codici. I codici di scrambling vengono utilizzati in up-link per discriminare differenti AM; in down-link per discriminare celle differenti, consentendo il riuso dei codici di spreading. I codici di spreading vengono, invece, utilizzati in up-link per discriminare i canali fisici di dati dal canale fisico di controllo e i canali di dati fra di loro, sempre relativi allo stesso terminale (stesso scrambling); in down-link per discriminare differenti canali fisici di una stessa cella.

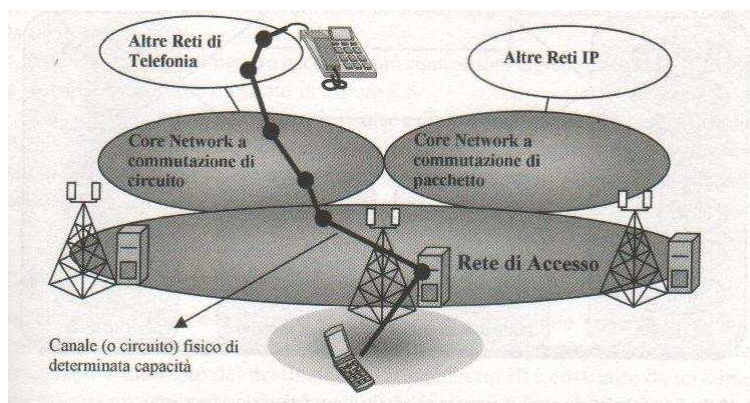
Relativamente alla separazione dei flussi informativi sulle tratte up-link e down-link, sono previste due modalità di trasmissione: la prima, detta FDD (Frequency Division Duplexing), porta a una separazione dei due flussi nel dominio delle frequenze così

come avviene nel GSM, mentre la seconda, TDD (Time Division Duplexing), attua una separazione nel dominio del tempo allocando, anche dinamicamente, intervalli temporali diversi per il down-link e per l'up-link pur impegnando la stessa banda di frequenze. La seconda tecnica, TDD, è molto utile nei casi di trasmissione e ricezione sbilanciati perché permette una allocazione ottimizzata delle risorse.

In realtà, nella tecnologia UMTS non è utilizzata la moltiplicazione CDMA vera e propria ma una doppia modalità di accesso multiplo costituita da due sue varianti: W-CDMA e TD-CDMA. La prima, Wideband CDMA, utilizza il principio del CDMA a sequenza diretta con un chip-rate elevato, mentre la Time Division CDMA prevede la combinazione tra la tecnica W-CDMA e la TDMA. Tale tecnica, dopo aver suddiviso la trama in diversi time-slot, ne assegna uno a più utenti sovrapponendo i rispettivi flussi informativi con la tecnica a divisione di codice. Su ciascuna portante radio sarà, quindi, disponibile un notevole numero di canali pari al prodotto del numero di time-slot per il numero di codici disponibili.

La trama dell'UMTS, di durata pari a 10ms, è costituita da 15 time-slot, ognuno di durata 666.7  $\mu$ s e contiene un numero di simboli variabile a seconda della velocità di trasmissione. La terminologia di trama e time-slot sono validi solo nel caso di moltiplicazione TD-CDMA; nel caso WCDMA, in cui i segnali trasmessi non subiscono segmentazione, il termine trama viene comunque utilizzato per identificare il blocco minimo di trasmissione in cui la velocità è mantenuta costante: la velocità può, quindi, variare ogni 10 ms.

Dato che, come già accennato, la tecnica di moltiplicazione è



**Figura 4.2.4 - Architettura di rete UMTS**

completamente diversa da quella utilizzata nel GSM, anche l'architettura sarà costituita da elementi completamente nuovi, a parte la Core Network che è, invece, un'evoluzione di quella presente nelle tecnologie 2G. L'utilizzo di terminali dual mode, che consentono di utilizzare sia la tecnologia GSM sia UMTS, permette di usufruire della copertura 2G dove quella 3G non è ancora presente. Anche i terminali mobili richiedono delle caratteristiche più innovative per poter sfruttare al

meglio i tanti servizi multimediali offerti dalla terza generazione. Sono dotati di grandi display a colori, telecamera integrata e batteria di buona capacità. Possiedono dei veloci processori, grandi memorie e veri e propri sistemi operativi. Per quanto riguarda l'architettura di rete, sono presenti l'UMTS Radio Access Network (UTRAN) e la Core Network (CN). La prima è composta dalle SRB e da tutti gli elementi che consentono la gestione della comunicazione radio con i terminali mobili, la seconda, responsabile della commutazione e dell'instradamento delle chiamate e della connessione con le reti esterne, si interconnette con la rete di accessi e con le altre reti telefoniche, consentendo le chiamate voce e dati.

Come già detto, l'aspetto chiave dell'UMTS è di offrire servizi multimediali, anche di natura differente, con grande flessibilità. In base alle esigenze di QoS (Qualità di Servizio) si effettuano connessioni a circuito o a pacchetto. I servizi Real Time sono offerti mediante connessione al circuito, mentre i servizi Non Real Time sono offerti mediante modo di trasferimento a pacchetto.

L'UMTS utilizza diversi canali dedicati, ovvero quelli su cui transitano le chiamate a circuito e la maggior parte del traffico a pacchetto. Sono di due tipi: il DPDCH (Dedicated Physical Data Channel), che trasporta le informazioni utente e il DPCCCH (Dedicated Physical Control Channel), associato al DPDCH, che trasporta informazioni di controllo fisico per consentire il mantenimento di una buona qualità di comunicazione sul canale dati. I canali fisici presenti in una cella corrispondono al numero di codici che possono essere associati a ogni utente: il limite al numero di canali è determinato dal degrado della qualità della comunicazione. Esiste, nell'UMTS, la funzionalità SCR (Source Controlled Rate) che consiste nel trasmettere, durante le pause delle persone coinvolte nella conversazione telefonica, le informazioni che codificano il rumore di fondo con un bit rate molto inferiore rispetto a quello usato per trasmettere la voce; ciò comporta una notevole riduzione del consumo della batteria e dell'interferenza generata dal terminale. I canali logici sono suddivisi in canali di controllo (BBCH, PCCH, DCCH, CCH) e canali di traffico (DTCH, CTCH). I canali di controllo hanno la funzione di trasportare le informazioni di segnalazione e di controllo per consentire la raggiungibilità dell'utente, l'instaurazione, il mantenimento, la modifica e l'abbattimento delle connessioni. I canali di traffico trasportano il traffico utente vero e proprio. Il canale DTCH, Dedicated Traffic Channel, è un canale bidirezionale, dedicato, che trasporta

l'informazione utente. Viene configurato sul DCH (Dedicated Transport Channel), il quale, per il traffico d'utente, viene a sua volta trasportato dal canale DPDCH. Buona parte della capacità del DPDCH viene impiegata per operazioni di protezione da errori introdotti dal canale radio. Nei casi in cui il traffico non è molto elevato, invece che usare il canale dedicato DCH, possono essere impiegati i canali comuni sia DSCH (Downlink Shared Channel) sia FACH (Forward Access Channel) in down link e i canali CPCH (Common Packet Channel) oppure RACH (Random Access Channel) in up-link. Il Common Traffic Channel (CTCH) è un canale punto-multipunto, monodirezionale che trasporta il traffico diretto a uno o più utenti; viene trasportato dal FACH. Per quanto riguarda i canali di controllo, il BCCH, Broadcast Control Channel, è il canale che viene impiegato in down-link per trasmettere informazioni specifiche di cella e della rete, come per esempio l'identità della PLMN, l'identificativo di cella o di location area. Tale canale viene trasportato dal BCCH/P-CCPCH (Primary Common Control Physical Channel) e dal FACH/S-CCPCH (Secondary Common Control Physical Channel). Il PCCH, Paging Control Channel, viene impiegato nelle procedure in cui la rete deve iniziare una comunicazione con un mobile. Tale canale viene trasmesso sul PCH (Paging Channel) e dal S-CCPCH (Secondary Common Control Physical Channel). Il CCCH, Common Control Channel, è un canale bidirezionale per il trasporto delle informazioni di controllo; viene configurato sui canali RACH per up-link e FACH per down-link. Infine, il DCCH, Dedicated Control Channel, è un canale logico bidirezionale, dedicato, che trasporta l'informazione di segnalazione e di controllo della chiamata, Durante una telefonata, per esempio, trasporta il numero di telefono, il tipo di chiamata da effettuare, le informazioni di autenticazione, le misure dei segnali ricevuti dalle celle adiacenti, i messaggi di handover, ecc. Viene trasmesso dal DCH e dal DPDCH. In aggiunta ai canali fisici ne esistono altri non visibili ai livelli superiori in quanto svolgono funzionalità solo di livello fisico. Essi sono il Synchronization Channel (SCH), impiegato per la sincronizzazione, il Common Pilot Channel (CPICH), usato per trasmettere il codice di scrambling della cella, e molti altri. In aggiunta a tali canali comuni c'è il Dedicated Physical Control Channel (DPCCH) che trasporta l'informazione di controllo del livello fisico.

Una particolare tecnica, introdotta per ridurre il livello di diffusione radioelettrica nella rete, è l'ODMA (Opportunity Driven Multiple Access), che serve a far

funzionare gli AM come dei ripetitori in grado di ritrasmettere il segnale proveniente dalla BTS verso altri mobili meno raggiungibili dalla rete; in questo modo si ottiene un'elevata copertura anche con livelli molto bassi di potenza trasmessa. Per la componente che utilizza l'accesso multiplo TD-CDMA, si utilizza una modulazione QPSK in entrambi i sensi di trasmissione. Il segnale modulante viene suddiviso in due flussi moltiplicati per le sequenze di spreading. Viene poi effettuata la vera operazione di modulazione ottenuta su due sottoportanti in quadratura che generano i flussi I e Q la cui somma origina il segnale QPSK. La componente WCDMA, invece, usa tale modulazione solo per la tratta down-link, mentre per l'altra tratta lo schema adottato è denominato dual code-BPSK: i due canali DPDCH e DPCCH vengono trasmessi in modo indipendente sugli assi I e Q del modulatore e moltiplicati per due sequenze di spreading diverse. Per la e demodulazione non vi sono particolari prescrizioni per il ricevitore ma sono definite alcune funzionalità, come quelle per l'esecuzione di Power Control e della procedura di Handover.

Nel GSM, la distorsione prodotta dal canale sul segnale ricevuto comportava grandi difficoltà nella ricostruzione. Nella tecnologia 3G, invece, la dispersione nel tempo dell'energia trasmessa diventa un vantaggio perché sfruttando le proprietà della sequenza di spreading è possibile separare i vari echi e ricombinare la loro energia in modo costruttivo. Tale proprietà, nota come diversità di cammino, è positivamente sfruttata mediante il "rake receiver", tecnica che implementa un insieme di numerosi ricevitori identici tra loro, in cui l'operazione di de-spreading viene per ognuno ritardata di un tempo  $\tau$ . Ogni eco che presenta un ritardo pari a multipli di  $\tau$ , viene correttamente demodulato da uno dei ricevitori; successivamente i segnali demodulati vengono allineati in funzione della fase di simbolo e vengono sommati, ottenendo la combinazione costruttiva. Un'altra interessante proprietà è la capacità di cancellazione di interferenze e ricezioni multiple, Joint Detection: tale tecnica, a differenza del rake receiver che estrae dal segnale ricevuto solo il segnale utile considerando tutti gli altri come interferenti, considera tutti i segnali come utili e conoscendo le sequenze di spreading di tutti gli utenti attivi, riesce a demodulare contemporaneamente tutti gli utenti della stessa cella.



La funzionalità del rake receiver risulta efficace solo laddove i ritardi introdotti dal canale trasmissivo sulle repliche del segnale risultino maggiori del tempo di chip; se il ritardo è inferiore, infatti, non si riescono a sfruttare le proprietà dei codici e in tali casi i fenomeni di fast fading possono essere contrastati solo attraverso una procedura veloce e reattiva come il power control. Il power control è estremamente importante per l'UMTS, in quanto i mobili di una cella operano tutti nella stessa frequenza e sono distinti solo dai codici; è necessario che le comunicazioni interferiscano il meno possibile le une con le altre. Questo implica che la potenza sia in down-link sia in up-link debba essere necessariamente la minima necessaria a garantire il servizio: un cattivo controllo della potenza di trasmissione comporta un incremento del rumore con conseguente decadimento della qualità del collegamento radio e della capacità della cella. Anche lo spostamento del mobile all'interno della cella richiede una regolazione della potenza tale da non creare problemi agli altri utenti. Mediante il meccanismo di controllo di potenza ad anello chiuso (fast power control), le due potenze dei terminali mobili possono essere ricevute allo stesso livello dalla SRB. La SRB effettua frequenti stime, sulla tratta uplink, del rapporto Segnale/Interferente (SIR) e lo confronta con un valore di riferimento. Se il SIR rilevato è maggiore del SIR di riferimento, la SRB ordina al terminale mobile di ridurre la propria potenza; se invece il valore è troppo basso, la stazione radio base richiede al mobile di aumentare la propria potenza. Il ciclo misura-comando reazione è eseguito 1500 volte al secondo per ogni SRB; il controllo di potenza ad anello chiuso è quindi in grado di prevenire ogni possibile squilibrio di potenza tra tutti i segnali che la SRB riceve.

Le operazioni di power control si suddividono in Open Loop Power Control, Inner Loop Power Control e Outer Loop Power Control. In up-link l'Open Loop Power Control è localizzato nell'apparato mobile e determina, nella fase di inizio della chiamata, la potenza di trasmissione; il terminale, misurando il livello di segnale ricevuto e conoscendo la potenza di emissione della BTS, effettua una stima dell'attenuazione della tratta. L'algoritmo dell'Inner Loop Power Control, presente sia nell'AM che nella BTS, viene eseguito nella fase della comunicazione 1500 volte al secondo e si occupa del controllo puntuale del segnale in entrambe le tratte al fine di avere il SIR (Signal to Interference Ratio) del collegamento uguale al SIR di riferimento, detto SIR target. Tale valore viene valutato, 10-100 volte al secondo,

dall'Outer Loop Power Control, valutando la qualità della connessione radio. All'instaurarsi di una procedura qualunque che implichi per la prima volta una comunicazione tra AM e BTS è necessario che il terminale mobile utilizzi un'adeguata potenza di trasmissione. Non essendoci nessuna sorta di dialogo aperto, il mobile deve richiedere il collegamento trasmettendo un valore di potenza che lo renda il meno possibile interferente con le altre comunicazioni già in corso. Non si inizia, pertanto, come nel GSM, trasmettendo potenze elevate per poi diminuirle, ma si procede nel modo opposto: si parte da un valore minimo reputato sufficiente per poi eventualmente alzarlo fino alla ricezione di un ACK inviato dalla rete. Il mobile deve essere informato della situazione della cella in cui si trova in quanto distanza, carico e tipologia di traffico influenzano la potenza necessaria per il collegamento radio. Tutte queste informazioni sono fornite dalla rete mediante il BCH canale che viene continuamente ascoltato dal mobile. Per stimare l'attenuazione del canale radio, il mobile ascolta il CPICH, ovvero il segnale pilota della BTS che trasporta solo il codice di scrambling, misura la potenza ricevuta e la confronta con la potenza dichiarata nel broadcast channel. Terminata la fase di accesso, l'AM avrà allocato dei canali fisici dedicati, sui quali l'Inner Loop Power Control ha il compito di controllare la potenza. La BTS e il mobile si scambiano 1500 comandi al secondo per far sì che la potenza emessa dall'altra entità sia la minima che garantisca la qualità del collegamento voluto. Il SIR è il rapporto segnale/interferente necessario per soddisfare i requisiti di qualità del servizio richiesto e viene aggiornato dalla procedura di Outer Loop Power Control.

La procedura di Handover, già descritta nel capitolo 3, è una funzionalità radio che da continuità di servizio in mobilità. Quando l'apparato mobile si sposta verso un'altra cella e raggiunge la zona di confine di quella in cui si trova, la rete deve attivare un collegamento radio nel nuovo settore senza creare interruzioni di servizio. Tale procedura può essere eseguita anche per la copertura 3G o verso altre tecnologie di accesso, per esempio quando il dispositivo si trova in una zona di confine tra il 3G e il 2G (in tal caso si effettua un Inter System Handover), oppure quando si passa da FDD a TDD eseguendo un FDD/TDD Handover (Intra System Handover). Tale funzionalità può anche essere suddivisa in Hard e Soft Handover: nel primo caso, nel passaggio da una cella a un'altra la rete lascia la connessione radio con il primo settore utilizzando immediatamente il collegamento nella nuova

cella; trattandosi di un cambio brusco si parla di Hard Handover. Nel secondo caso, passando dalla prima alla seconda cella il terminale mantiene due collegamenti contemporaneamente attivi; trattandosi di un cambio graduale si parla di Soft o Softer Handover: se il mobile è connesso a cella appartenenti alla stessa SRB si parla di Handover Softer, se è connesso a due canali di due SRB differenti allora si dice Handover Soft.

Quando il terminale non è impegnato in una conversazione si dice che si trova in uno stato di idle. Come già descritto nel paragrafo riguardante il GSM, l'apparato deve scegliere una cella della rete nella quale potersi mettere in ascolto dei canali di segnalazione in attesa di possibili servizi entranti. Dato che diverse reti sono sovrapposte in un determinato punto, per esempio reti di operatori diversi, o reti operanti in modalità 2G o 3G, la scelta della cella non è una decisione semplice. Normalmente il mobile sceglie una cella della rete di appartenenza e il cui segnale sia ricevuto meglio rispetto a quello delle altre celle. La rete deve conoscere in ogni momento la localizzazione degli utenti e, per questo motivo, scambia informazioni con i vari apparati mobili anche se si trovano in idle state. Ma nel caso in cui un mobile venga acceso per la prima volta e non abbia informazioni sulla sua localizzazione è sufficiente che si ponga in ascolto in quanto la rete invia sul canale di segnalazione BCCH le informazioni relative alla rete, alla nazione, operatore, identificativo della location area e identificativo della cella. Viceversa, quando il mobile deve comunicare la sua posizione, invia alla rete l'identificativo della location area della cella in cui si trova che viene memorizzato nel registro VLR. Tale informazione va trasmessa ogni volta che mobile cambia location area e comunque vengono scambiate informazioni periodicamente per tenere aggiornati i vari registri della rete. La procedura di paging consiste nella ricerca dell'utente da parte della rete quando ci sono servizi entranti a lui indirizzati. Quando il mobile riceve il paging, inviato in broadcast all'interno della location area in cui dovrebbe trovarsi, e riconosce il proprio identificativo invia una richiesta di servizio; le due procedure in cui il telefono rende noto alla rete la sua accensione o spegnimento sono dette IMSI attach e IMSI detach. In tal modo, se la rete sa che tale utente ha inviato un IMSI detach e arriva per lui una chiamata, non inizia inutilmente una procedura di paging e informa il chiamante che l'utente non è attivo oppure inoltra la chiamata alla segreteria telefonica.

Le varie reti radiomobili appartenenti a operatori diversi o con tecnologia differenti sono chiamate PLMN (Public Land Mobile Network) e sono interconnesse fra loro per poter offrire sempre maggiori servizi. La possibilità di poter usufruire di servizi presso un operatore diverso dal proprio viene definito roaming. Il roaming può essere Nazionale o Internazionale; se si viaggia in altri stati, è comunque possibile utilizzare il proprio telefonino utilizzando i servizi di una rete estera e ciò viene denominato roaming internazionale. Nel caso di roaming nazionale, il nostro apparato mobile può utilizzare i servizi offerti da una rete appartenente a un altro operatore; in tal caso il mobile effettua periodicamente una scansione per cercare la propria rete. Tale procedura può essere utilizzata, per esempio, quando un nuovo operatore entrante nel mercato offre i propri servizi attraverso le reti di altri operatori, oppure quando un operatore ha scarsa copertura in una certa zona e richiede l'apertura del servizio a un altro gestore. La rete è normalmente selezionata automaticamente dal mobile ma è anche possibile selezionarla manualmente; in tal caso sulla SIM vi sono delle informazioni per pilotare la scelta e in particolare sono indicate le reti che non possono essere selezionate. Dopo la scelta della rete, il mobile deve scegliere la cella, mediante le procedure di cell selection e cell reselection. Tali procedure sono svolte automaticamente dall'apparato; la selezione della cella avviene quando viene acceso il telefonino o in ogni caso di accesso alla rete. La rilesione si attiva quando il mobile cambia settore e si aggancia a una nuova cella in cui il segnale è ricevuto meglio; ciò può accadere quando l'utente si sposta oppure può avvenire a terminale fermo in quanto i segnali ricevuti dalle varie celle, per fenomeni di propagazione, sono fluttuanti nel tempo. Una cella è ritenuta idonea se ha qualità del segnale ricevuto e livello di segnale ricevuto maggiori di due soglie minime definite dall'operatore.

Per quanto riguarda la sicurezza delle comunicazioni, come già visto, il GSM ha introdotto delle funzionalità di autenticazione e cifratura molto efficaci per superare il limite dei precedenti sistemi analogici. La grande varietà di nuovi servizi offerti dall'UMTS ha richiesto che venissero impiegate funzionalità ancora più evolute e accurate per garantire un sistema estremamente robusto rispetto alle problematiche di confidenzialità e sicurezza. Al fine di garantire la confidenzialità dell'identità e della localizzazione dell'utente vengono usati identificativi temporanei. Quasi tutti i messaggi che transitano sull'interfaccia radio vengono

cifrate ma alcuni messaggi non possono essere protetti: quando un utente accede alla rete deve farsi "riconoscere" e tali messaggi devono essere inviati in chiaro; possono consentire a un utente di venire a conoscenza della location area in cui si trova l'utente. A tal fine, invece di usare l'IMSI, vengono utilizzate delle identità temporanee, TMSI (Temporary Mobile Subscriber Identity). L'associazione IMSI-TMSI viene mantenuta nel registro VLR, e questi identificativi temporanei vengono cambiati frequentemente dalla rete. Nell'UMTS utente e rete eseguono una mutua autenticazione in modo che sia garantita la comunicazione tra le giuste entità. L'autenticazione dell'utente è importante per evitare frodi e per garantire l'accesso alla rete solo ai sottoscrittori del servizio. L'autenticazione della rete garantisce all'utente che sta comunicando con la rete corretta. L'autenticazione dell'utente non avviene mediante l'invio di identificativo e password in quanto potrebbe essere facilmente ascoltato da intrusi e utilizzato per autenticarsi alla rete fingendosi tale utente. La metodologia utilizzata è, quindi, più complessa: esiste una chiave segreta  $K$  registrata in modo sicuro nella SIM dell'utente che non viene trasmessa in chiaro ma viene preventivamente elaborata da un funzione  $f_2$  che la unisce a un numero generato casualmente dalla rete. Il numero casuale viene inviato anche al mobile che lo unisce a  $K$  mediante la medesima funzione  $f_2$  e se i due risultati coincidono l'utente viene autenticato. Per l'autenticazione della rete, viene generato nuovamente un numero casuale e un valore di SQN (Sequence Number) che opportunamente combinati con il  $K$  dell'utente mediante due funzioni,  $f_1$  e  $f_5$ , danno in uscita due valori che sono inviati all'utente. Anche l'AM svolgerà i medesimi calcoli e se le uscite sono le medesime è sicuro che la rete è quella giusta: solo la rete presso cui l'utente è registrato, infatti, conosce la sua chiave segreta  $K$ .

Sia nel GSM sia nell'UMTS i dati vengono cifrati per ottenere una protezione contro l'intercettazione e l'ascolto della comunicazione. La cifratura viene applicata sia ai dati di utente sia alle segnalazioni. Per il calcolo della chiave di cifratura viene impiegato il medesimo metodo impiegato per l'autenticazione dell'utente, utilizzando la chiave  $K$  e un numero casuale ed elaborandoli mediante un'altra funzione,  $f_3$ . Tale chiave di cifratura verrà utilizzata assieme ad altri parametri per calcolare, mediante l'algoritmo di cifratura,  $f_8$ , la sequenza chiave con cui verrà fatta la somma binaria con i dati da trasmettere per cifrarli. In ricezione verranno effettuate le analoghe operazioni per estrarre la sequenza ricevuta. Come ulteriore

protezione per il trasporto della segnalazione è stato introdotto l'Integrity Protection. Tale algoritmo consente al ricevente di essere sicuro che i dati trasmessi non siano stati alterati o manipolati da un intruso che si interpone tra AM e SRB. Si aggiunge, quindi, un blocco, MAC-I, nelle unità informative da trasmettere che contiene  $K$  opportunamente mascherato, e garantisce l'integrità della comunicazione. La chiave di integrità viene calcolata elaborando  $K$  e un numero casuale mediante la funzione  $f_4$  e viene utilizzata assieme ad altri parametri per calcolare, mediante la funzione  $f_9$ , il blocco MAC-I che verrà poi confrontato, in fase di ricezione dall'utente, con quello ricevuto.

## 5. Esposizione Della Popolazione – Normativa

---

Di seguito sono elencate le normative e le leggi attualmente in vigore riguardanti la protezione dell'esposizione a campi elettromagnetici a RF:

- Ministero dell'Ambiente – Ministero delle Comunicazioni Ministero della Sanità  
**Decreto 10 settembre 1998 n. 381**  
**“Regolamento recante norme per la determinazione dei tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana”**  
(G.U. Serie Generale, n. 257, 3 novembre 1998)  
**Linee guida applicative**
- **Legge 22 febbraio del 2001, n. 36**  
**“Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici”**  
(G.U. Serie Generale, n. 55 del 7 marzo 2001)
- **DPCM 08/07/03**  
**“Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz.”.**  
(Gazzetta Ufficiale n. 200 del 29 agosto 2003)
- **Legge Regionale 4 novembre 2005, n. 25**  
**“Disciplina per l'installazione, la localizzazione e l'esercizio di stazioni radioelettriche e di strutture di radiotelecomunicazioni”.**

Negli ultimi anni vi è stata una vera e propria esplosione di utenti che utilizzano il servizio radiomobile, indipendentemente dal fatto che utilizzino tecnologie di seconda o di terza generazione. Con l'aumentare delle utenze è stato necessario, per gli operatori, aumentare il numero di stazioni radio base presenti sul territorio, oppure aumentarne la potenza o, ancora, variare le posizioni dei vari settori, in modo da poter servire tutti gli utenti connessi alla rete. Tale aumento di dimensioni della rete ha portato l'opinione pubblica a riflettere sulla possibilità che le onde elettromagnetiche emesse da tali sorgenti, in numero sempre crescente e sempre più immerse nel tessuto urbano, possano causare gravi danni alla salute. Si dispone di un numero limitatissimo di studi epidemiologici relativi agli effetti sanitari a lungo termine, in particolare la cancerogenesi e gli effetti sulla riproduzione e sul sistema nervoso. Il problema è che per svolgere tali tipo di studi è necessario individuare popolazioni in numero sufficiente con modalità di esposizione ai campi ad alta frequenza conosciute o stimabili, e di seguire tali popolazioni per periodi di tempo di durata adeguata. Questi requisiti sono molto difficili da raggiungere, e chi si è cimentato con queste tematiche ha spesso dovuto ripiegare su valutazioni indirette dell'esposizione, basate sulla residenza o sulla professione svolta a seconda che si prendessero in esame i rischi ambientali legati a fonti di esposizione presenti nei luoghi di lavoro o nelle abitazioni. Il quadro delle conoscenze che ne consegue risente del fatto che si è considerato un grande intervallo di frequenze e un eterogeneo insieme di modalità di esposizione (dalla residenza in prossimità di impianti per emittenza radiotelevisiva all'uso di apparecchiature industriali e microonde) e di effetti sanitari (incidenza di leucemia, prevalenza di alterazioni cromosomiche, mortalità per cause specifiche). Inoltre, il breve lasso di tempo, una quindicina di anni, trascorso dall'inizio dell'esposizione alle onde dovute alla telefonia mobile non consente di apprezzare eventuali rischi a lungo termine, anche se il numero di soggetti esposti è senz'altro molto elevato.

Sono state create, in Italia, delle leggi ad hoc che impongono dei limiti piuttosto restrittivi da rispettare qualora vi sia un'esposizione reale e prolungata di persone a tali agenti fisici. I limiti previsti dalla normativa italiana si discostano da quelli europei sia come concezione sia come valore numerico. Il legislatore italiano ha inteso seguire un principio di protezione dagli effetti acuti, mediante l'introduzione del limite di esposizione, e una protezione da eventuali effetti a lungo termine



dovuti a un'esposizione prolungata a valori di campo ben inferiori a quelli responsabili degli effetti acuti. A questo principio risponde la fissazione dei valori di attenzione. Inoltre, la normativa italiana prevede l'obiettivo di qualità come valore cui tendere al fine di una progressiva minimizzazione dell'esposizione. In particolare, il limite di esposizione non deve essere superato in alcuna condizione di esposizione della popolazione e dei lavoratori. Il valore di attenzione non deve mai essere superato nelle aree gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenza di persone non inferiore a quattro ore giornaliere. Infine, l'obiettivo di qualità è il valore sotto il quale devono rimanere le stime e le misure eseguite in aree intensamente frequentate. Per aree intensamente frequentate si intendono aree aperte e superfici edificate ovvero attrezzate permanentemente per il soddisfacimento di bisogni sociali, sanitari e ricreativi. La normativa europea non prevede nessuna misura di cautela verso eventuali effetti a lungo termine.

Lo studio dell'interazione dei campi elettromagnetici con gli organismi biologici è fondamentale per meglio comprendere la problematica e per definire le basi scientifiche della protezione. Gli organismi biologici sono sistemi complessi, all'interno dei quali coesistono vari livelli di organizzazione, con valenze strutturali e funzionali interdipendenti ed essenziali per la vita dell'organismo stesso. Con il termine interazione non si considera solo lo studio dei fenomeni fisici legati all'assorbimento di energia elettromagnetica da parte delle più piccole particelle costituenti la materia biologica (cariche elettriche e molecole), ma anche gli effetti biofisici (membrane), biochimici (citoplasma), biologici (cellula) e sanitari (organismo intero).

Il corpo umano non è dotato di organi sensibili all'energia elettromagnetica, intesa in senso tradizionale; è invece sensibile all'energia luminosa, che si dimostra essere una particolare forma di energia elettromagnetica in un ristretto campo di frequenze. L'uomo non è, quindi, in grado di percepire direttamente l'irradiazione di un campo elettromagnetico se non per gli effetti secondari che questa forma di energia può produrre. Ci si chiede quali siano gli effetti su un organismo vivente quando è colpito da una radiazione elettromagnetica. Allo scopo si deve ricordare che una radiazione elettromagnetica trasporta energia, che si propaga nello spazio.

Questa energia è in grado di attraversare i corpi, subendo un'attenuazione che è funzione della natura del corpo investito e delle caratteristiche della radiazione.

L'esposizione di una persona ai campi elettromagnetici è direttamente legata ai valori di alcune grandezze elettriche, che si stabiliscono, per effetto di tali campi, all'interno del corpo umano. Tali grandezze, dette grandezze interne, sono:

- l'intensità del campo elettrico interno E;
- la densità di corrente indotta J;
- il tasso di assorbimento di energia elettromagnetica per unità di peso corporeo SAR (Specific Absorption Rate).

Per accertare l'entità dell'esposizione umana non sono generalmente possibili misure dirette delle sopra citate grandezze interne sulle persone, richiedendo queste l'uso di sonde invasive; la valutazione viene normalmente condotta mediante modelli matematici (calcoli dosimetrici) su modelli fisici (fantocci), che permettono di ottenere la correlazione tra le grandezze interne e le grandezze esterne che caratterizzano il campo elettromagnetico incidente (campo elettrico, campo magnetico e densità di potenza). Gli effetti biologici prodotti dai campi elettromagnetici dipendono dalla quantità di energia depositata, durante l'esposizione, nel corpo umano.

Una radiazione elettromagnetica che colpisce il corpo umano può avere diverse conseguenze. Nella gamma di frequenze che arrivano fino a 10 MHz l'esposizione a campi elettromagnetici, anche di una certa consistenza, produce un assorbimento trascurabile di energia da parte dei tessuti, ma può causare shock elettrici e ustioni. Nel campo di frequenze 10 MHz ÷ 300 GHz, invece, un effetto macroscopico consiste nella trasformazione, nel campo esposto, di una parte dell'energia depositata dalla radiazione in calore, con conseguente aumento della temperatura del corpo stesso. La quantità di calore prodotta è dipendente dalle caratteristiche del materiale biologico attraversato dalla radiazione, dalla frequenza e intensità del campo elettromagnetico, dalla durata dell'esposizione, dal contenuto in acqua dei tessuti irradiati.

Nella prima gamma di frequenze citata la condizione di esposizione si verifica in prossimità della sorgente e quindi, in una situazione raramente riscontrabile nella vita quotidiana delle persone (almeno che non si tratti di esposizione in ambito lavorativo, in cui il personale addetto alla manutenzione viene a trovarsi esposto a

questo tipo di radiazione per un periodo di tempo più o meno lungo). Nella gamma di frequenze più alte, invece, la condizione espositiva può manifestarsi anche lontano dalla sorgente irradiante così da risultare più frequente nel corso della giornata per gran parte della popolazione (probabilmente inconsapevole della condizione in cui può venire a trovarsi). Tenuta presente la sensibilità delle cellule del nostro organismo alla temperatura, si comprende che questo effetto termico può avere conseguenze dannose che possono risultare anche irreversibili, con conseguente alterazione delle funzionalità dei vari organi. Con l'aumentare della frequenza, inoltre, si manifesta una maggiore penetrazione del campo elettrico all'interno dei tessuti biologici e un aumento della conducibilità legata alle perdite dielettriche con conseguente aumento della potenza dissipata nel tessuto esposto e della temperatura corporea. La potenza assorbita varia sensibilmente da punto a punto anche di uno stesso tessuto: i punti di accumulo di potenza assorbita vengono chiamati "hot spots", ovvero punti caldi e si manifestano nel cervello per frequenze prossime alla risonanza della cavità cranica (300-400 MHz) e nelle caviglie, ginocchia e collo, ovvero nei punti del corpo in corrispondenza dei quali si ha un restringimento della sezione trasversale. La potenza concentrata in questi punti può arrivare a essere anche a 10 o 20 volte superiore alla media del resto del corpo.

In questo contesto, i meccanismi di termoregolazione (macrocircolazione e microcircolazione) assumono un ruolo fondamentale nella difesa biologica degli organismi esposti. L'aumento della temperatura corporea è contrastato dal sistema della termoregolazione, il quale interviene nello stesso modo, sia a seguito di riscaldamento passivo (mediante diatermia) che di riscaldamento attivo (mediante esercizio fisico). Il sistema agisce con una costante di tempo che per l'uomo è di circa 6 minuti; l'esposizione, quindi, a un campo elettromagnetico di elevata intensità comporta un aumento della temperatura corporea nei primi 6 minuti, dopo di che si rileva un periodo più o meno lungo, a seconda della potenza assorbita, nel quale la temperatura corporea viene stabilizzata a un valore maggiore di quello fisiologico. Qualora l'esposizione continui, il sistema di termoregolazione può non essere più in grado di contenere l'aumento di temperatura che, perciò, può crescere con conseguente collasso del soggetto a possibili effetti letali. Gli organi più sensibili agli incrementi di temperatura sono, quindi, quelli a ridotta o assente

vascolarizzazione, quali ad esempio, il cristallino (perché totalmente privo di vascolarizzazione e, anatomicamente, disposto in posizione superficiale) e le gonadi (scarsamente vascolarizzate). Se l'intensità del campo elettromagnetico è elevata e non controllata, il soggetto esposto può avvertire anche altre sensazioni, oltre a quella termica, in genere sgradevoli, come senso di vertigine, disturbi alla vista, nausea. Tutti questi effetti, compreso l'innalzamento della temperatura corporea, prendono il nome di effetti acuti o a breve termine in quanto percepibili dal soggetto investito dalla radiazione elettromagnetica e sono caratterizzati dall'essere immediati e oggettivi: immediati perché si innescano o scompaiono non appena si applica o si rimuove l'irraggiamento e oggettivi perché si verificano per qualunque soggetto, salvo una variazione individuale del valore della soglia minima per cui gli effetti si manifestano.

Per molto tempo, si è ritenuto che l'unica conseguenza indotta da un campo elettromagnetico fosse un incremento della temperatura; solo negli ultimi anni i ricercatori impegnati in questo settore hanno accreditato l'ipotesi di interazioni di tipo non termico. Si pensa, infatti, che l'azione esercitata da una radiazione elettromagnetica abbia qualche conseguenza anche sul delicato equilibrio delle cellule costituenti i tessuti e degli organi colpiti. La scarsità di conoscenze è dovuta al fatto che gli effetti sono relativamente deboli e si possono manifestare dopo molto tempo dall'applicazione della radiazione. Questi effetti sono denominati genericamente a lungo termine o anche cronici o di basso livello e, sono le eventuali conseguenze di esposizioni prolungate a campi elettromagnetici di intensità anche molto più bassa delle soglie termiche, o, più in generale, delle soglie degli effetti acuti. A causa della loro caratteristica di non essere né immediati né oggettivi, gli effetti cronici possono essere indagati nell'uomo solo per mezzo di studi epidemiologici, nei quali si cerca di evidenziare l'esistenza di una associazione significativa tra l'esposizione e l'insorgenza di determinate patologie o manifestazioni di altro tipo. A questi studi si affiancano le ricerche di laboratorio in vitro (su culture cellulari o tessuti isolati dagli organismi di provenienza) e in vivo (su animali da laboratorio) attraverso le quali si cercano tanto delle conferme agli effetti ipotizzati dall'epidemiologia quanto dalle indicazioni sui possibili meccanismi di azione che stanno alla loro base. Nonostante le numerose ricerche nazionali e internazionali effettuate in questi ultimi decenni, non si è attualmente in grado di

caratterizzare i principali parametri elettromagnetici dai quali questi effetti a lungo termine scaturiscono. In particolare, non è dimostrato con dovuto rigore scientifico, che le radiazioni possono essere la causa, o un fattore, che contribuisce alla formazione di tumori.

La dosimetria è quella disciplina della fisica che permette di stabilire il collegamento esistente tra i valori di campo elettrico e magnetico di esposizione del corpo umano, misurati esternamente, e le grandezze di interesse interne al corpo stesso (densità di corrente, SAR), utilizzando modellizzazioni, simulazioni numeriche ed esperimenti.

I campi elettrici inducono fenomeni di polarizzazione elettrica (materiali dielettrici) o di conduzione (materiali conduttori) mentre i campi magnetici inducono polarizzazione magnetica e correnti indotte (materiali conduttori). Tutti i fenomeni elencati sono comunque accompagnati, in regime alternato, da perdita di energia all'interno del materiale in misura variabile da materiale a materiale. Il campo elettrico agisce sulle cariche elettriche presenti nel materiale mediante tre meccanismi principali: la polarizzazione degli atomi o delle molecole, l'orientamento dei dipoli elettrici permanenti e lo spostamento di cariche di conduzione che possono essere rappresentate da elettroni o ioni. I primi due effetti si manifestano nei materiali dielettrici mentre l'ultimo si manifesta nei conduttori. Gli effetti di polarizzazione vengono tenuti in considerazione ricorrendo alla costante dielettrica del materiale, detta anche permittività che assume un valore tanto più elevato quanto più elevato risulta essere il numero di dipoli indotti o orientati, per unità di volume, all'applicazione di un campo elettrico esterno. Gli effetti di conduzione vengono, invece, tenuti in considerazione ricorrendo alla conduttività (pari al reciproco della resistività) che assume valore tanto più elevato quanto più elevato risulta essere il numero di cariche di conduzione all'applicazione di un campo elettrico. Quando si applica un campo elettrico sinusoidale stazionario esterno è possibile tenere conto sia del fenomeno della polarizzazione sia di quello della conduzione. I materiali che assorbono percentuali significative di energia dal campo elettrico esterno applicato vengono definiti materiali assorbenti. Conoscere la potenza totale assorbita da un oggetto è in genere un'operazione complessa in quanto è necessario conoscere la densità di potenza in ogni punto dell'oggetto e

sommarla mediante un'operazione di integrazione estesa a tutto il volume dell'oggetto.

Il campo magnetico agisce sostanzialmente sui dipoli magnetici dei materiali che tendono a orientarsi secondo il suo verso. Il movimento di tali dipoli produce una corrente elettrica che crea un proprio campo elettrico e un campo magnetico. Gli effetti di induzione sui dipoli e gli effetti dei nuovi campi generati vengono tenuti in conto mediante la permeabilità magnetica  $\mu$  [H/m]. Quando si applica un campo magnetico sinusoidale stazionario esterno si utilizza, analogamente alla caratterizzazione elettrica, la cosiddetta permeabilità magnetica complessa.

I tessuti biologici sono sostanzialmente materiali non ferromagnetici, in quanto la loro permeabilità magnetica è praticamente uguale a quella dell'aria. La loro permittività, nei confronti dei campi elettrici, varia invece con la frequenza. La permittività varia, inoltre, con il tipo di tessuto umano. Inoltre, per frequenze al di sotto del MHz, il tessuto umano presenta un comportamento anisotropico nei confronti della corrente, cioè la conduttività varia a seconda della direzione di attraversamento della corrente nel tessuto.

La permittività decresce, in genere, all'aumentare della frequenza, a causa dell'incapacità delle cariche del tessuto di rispondere alle sollecitazioni elettriche a frequenze elevate. I meccanismi fisici alla base dell'interazione di un campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico con un organismo biologico dipende in maniera determinante dalla frequenza della radiazione incidente.

Nella gamma delle radiofrequenze (RF) e delle microonde (MW) si possono distinguere fondamentalmente tre casi di interazione:

- l'accoppiamento con i campi elettrici a bassa frequenza;
- l'accoppiamento con i campi magnetici a bassa frequenza;
- l'assorbimento di energia dai campi elettromagnetici.

Alle frequenze più basse il campo elettrico e il campo magnetico si accoppiano con l'organismo come se si trattassero di due grandezze fisiche distinte e indipendenti. Come risultato di questa interazione, in entrambi i casi, vengono indotte nei tessuti delle correnti elettriche le cui intensità sono direttamente proporzionali alle intensità dei campi elettrico e magnetico e alla frequenza. Tutti gli effetti biologici accertati sono imputabili alle correnti indotte. Questo modello di interazione è noto

come modello quasi-statico, poiché risulta valido fintantoché è verificata la condizione tale per cui la massima dimensione dell'organismo esposto sia molto minore della lunghezza d'onda della radiazione incidente (valutata nel materiale che lo costituisce). Nell'uomo, a rigore, le condizioni suddette risultano verificate solo per frequenze fino a qualche centinaio di KHz, ma con un accettabile livello di approssimazione il modello quasi-statico può essere utilizzato anche fino alle decine di MHz. A frequenze più alte, e quindi di maggior interesse, entrano in gioco veri e propri meccanismi di risonanza dimensionale che rendono l'interazione molto più complessa.

L'interazione tra campi elettrici variabili a bassa frequenza e il corpo umano consiste nella generazione di un flusso di cariche elettriche, nella formazione di dipoli elettrici e nel ri-orientamento di dipoli già esistenti nei tessuti. L'ampiezza di tali effetti dipende dalle proprietà elettriche del corpo umano, cioè dalla conduttività, che governa i fenomeni di conduzione e dalla permittività, che governa i fenomeni di polarizzazione. La densità di carica superficiale varia fortemente con le condizioni di esposizione al campo, la misura, la forma e l'esposizione del corpo al campo, inducendo distribuzioni non uniformi di corrente nel corpo. La distribuzione di densità di corrente indotta varia in maniera inversa rispetto alla sezione trasversale del corpo e può raggiungere valori relativamente elevati nella zona del collo e delle anche. Le correnti indotte dai campi elettrici fluiscono di solito attraverso le gambe e i piedi verso qualunque superficie che si trovi a un potenziale inferiore e in contatto con il corpo, come il pavimento o il terreno. Ponendo in serie tra il corpo e la terra la strumentazione opportuna è possibile misurare tali correnti. L'interazione tra campi magnetici variabili a bassa frequenza e il corpo umano consiste nell'induzione di campi elettrici e quindi delle relative correnti circolanti. Le correnti indotte circolano, in genere, intorno ad una sezione trasversale del corpo e si manifestano, quindi, con maggiore intensità alla periferia del corpo, in prossimità della superficie, laddove la sezione interessata dal flusso magnetico presenta un diametro maggiore. Tali correnti, data la loro natura indotta, tendono a rimanere confinate all'interno del corpo rendendo difficile la loro misura, al contrario di quello che avviene con le correnti indotte dai campi elettrici. Il percorso del flusso di corrente indotta e la sua ampiezza nelle varie parti del corpo dipendono dalla conduttività elettrica del tessuto. Poiché il corpo umano non è elettricamente

omogeneo le correnti indotte vengono calcolate utilizzando modelli del corpo umano che ne riproducono realisticamente le caratteristiche elettriche e anatomiche e che permettono una elevata risoluzione spaziale, in maniera tale da poter conoscere anche gli effetti locali. Per determinare i livelli di densità di corrente indotta, generati dall'esposizione a un campo magnetico, vengono adottati modelli numerici semplificati che approssimano il corpo umano a una sfera avente conduttività omogenea e isotropa, e che assumono, all'interno del corpo stesso, percorsi circolari chiusi di corrente ortogonali al flusso magnetico incidente. Per stimare con maggiore precisione le densità di corrente indotte sulla superficie del corpo è possibile ricorrere a modelli più complessi che impiegano geometrie ellissoidali, a simmetria uniassiale o triassiale, per la rappresentazione del tronco o dell'intero corpo umano.

Si può affermare che l'esposizione a campi elettromagnetici uniformi, del tipo di quelli generati da un'onda piana, provocano una distribuzione non uniforme di energia all'interno del corpo, che deve essere valutata mediante misure e calcoli dosimetrici. L'energia assorbita si manifesta, principalmente, sotto forma di calore generato dall'attrito associato all'orientamento dei dipoli indotti o permanenti e dallo spostamento di cariche di conduzione sotto l'effetto del campo elettrico o indotte dalle variazioni di campo magnetico. Se non ci fossero tali effetti non si verificherebbe l'assorbimento di energia. L'assorbimento di energia dell'intero corpo esposto a radiazione elettromagnetica presenta un comportamento risonante. Il campo di frequenze di interesse può essere suddiviso in quattro gamme differenti, in funzione delle diverse caratteristiche di assorbimento manifestate dal corpo umano:

- 100 kHz ÷ 20 MHz: l'assorbimento nel corpo decresce velocemente al diminuire della frequenza e può manifestarsi un assorbimento significativo nella gambe e nel collo;
- 20 MHz ÷ 300 MHz: può manifestarsi un elevato assorbimento in tutto il corpo particolarmente intenso in alcune parti che possono presentare fenomeni di risonanza;
- 300 MHz ÷ 10 GHz: l'assorbimento si manifesta in maniera non uniforme e localizzato;



- oltre 10 GHz: l'assorbimento di energia si manifesta fundamentalmente sulla superficie del corpo.

Di tutte le gamme di frequenza elencate, quella che riscuote maggior interesse dal punto di vista dell'assorbimento di energia da parte del corpo umano è certamente la seconda (30 ÷ 300 MHz). È in questo intervallo di frequenze, infatti, che si trova il picco di risonanza (valore massimo) dell'assorbimento di energia. Il valore di frequenza corrispondente è tale per cui l'altezza  $h$  del soggetto esposto al campo elettromagnetico sia pari a:

$$\lambda \cong 0.2\lambda \text{ per un soggetto elettricamente a terra;}$$

$$\lambda \cong 0.4\lambda \text{ per un soggetto isolato da terra.}$$

Studi condotti al riguardo hanno, inoltre, evidenziato la variabilità di assorbimento di energia, da parte del corpo, in funzione della direzione di propagazione del campo elettromagnetico rispetto alla massima dimensione del soggetto esposto. I risultati sperimentali e analitici mostrano che alla frequenza di risonanza si ha il massimo di assorbimento per campo elettrico orientato (polarizzato) parallelamente alla massima dimensione del corpo. In tal caso il campo elettrico è del tutto tangenziale alla superficie del corpo irradiato e, dunque, non subisce riflessione.

Come già accennato, la dosimetria si pone come scopo proprio quello di descrivere, in termini quantitativi, le interazioni tra campi elettrici e magnetici e l'organismo umano. Le grandezze fisiche che vengono utilizzate da tale disciplina per valutare e limitare l'esposizione alle radiazioni NIR variano, per motivi di praticità, con la frequenza e con la forma dell'onda incidente:

- densità di corrente  $J$  [ $A/m^2$ ], nella gamma di frequenze che arriva sino a 10 MHz;
- tasso di assorbimento specifico SAR [ $W/kg$ ], nella banda 100 kHz ÷ 10 GHz;
- assorbimento specifico di energia SA [ $J/kg$ ], per campi elettrici e magnetici pulsati nella gamma di frequenze 300 MHz ÷ 10 GHz;
- densità di potenza  $S$  [ $W/m^2$ ], nella gamma di frequenze 10 GHz ÷ 300 GHz.

A seconda della gamma di frequenze che si prende in considerazione, i possibili effetti che una condizione espositiva a campi elettromagnetici può causare sono strettamente correlati alle grandezze fisiche sopra elencate ed è, di conseguenza,

proprio in termini di queste che vengono espressi, nelle norme di riferimento, i limiti di base.

Nella gamma di frequenze che si estendono da 50 Hz sino a 10 MHz, gli effetti che si possono riscontrare in un corpo esposto sono identificabili, come già accennato, in shock elettrici e ustioni; essendo questi attribuibili a flussi intensi di cariche elettriche, è chiaro il motivo per cui si preferisce fare riferimento alla densità di corrente e alla corrente stessa nel descrivere il meccanismo di accoppiamento tra radiazione incidente e soggetto esposto. La presenza di oggetti, soprattutto metallici, in prossimità del corpo rappresenta un fattore di primaria importanza per la generazione di correnti di contatto. L'impedenza tra la persona investita dalla radiazione e la terra si rivela di grande utilità nel calcolare la dipendenza delle densità di corrente dai campi elettromagnetici ai quali la persona risulta esposta. Poiché la maggior parte degli oggetti di interesse, nel caso specifico, presenta dimensioni ridotte rispetto alle lunghezze d'onda in oggetto, è possibile ricorrere ad analisi quasi-statiche per derivare le grandezze dosimetriche di interesse. Nell'approssimazione quasi-statica i risultati ottenuti per una frequenza possono essere estesi direttamente a tutte le frequenze per le quali le condizioni di validità Maxwell è la produzione di onde elettromagnetiche quando abbiamo campi elettrici o magnetici che variano rapidamente nel tempo. Nel 1886 Heinrich Rudolph Hertz riuscì a eseguire un esperimento che evidenziò la presenza di tali onde.

Primindustriale, studiato con largo anticipo rispetto alla dosimetria ad alta frequenza. Si è già anticipato che per frequenze maggiori del MHz il trasferimento di energia dai campi elettrici e magnetici all'organismo umano produce calore nei diversi tessuti in misura più o meno marcata, a seconda del grado di vascolarizzazione degli stessi e della presenza o meno di acqua al loro interno. Per descrivere il fenomeno la dosimetria ad alta frequenza impiega il tasso di assorbimento specifico o SAR (Specific Absorption Rate), definito come il rateo temporale cui l'energia della radiazione incidente viene impartita a un elemento infinitesimale di massa di un sistema biologico, diviso per la massa dell'elemento stesso. Il SAR è esprimibile in formule come:

$$SAR = \frac{d}{dt} SA = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{\rho \cdot dV} \right) \quad [W/Kg] \quad (5.1)$$

dove:

- SA esprime l'assorbimento specifico di energia (Specific Absorption) definito come il rapporto tra l'energia elementare  $dW$  [J] assorbita dalla massa elementare  $dm$  [Kg] e la massa stessa;
- $dV$  è il volume elementare [ $m^3$ ] della massa  $dm$ ;
- $\rho$  è la densità [ $kg/m^3$ ] della massa.

Conoscendo le grandezze fisiche interne al tessuto biologico direttamente correlate all'assorbimento di energia si può valutare il SAR mediante le tre relazioni:

$$SAR = \frac{\sigma \cdot E^2}{\rho} = C_i \frac{dT}{dt} = \frac{J^2}{\sigma \cdot \rho} \quad (5.2)$$

dove:

- $\sigma$  è la conducibilità [S/m] del tessuto biologico;
- $E$  è l'intensità del campo elettrico interno in valore efficace [V/m];
- $C_i$  è il calore specifico [J/Kg];
- $dT/dt$  è il rateo dell'aumento di temperatura [ $^{\circ}C/s$ ] del volume di massa considerata.

Il SAR, definito mediante l'equazione 5.1 viene anche detto SAR locale o distribuzione del SAR per distinguerlo dal SAR medio del corpo intero, brevemente detto SAR medio, definito come la quantità di energia totale trasferita al corpo nell'unità di tempo, divisa per la massa del corpo.

Il SAR, oltreché essere proporzionale al quadrato del valore del campo elettrico interno (nel punto d'interesse), dipende anche dai parametri del campo elettrico incidente (intensità, frequenza, polarizzazione e configurazione del soggetto irradiato rispetto al campo), dalle caratteristiche del corpo esposto (dimensioni, geometria interna ed esterna, proprietà dielettriche dei vari spessori dei tessuti attraversati), dagli effetti di terra e di riflessione di altri oggetti presenti nel campo di irradiazione come superfici metalliche vicino al corpo esposto. Il SAR è molto importante in termini dosimetrici perché i valori dei limiti di base, per la gamma delle alte frequenze, sono espressi in termini di SAR valutato sul corpo intero e di SAR locale, e i valori dei livelli di riferimento sono correlati al valore di SAR mediato sul corpo intero e perché permette di avere un'informazione più dettagliata sulla

distribuzione spaziale dell'energia assorbita dall'organismo esposto, e, quindi, una stima dell'entità e della natura del potenziale danno nei suoi vari organi.

In particolare sul SAR, e di conseguenza sull'assorbimento di energia, si può dire che:

- i materiali particolarmente ricchi di acqua, come la maggior parte dei tessuti umani, presentano delle perdite maggiori e quindi assorbimenti maggiori di radiazioni elettromagnetiche rispetto ai tessuti poveri di acqua come le ossa e il grasso;
- il SAR è più elevato quando il campo elettrico incidente è parallelo al corpo piuttosto che perpendicolare;
- il SAR è più elevato quando il campo magnetico incidente è perpendicolare alla sezione del corpo di maggiore estensione;
- gli spigoli, i bordi e in generale gli oggetti appuntiti tendono a concentrare i campi elettrici. Oggetti conduttori quali fili elettrici provocano perturbazioni considerevoli quando sono paralleli ai campi elettrici e perturbazioni minime quando sono perpendicolari;
- un campo elettromagnetico uniforme non produce, in genere, un campo interno uniforme;
- la profondità della radiazione incidente diminuisce all'aumentare della conduttività del tessuto e della frequenza;
- gli oggetti di dimensioni ridotte, rispetto alla lunghezza d'onda, provocano una ridotta perturbazione e una riflessione ridotta dei campi elettromagnetici incidenti;
- al di sotto della risonanza, il SAR varia come  $f^2$ , essendo  $f$  la frequenza del campo magnetico incidente;
- per campo elettrico incidente parallelo al corpo, il SAR aumenta quando la sua sezione diventa più lunga e sottile (soggetto in piedi con braccia alzate e distese sopra la testa), mentre diminuisce quando la sezione del corpo diventa corta e larga (soggetto accovacciato).

La normativa che riguarda la protezione della salute dai danni attribuibili alle onde elettromagnetiche ad alta frequenza è stata per la prima volta introdotta con il

Decreto Ministeriale n° 381 del 10 settembre 1998, sotto il nome di “Regolamento recante le norme per la determinazione dei tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana”, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n° 257 del 3 novembre 1998. Con questo provvedimento legislativo vengono fissati, anche per il nostro Paese, i limiti di esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici connessi al funzionamento e all’esercizio dei sistemi fissi di radiocomunicazione e radiotelevisivi operanti nell’intervallo di frequenza tra 100 kHz e 300 GHz.

Già nell’ottobre del 1978 alcuni ricercatori del Laboratorio di Fisica dell’Istituto Superiore di Sanità avevano elaborato un’ipotesi di normativa e proposto al Ministro della Sanità l’insediamento di una Commissione Nazionale composta da esperti e da rappresentanti dei dicasteri interessati. In tal contesto fu nominata una Commissione Interministeriale con Decreto 4 agosto 1981, la quale preparò un documento tecnico per la determinazione di limiti di esposizione per la popolazione e i lavoratori. La proposta di normativa fu presentata in una stesura formale al convegno “La radioprotezione nelle applicazioni mediche e industriali delle radiofrequenze, microonde, laser e ultrasuoni”, organizzato dall’AIRP a Genova nel 1982. Il campo di applicazione della proposta di normativa comprendeva le radiofrequenze (RF) da 300 kHz a 300 MHz e le microonde (MW) da 300 MHz a 300 GHz. I suggerimenti contenuti nella versione finale, redatta dalla Commissione, si trasformarono nel 1983 in una bozza di normativa nazionale sulla quale, però, non è mai stato raggiunto l’accordo interministeriale necessario a trasformare un elaborato tecnico in un disegno di legge. L’importanza di questo atto, mai ufficialmente recepito dal governo, derivava dal fatto che esso ha costituito il riferimento tecnico sulla base del quale diverse Regioni hanno emanato leggi e regolamenti in materia di tutela della popolazione.

Anche se la norma non fu adottata, per la prima volta lo Stato italiano aveva prestato attenzione alla riduzione degli effetti dannosi conseguenti all’esposizione. Importante è l’esplicita adozione del “principio precauzionale”, riconosciuto già dall’Organizzazione Mondiale della Sanità, quale linea di comportamento da adottarsi per ridurre al minimo l’esposizione della popolazione a fattori ritenuti dannosi per la salute umana. Il principio di precauzione viene adottato quando ci si trova in una circostanza caratterizzata da un’elevata incertezza scientifica e si ha la necessità di intervenire nei confronti di un rischio che potrebbe rivelarsi grave con il

tempo, senza attendere i risultati della ricerca scientifica. L'impiego di questo principio é chiaramente mirato a fornire risposte provvisorie ad avvisaglie potenzialmente gravi per la salute, fino a quando non saranno disponibili dati opportuni per azioni fondate su una maggiore base scientifica.

Il D.M. 381/98, pur essendo stato un importante e tempestivo atto normativo, non esauriva la necessità di dotare il Paese di una regolamentazione chiara che dettasse regole e principi applicabili all'intero settore di impianti, apparecchiature e strumentazioni produttivi di radiazioni non ionizzanti. È questa la ragione che ha indotto il Parlamento a prendere in esame la proposta di emanare una legge-quadro (Legge-quadro n° 36 del 22 febbraio 2001), che regolamentasse questa materia tanto dibattuta dagli scienziati e dall'opinione pubblica. Inoltre, le finalità cautelari costituenti la parte fondamentale del sopraccitato D.M. 381/98 non erano state prese in considerazione in maniera ottimale a causa dell'assenza di un apparato sanzionatorio posto a corredo dei parametri di ammissibilità: la legge-quadro suddetta, pertanto, supplisce anche questa carenza.

Nell'articolo 1 di tale legge quadro, sono comandati i principi fondamentali diretti a:

- assicurare la tutela della salute dei lavoratori e delle lavoratrici e della popolazione dagli effetti dell'esposizione a determinati livelli di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici ai sensi e nel rispetto dell'articolo 2 della Costituzione Italiana;
- di promuovere la ricerca scientifica per la valutazione degli effetti a lungo termine e attivare misure di cautela da adottare in applicazione del principio di precauzione;
- assicurare la tutela dell'ambiente e del paesaggio e promuovere l'innovazione tecnologica e le azioni di risanamento volte a minimizzare l'intensità e gli effetti dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici, secondo le migliori tecnologie disponibili.

Inoltre, le regioni a statuto speciale e le province autonome di Trento e Bolzano provvedono alle finalità della legge nell'ambito delle competenze a esse spettanti ai sensi degli statuti e delle relative norme di attuazione e secondo quanto disposto dai rispettivi ordinamenti.

Nell'articolo 2 vengono precisati i limiti operativi della legge-quadro. Nel primo comma, sono prese in considerazione le fonti di esposizione da campi

elettromagnetici indicate nei concetti di impianti, sistemi e apparecchiature. L'indicazione è finalizzata a coprire tutte le possibilità di esposizione. Allo scopo di ampliare al massimo l'ambito di applicazione della norma viene anche presa in considerazione la destinazione delle fonti indicando non solo quelle di uso comune, destinate a «usi civili» ma anche quelle a specifica destinazione d'uso per scopi militari e di polizia.

A ulteriore conferma dell'esigenza di individuare con certezza e con completezza gli "impianti-sorgente" soggetti alle disposizioni vigenti, viene fornita un'ulteriore specificazione:

- elettrodotti
- impianti radioelettrici
- radar
- impianti fissi per radiodiffusione.

Questa indicazione copre, dunque, l'ambito degli impianti a bassa frequenza quanto quelli ad alta frequenza.

Il secondo comma dell'articolo fornisce l'indicazione di alcune eccezioni all'applicazione della legge: ne vengono escluse le ipotesi di esposizione intenzionale per scopi diagnostici o terapeutici.

L'articolo 3 raccoglie le definizioni dei principali termini utilizzati al fine di rendere più agevole l'interpretazione delle singole disposizioni: ad esempio il significato di esposizione, di limite di esposizione, valore d'attenzione, obiettivi di qualità.

L'articolo 4 è dedicato all'individuazione delle funzioni attribuite allo Stato. Nel primo comma, ad esempio, si riserva allo Stato l'individuazione dei limiti di esposizione e dei valori di attenzione e si richiede a esso un impegno per attività di ricerca, di sperimentazione e di informazione, l'istituzione di un catasto nazionale, non solo di tutti gli impianti-sorgente, ma anche delle zone interessate dalla presenza di detti impianti, la determinazione dei criteri di elaborazione dei piani di risanamento, ecc.

Il secondo comma, invece, indica un limite temporale di sessanta giorni dalla data di entrata in vigore della legge per l'emanazione di decreti che hanno il compito di stabilire limiti di esposizione, valori di attenzione, obiettivi di qualità e altri aspetti.

Un termine di tempo maggiore (120 giorni) è, al contrario, fissato dal quarto comma

per la determinazione dei criteri di elaborazione dei piani di risanamento. Con i decreti predetti devono adeguarsi anche le singole regioni conformando la propria legislazione, come precisato dal comma 5 della suddetta legge.

Nell'articolo 5 si prendono in esame le misure di tutela dell'ambiente e del paesaggio e di disciplina del procedimento relativo alla costruzione e all'esercizio di elettrodotti e si fissano le misure specifiche per la realizzazione. Tali misure riguardano gli aspetti tecnici degli impianti e la collocazione dei tracciati per la progettazione, la costruzione di nuovi impianti e la modifica di quelli già esistenti.

L'articolo 6 riguarda l'istituzione di un Comitato Interministeriale per la prevenzione e riduzione dell'inquinamento elettromagnetico. Le attività demandate riguardano: la promozione di attività di ricerca e di sperimentazione tecnico-scientifica, coordinamento dell'attività di raccolta, di elaborazione e diffusione dei dati e l'informazione annuale al Parlamento; la realizzazione di accordi di programma con i gestori di elettrodotti, con gli esercenti di impianti per emittenza radiotelevisiva e telefonia mobile al fine di promuovere le tecnologie e le tecniche che consentano di minimizzare le emissioni nell'ambiente e di tutelare il paesaggio; promuovere la realizzazione di accordi di programma con le imprese produttrici di apparecchiature di uso domestico, individuale o lavorativo, che determinano la produzione di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici; infine, proporre al Ministro dell'Ambiente di promuovere la realizzazione di intese e accordi di programma con i gestori di servizi di trasporto pubblico che determinano la produzione di inquinamento elettromagnetico. Questo comitato svolge, inoltre, una funzione consultiva e una di controllo (quest'ultima da effettuarsi mediante gli adempimenti previsti dalla legge-quadro).

L'articolo 7 prevede l'istituzione di un catasto nazionale di tutti gli impianti, fissi e mobili, nonché nelle zone interessate dalla presenza di detti impianti, al fine di assicurare un controllo effettivo sull'intero territorio soggetto all'irradiazione rilevando anche il livello di campo. Quanto alle modalità operative, si prevede che il catasto coordini la propria attività con quella dei catasti regionali ai quali è demandata l'individuazione delle sorgenti fisse dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici, allo scopo di rilevarne i livelli nell'ambito territoriale di competenza relativamente alle condizioni di esposizione della popolazione.



Nell'articolo 8 sono stabilite le competenze degli enti locali. Con riferimento alle competenze regionali, va rilevato che esse devono essere esplicitate rispettando i limiti di esposizione, valori di attenzione e obiettivi di qualità, nonché i criteri e le modalità fissati dallo Stato. Pertanto, esso riserva alle Regioni:

- l'esercizio delle funzioni concernenti l'individuazione dei siti di trasmissione e degli impianti per telefonia mobile, degli impianti radioelettrici e degli impianti per la radiodiffusione;
- la definizione dei tracciati degli elettrodotti con tensione non superiore a 150 kV;
- l'individuazione delle modalità per il rilascio delle autorizzazioni alla installazione degli impianti che va fatta tenendo conto delle situazioni di rischio preesistenti;
- la realizzazione e la gestione del catasto nazionale per l'individuazione delle sorgenti fisse dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici, allo scopo di rilevarne i livelli nell'ambito territoriale di competenza relativamente alle condizioni di esposizione della popolazione;
- l'individuazione degli strumenti e delle azioni per il raggiungimento degli obiettivi di qualità riguardanti i criteri localizzativi, gli standard urbanistici, le prescrizioni e le incentivazioni per l'utilizzo delle migliori tecnologie disponibili;
- il concorso all'approfondimento degli studi scientifici riguardanti gli effetti cronici da esposizione.

L'articolo 9 è dedicato alla procedura per l'adozione dei piani di risanamento, che permette il progressivo adeguamento degli impianti già esistenti alle disposizioni della legge-quadro. Il primo comma prevede, dunque, un termine per l'adozione da parte della regione di un piano di risanamento relativa agli impianti radioelettrici; la realizzazione del piano è controllata dalle Regioni e può prevedere lo spostamento degli impianti e la ricollocazione degli stessi in siti idonei.

L'articolo 10 è dedicato all'attività informativa demandata al Ministero dell'Ambiente.

L'articolo 11 prevede l'applicabilità delle disposizioni sulla partecipazione al procedimento amministrativo (di cui alla Legge 241/90) anche ai procedimenti

relativi ai tracciati degli elettrodotti e all'adozione e approvazione dei piani di risanamento.

L'articolo 12 attiene agli obblighi di informazione con riferimento agli apparecchi destinati a uso domestico, individuale e lavorativo. Le informazioni, dettagliatamente descritte in questa disposizione, che devono essere diffuse mediante apposita etichetta o scheda informativa, hanno lo scopo di rendere edotto l'utilizzatore sui possibili rischi da esposizione.

L'articolo 13 parla degli accordi di programma per i servizi di trasporto pubblico.

L'articolo 14 è di particolare rilievo in quanto disciplina le competenze in tema di controlli e le relative modalità di attuazione degli stessi. Il primo comma demanda le funzioni di controllo alle amministrazioni provinciali e comunali le quali si avvalgono delle strutture delle ARPA e, laddove le stesse non sono ancora istituite, è prevista dal secondo comma la possibilità di avvalersi del supporto tecnico dell'ANPA, dei PMP, dell'ISPESL e degli ispettorati territoriali del Ministero delle comunicazioni. I poteri dei soggetti preposti ai controlli sono indicati nel quarto e ultimo comma. Infatti, costoro, dotati di un documento di riconoscimento fornito dall'ente di appartenenza, hanno la possibilità di accedere agli impianti e ottenere, ai sensi della Legge 241/90, le informazioni e i documenti necessari per l'effettuazione delle verifiche.

L'articolo 15 è dedicato all'impianto sanzionatorio della legge-quadro.

L'articolo 16 contiene riferimenti al regime transitorio applicabile fino all'emanazione del D.P.C.M. con il quale verranno stabiliti limiti di esposizione, valori di attenzione, obiettivi di qualità, tecniche di misurazione e rilevamento dell'inquinamento elettromagnetico e parametri per la previsione di fasce di rispetto per gli elettrodotti per la popolazione. Viene, inoltre, riconosciuta l'applicabilità, fino all'entrata in vigore del decreto predetto, il D.M. 381/98 per gli impianti di radiodiffusione.

L'articolo 17 contiene, in ultimo, le disposizioni per la copertura finanziaria.

Il merito della Legge-quadro 36/01 è, paradossalmente, quello di esistere, in quanto costituisce, a livello nazionale, il primo atto formalmente qualificabile come legge che si interessa degli effetti prodotti sulla salute e sull'ambiente da parte dei campi elettromagnetici. Questa legge definisce correttamente le finalità e l'ambito di

operatività della nuova normativa, offrendo, finalmente, precisazioni chiare con cui confrontarsi, delineando le competenze di Stato, Regioni, Province e Comuni e ponendo fine ai contrasti istituzionali registrati in passato.

Le disposizioni del Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri (D.P.C.M.) del 8 luglio 2003, di cui si fa menzione nell'art. 16 della legge-quadro 36/01, fissano i limiti di esposizione e i valori di attenzione per la prevenzione degli effetti a breve termine e dei possibili effetti a lungo termine nella popolazione dovuti alla esposizione ai campi elettromagnetici generati da sorgenti fisse con frequenza compresa tra 100 kHz e 300 GHz. Il presente decreto fissa, inoltre, gli obiettivi di qualità, ai fini della progressiva minimizzazione della esposizione ai campi medesimi e l'individuazione delle tecniche di misurazione dei livelli di esposizione.

<b>Frequenza [MHz]</b>	<b>Valore efficace E [V/m]</b>	<b>Valore efficace H [A/m]</b>
0.1 - 3	60	0.2
>3 - 3000	20	0.05
>3000-300000	40	0.1

**Tabella 5.1 – Limiti di esposizione**

<b>Frequenza [MHz]</b>	<b>Valore efficace E [V/m]</b>	<b>Valore efficace H [A/m]</b>
0.1 - 300000	6	0.016

**Tabella 5.2 – Valore di attenzione**

<b>Frequenza [MHz]</b>	<b>Valore efficace E [V/m]</b>	<b>Valore efficace H [A/m]</b>
0.1 - 300000	6	0.016

**Tabella 5.3 – Obiettivo qualità**

Per quanto riguarda la normativa comunitaria sulla protezione della popolazione dall'inquinamento elettromagnetico il perno è costituito dall'Articolo 174 del Trattato Istitutivo della Comunità Europea. È proprio attraverso tale articolo che la stessa afferma la necessità di contribuire alla protezione della salute umana e di assumere, come base dei propri interventi a tutela dell'ambiente, i principi dell'azione preventiva e della correzione alla fonte dei danni causati. Si parte dal presupposto di correggere "alla fonte" quelle situazioni che possono compromettere il bene ambientale senza intervenire laddove il danno si sia già verificato, ma, anzi, cercando di evitarlo proprio attraverso la prevenzione. Nella

Risoluzione del 5 maggio 1994 “Sulla lotta degli inconvenienti provocati dalle radiazioni non-ionizzanti”, il Parlamento Europeo ha ribadito la necessità di intraprendere una politica preventiva sia a livello legislativo che tecnologico. Lo scopo primario che si cerca di raggiungere è quello di minimizzare il rischio nonostante il possibile dubbio sugli effetti nocivi provocati da questo tipo di radiazioni.

Tuttavia, a confronto con la legislazione italiana in tema di inquinamento elettromagnetico, peraltro all'avanguardia rispetto ogni altro Paese della Comunità Europea, la disciplina comunitaria non risulta incisiva; infatti, i parametri cautelari sono espressamente destinati a tutelare la salute dell'individuo esclusivamente dagli effetti certi conseguenti a esposizioni acute. Ciò significa che oggetto della tutela comunitaria è la protezione della salute dagli effetti a breve termine, ovvero da quelli rispetto ai quali la comunità scientifica ha riconosciuto con certezza l'esistenza di un nesso causale nei confronti dell'esposizione della persona alle onde elettromagnetiche. Comunque, nella citata Raccomandazione, si afferma la necessità che la posizione assunta in materia dagli organi comunitari venga periodicamente riveduta alla luce delle nuove conoscenze e degli sviluppi del settore tecnologico. Pertanto, a ciascun Paese membro è espressamente riconosciuta la facoltà di fornire un livello di protezione più alto per meglio salvaguardare l'ambiente e la popolazione.

Le normative internazionali di protezione dalle radiazioni a radiofrequenze e microonde si basano su un'attenta valutazione della documentazione scientifica esistente riguardo i possibili effetti sanitari cosiddetti «acuti» e fissano livelli di esposizione che, se non oltrepassati, non comportano alcun effetto negativo sulla salute degli individui esposti.

Fino a pochi anni fa, l'organizzazione che costituiva il principale riferimento mondiale era l'IRPA/INIRC, fondata nel 1977 e sostituita dall'ICNIRP (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection) nel 1992. Essa è l'unica organizzazione a carattere sovranazionale che abbia emanato linee guida di protezione nel settore delle radiazioni non ionizzanti. Tali disposizioni-guida evidenziano che, per le esposizioni a qualunque campo elettromagnetico da 1 Hz a 300 GHz, i limiti raccomandati devono assicurare, sulla base degli effetti sanitari

oggi accertati, un ambiente di lavoro e di vita salubri e sicuri rispetto alle esposizioni ai campi elettromagnetici, ma solo per quanto riguarda gli «effetti acuti».

Il CENELEC (Comité Européen de Normalisation Électrotechnique), che raggruppa i Comitati Elettrotecnici dei vari paesi europei, ha forza di ente tecnico normatore. La normativa CENELEC per le alte frequenze (radiofrequenze e microonde) prevede distinti livelli di riferimento per la popolazione e per i lavoratori e, per ciascuna categoria, vengono forniti differenti livelli di riferimento per l'esposizione continua e per l'esposizione pulsata.

In Germania esiste una normativa elaborata dall'Ente normativo tedesco, il Verband Deutscher Electrotechniker (DIN/VDE) che definisce i limiti di esposizione applicabili indifferentemente ai lavoratori ed alla popolazione per le frequenze comprese tra 10 kHz e 300 GHz. Anche nel Regno Unito, il National Radiological Protection Board (NRPB) ha elaborato una regolamentazione per la protezione dei lavoratori e della popolazione dai campi elettromagnetici.

Per quanto riguarda i Paesi Extra-UE, gli Stati Uniti sono stati fra i primi, insieme all'Unione Sovietica, a studiare e a investigare gli effetti dell'esposizione ai campi elettromagnetici ad alta frequenza. I loro standard sono fondati sull'ipotesi che la principale conseguenza dell'esposizione alla radiazione elettromagnetica sia il cosiddetto "effetto termico" e, di conseguenza, lo standard si basa sulla misura del SAR. I principali enti e organizzazioni che in USA hanno introdotto normative sui campi elettromagnetici sono: l'ANSI (American National Standard Institute), l'IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), l'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) e il NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health).

Le normative protezionistiche della Confederazione degli Stati Indipendenti (ex Unione Sovietica) si fondano sul principio che l'esposizione non deve alterare minimamente lo stato di salute degli individui esposti. Gli effetti ai quali si sono riferiti gli studiosi includono, quindi, anche gli effetti cosiddetti «non termici», che essi descrivono essenzialmente come effetti sul sistema nervoso centrale, attribuibili a esposizioni di lunga durata (anni) anche a bassi livelli.

Di seguito viene inserita una tabella riportante i limiti di esposizione per alcuni paesi dell'Europa e altri extra UE. Tali limiti sono dipendenti dalla frequenza e sono espressi in V/m.

Paese	Limiti di esposizione a 400 MHz (V/m)	Limiti di esposizione a 900 MHz (V/m)	Limiti di esposizione a 1800 MHz (V/m)	Limiti di esposizione per f > 2 GHz (V/m)
<b>Australia</b>	27	41	58	61
<b>Austria</b>	31	47	61	61
<b>Belgio</b>	13,7	20,58	29	30,7
<b>Bulgaria</b>	6	6	6	6
<b>Canada</b>	31	47	61	61
<b>EU CENELEC</b>	27	41	58	61
<b>Cina</b>	12	12	12	12
<b>Francia</b>	27	41	58	61
<b>Germania</b>	27	41	58	61
<b>Ungheria</b>	6	6	6	6
<b>ICNIRP</b>	27	41	58	61
<b>Italia</b>	20 (6)	20 (6)	20 (6)	20 (6)
<b>Giappone</b>	31	47	61	61
<b>Paesi Bassi</b>	60	109	180	193
<b>Nuova Zelanda</b>	27	41	58	61
<b>Polonia</b>	6	6	6	6
<b>Russia</b>	-	6	-	-
<b>Sud Africa</b>	27	41	58	61
<b>Svezia</b>	27	41	58	61
<b>Svizzera</b>	27	41	58	60
<b>Turchia</b>	29	41	58	58
<b>Regno Unito</b>	27	41	58	61
<b>USA</b>	31	47	61	61

Tabella 5.4 - Livelli di esposizione consentiti in alcuni Paesi

Come indicato nell'articolo 4 e nell'articolo 8 della legge quadro, le Regioni devono adeguarsi alle disposizioni contenute conformando la propria legislazione, senza dimenticare che alle varie regioni sono anche demandati diversi compiti:

- l'individuazione dei siti di trasmissione e degli impianti per telefonia mobile, degli impianti radioelettrici e degli impianti per la radiodiffusione;

- la definizione dei tracciati degli elettrodotti con tensione non superiore a 150 kV;
- l'individuazione delle modalità per il rilascio delle autorizzazioni alla installazione degli impianti che va fatta tenendo conto delle situazioni di rischio preesistenti;
- la realizzazione e la gestione del catasto nazionale per l'individuazione delle sorgenti fisse dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici, allo scopo di rilevarne i livelli nell'ambito territoriale di competenza relativamente alle condizioni di esposizione della popolazione;
- l'individuazione degli strumenti e delle azioni per il raggiungimento degli obiettivi di qualità riguardanti i criteri localizzativi, gli standard urbanistici, le prescrizioni e le incentivazioni per l'utilizzo delle migliori tecnologie disponibili;
- il concorso all'approfondimento degli studi scientifici riguardanti gli effetti cronici da esposizione.

Per ottemperare a tali compiti, la Regione Valle d'Aosta ha emanato, il 4 novembre 2005, la legge regionale n. 25 "Disciplina per l'installazione, la localizzazione e l'esercizio di stazioni radioelettriche e di strutture di radiotelecomunicazioni.

Modificazioni alla legge regionale 6 aprile

1998, n. 11 (Normativa urbanistica e di pianificazione territoriale della Valle d'Aosta), e abrogazione della legge regionale 21 agosto 2000, n. 31.", pubblicata sul BUR n. 48 del 23 novembre 2005.

Nella articolo 1 vengono precisate le finalità di tale legge, ovvero disciplinare l'installazione, la localizzazione e l'esercizio di stazioni radioelettriche nonché di definire le azioni di risanamento per le stazioni radioelettriche già presenti. Gli obiettivi che il legislatore si pone sono la tutela della salute della popolazione esposta alle emissioni elettromagnetiche e la limitazione della perturbazione delle condizioni di naturalità dell'ambiente dovuta alle emissioni delle stazioni radioelettriche, la corretta localizzazione e l'ordinato sviluppo delle stazioni radioelettriche, salvaguardando gli interessi di carattere paesaggistico e ambientale, anche attraverso la razionalizzazione e la concentrazione delle stazioni

radioelettriche in appositi siti attrezzati e il rispetto dei parametri tecnici riguardanti l'esercizio delle stazioni radioelettriche.

Nel secondo articolo vengono citate tutte le definizioni atte a rendere più chiara la normativa, come per esempio la definizione di stazione radioelettrica, postazione o operatore.

Nell'articolo 3 viene specificato l'ambito di applicazione di tale legge, ovvero è rivolta a tutte le stazioni radioelettriche operanti nell'intervallo 100 kHz – 300 GHz con l'eccezione degli impianti per uso amatoriale e gli impianti per le attività della protezione civile.

Nel quarto articolo sono riprese ed elencate le competenze che spettano alla regione, quali per esempio la concessione di contributi per interventi di sistemazione paesaggistica e ambientale delle postazioni e delle stazioni radioelettriche esistenti non conformi alle disposizioni dei piani di interesse regionale e l'istituzione del catasto regionale delle stazioni radioelettriche per telecomunicazione. Nel secondo capo vengono trattate tutte le tematiche legate alla localizzazione delle stazioni radioelettriche e dei siti attrezzati. In particolare, negli articoli 5 e 6 viene descritto cosa deve fare un operatore qualora debba presentare un progetto di rete o apportare una modifica al progetto di rete. Nell'articolo 7 viene indicata la modalità per la localizzazione dei siti, decisione che viene presa in base ai piani di interesse generale predisposti dalle comunità montane in accordo con i vari comuni. Nell'individuazione del sito è da prestare massima importanza alle esigenze di tutela del paesaggio e delle aree sensibili, ovvero di tali aree di particolare densità infrastrutturale o di specifico interesse paesaggistico, storico, culturale, documentario o archeologico. La regione può concedere contributi per la sanatoria e lo spostamento di siti già esistenti ma non conformi.

Il capitolo 8 norma il particolare problema della proprietà dei siti attrezzati, che può essere acquisita mediante esproprio oppure mediante la stipulazioni di particolari convenzioni tra proprietari e operatori. Nell'articolo 9 si indica che l'installazione è di competenza dell'operatore, mentre il proprietario del sito deve provvedere alla manutenzione e alla gestione di tale sito.

Nell'ultimo articolo del capo II, art. 10, si consente la realizzazione di postazioni anche al di fuori dei siti prestabiliti, ma solo se funzionalmente collegati a esigenze



specifiche di copertura locale o, nel caso di impianti di reti di telecontrollo e comando.

Nel capo II viene normato l'aspetto autorizzativo; nell'articolo 11 vengono definite le modalità di richiesta dell'autorizzazione, concessa dall'organo competente previo parere dell'ARPA, che ha validità 6 anni, decorsi i quali è necessario presentare domanda di rinnovo dell'autorizzazione. Vengono definite le tipologie di stazioni radioelettriche per le quali è necessaria l'autorizzazione e le scadenze entro le quali l'operatore deve cominciare i lavori, dopo aver ricevuto l'autorizzazione. L'articolo 12 considera separatamente gli impianti per uso amatoriale, che devono comunque avere l'autorizzazione, concessa anche questa previo parere favorevole dell'ARPA. Per quanto riguarda le stazioni di telefonia che abbiano una potenza al connettore di antenna pari o inferiore a 20 W, oppure per gli interventi o le modifiche alle stazioni indicati nell'articolo 14 (per esempio opere di manutenzione straordinaria o opere esterne di eliminazione di barriere architettoniche) è sufficiente presentare una DIA, ovvero una dichiarazione di inizio attività, come indicato nell'articolo 13 e 14.

Nel capo IV, costituito dal solo articolo 16, viene indicato come la regione intende operare per il compito a essa demandato dallo stato dell'istituzione del catasto delle stazioni radioelettriche. In particolare tale catasto viene istituito presso l'ARPA e contiene la mappa delle stazioni radioelettriche presenti sul territorio regionale.

Il capo successivo, il quinto, costituito dagli articoli 17, 18 e 19, contiene le indicazioni in materia di vigilanza e controllo. Tale compito viene svolto con il supporto tecnico dell'ARPA ed è preposto al controllo del rispetto dei limiti di esposizione, dell'attuazione delle azioni di risanamento previste dall'articolo 6, del mantenimento dei parametri tecnici e delle condizioni di funzionamento stabiliti all'atto dell'autorizzazione e al rispetto delle disposizioni urbanistico-edilizie. Vengono poi indicate le sanzioni che possono venir applicate nel caso di inosservanza.

Negli articoli dal 20 al 23 vengono inserite le modificazioni e le abrogazioni di leggi precedenti e le disposizioni finanziari e finali. Infine, nell'articolo 24 viene trattato per la prima volta il tema del digitale terrestre che, ricordiamo, veniva già preso in considerazione nell'anno 2005 in quanto la regione Valle d'Aosta è stata una delle regioni pilota per la sperimentazione di tale tecnologia digitale.

## 6. Strumenti, Metodi Di Misura e Simulazioni

---

Affinché le normative riguardanti i limiti di esposizione ai campi elettromagnetici possano essere applicate correttamente, è necessario utilizzare norme tecniche sui criteri di misura e valutazione dei campi elettromagnetici che permettano una corretta caratterizzazione dell'esposizione umana.

Le norme tecniche che sono utili per il caso in esame e che sono normalmente utilizzate dall'ARPA per fare rilevazioni di campo elettromagnetico nei pressi delle SRB sono due norme CEI, la norma CEI 211-7 " Guida per la misura dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz – 300 GHz, con riferimento all'esposizione umana" e più in particolare la norma CEI 211-10 "Guida alla realizzazione di una Stazione Radio Base per rispettare i limiti di esposizione ai campi elettromagnetici in alta frequenza", e la guida ANPA RTI CTN\_AGF 1/2000 "Guida tecnica per la misura dei campi elettromagnetici compresi nell'intervallo di frequenza 100 kHz – 3 GHz in riferimento all'esposizione della popolazione". Il CEI è il Comitato Elettrotecnico Italiano, un organismo normativo indipendente, al quale prestano un contributo o comunque un consenso tutte le parti interessate, che possono essere i progettisti, i costruttori e i gestori degli impianti e delle apparecchiature sorgenti di campi elettromagnetici, oppure i progettisti e i costruttori di sistemi di misura, o ancora esperti di misure in campo e in laboratorio e persone preposte alla verifica e ai controlli, che sono suddivisi in vari gruppi di lavoro a seconda delle proprie competenze. La guida tecnica ANPA è stata scritta dal gruppo di lavoro ANPA-ARPA, istituito nel maggio 1997 dal Consiglio delle Agenzie Regionali per la protezione dell'Ambiente.

Lo scopo di questo capitolo è quello di integrare le regole di utilizzo della strumentazione e le modalità di misura con altre informazioni di estrema utilità ai fini di una corretta e accurata esecuzione delle misure di sorveglianza delle sorgenti di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico a radiofrequenza. Tali informazioni riguardano essenzialmente:

- aspetti generali sulla misura dei campi elettromagnetici;

- le principali caratteristiche dello strumento utilizzato nelle misure;
- le procedure di esecuzione delle misure e i metodi di calcolo delle emissioni di campo elettromagnetico prodotte da impianti di telecomunicazione.

Nell'ambito della normativa per la protezione delle persone da esposizione a campi elettromagnetici ad alta frequenza devono essere stabilite tecniche di misura appropriate per la verifica di livelli di campo elettromagnetico nei diversi ambienti in cui possono trovarsi la popolazione e i lavoratori.

La problematica delle misure si presenta alquanto articolata in relazione:

- alla tipologia e all'eventuale molteplicità delle sorgenti;
- alle caratteristiche del campo emesso dalle sorgenti (frequenza, tipo di modulazione, polarizzazione);
- alle caratteristiche del campo nel punto di misura (campo di dispersione, di induzione, di radiazione, vicino, lontano);
- all'obiettivo delle misure (sorveglianza, indagine sistematica, analisi puntuale, interventi di bonifica).

A questa varietà di situazioni può corrispondere una diversificazione del tipo di strumentazione e della metodologia da utilizzare nelle misure.

Le misure a scopo protezionistico di valutazione pratica dell'esposizione ai campi elettromagnetici possono essere di due tipi:

- misure di esposizione, per valutare le grandezze che caratterizzano il campo elettromagnetico cui l'organismo è esposto;
- misure dosimetriche, per valutare l'energia assorbita dall'organismo umano esposto e determinare la distribuzione delle correnti elettriche e dei campi (elettrico e magnetico) all'interno dello stesso.

Le misure di esposizione riguardano, generalmente, i livelli di riferimento, mentre quelle dosimetriche i limiti di base, limiti descritti nel capitolo 5.

Per effettuare misure di esposizione nell'intervallo di frequenza 10 kHz ÷ 300 GHz è necessario adottare tecniche varie e strumenti di misura diversi: come già anticipato, la scelta del metodo e della strumentazione dipende dalla frequenza, dalle caratteristiche del campo (vicino, lontano, polarizzazione, modulazione) e dal numero di sorgenti radianti.

La valutazione dell'intensità dei campi elettromagnetici ai quali può essere esposto un individuo viene eseguita in maniera indiretta, utilizzando misure ambientali delle seguenti grandezze che caratterizzano una radiazione elettromagnetica e in termini delle quali vengono espressi i livelli di riferimento:

- intensità del campo elettrico  $E$  (espressa in  $V/m$ );
- intensità del campo magnetico  $H$  (espressa in  $A/m$ );
- densità di potenza  $S$  (espressa in  $W/m^2$ ).

La scelta della misura di una o dell'altra delle tre grandezze appena riportate è determinata dalle caratteristiche della sorgente e dal punto in cui si effettuano le misure.

In molte situazioni espositive, come ad esempio nella zona di induzione, non esiste un semplice legame matematico tra l'intensità di campo elettrico e di campo magnetico: la conversione delle due grandezze, sulla base delle relazioni valide in campo lontano, non è applicabile e di conseguenza ogni grandezza deve essere misurata separatamente.

È necessario conoscere accuratamente le caratteristiche degli strumenti di misura, in particolare il tipo di sensore utilizzato, la grandezza indicata e il principio su cui è basata la misura. Si deve considerare qualsiasi effetto su misura, provocato da modulazione, armoniche o energia emessa ad altre frequenze. Quando è necessario determinare un valore medio, il tempo di misura deve essere abbastanza lungo da rispettare i principi di protezione e il tempo di media deve corrispondere ai valori stabiliti dalle norme.

Sulla base delle considerazioni di principio appena esposte, bisogna valutare se le misure debbano essere eseguite a banda stretta (selettive) oppure a banda larga. Inoltre, la frequenza e la forma d'onda reali del segnale da misurare determinano se i valori significativi sono il valore efficace, il valore di picco o entrambi.

La misura del campo elettrico viene effettuata ricorrendo all'utilizzo di apposite antenne. Quando, per accertare il livello di esposizione si rende necessario eseguire misure con buona risoluzione spaziale, vengono utilizzati come sensori dipoli elementari dalle dimensioni ridotte, i quali peraltro, godono della caratteristica di non perturbare il campo misurato. Se la sonda contiene un solo dipolo si parla di sonda direttiva, in quanto essa misura il campo elettrico lungo una sola direzione (polarizzazione) che deve essere, quindi, conosciuta a priori. In tal caso, per

conoscere il campo elettrico complessivo è necessario eseguire tre misure lungo le tre direzioni ortogonali e calcolare il campo E risultante come:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (6.1)$$

dove  $E_i$  rappresenta la misura del campo elettrico lungo la direzione  $i$  (x,y e z).

Se la sonda contiene tre dipoli mutuamente ortogonali si parla di sonda isotropica: le misure effettuate con tale tipo di sonda non richiedono la conoscenza, a priori, della polarizzazione del campo elettrico da rilevare.

La misura del campo magnetico viene eseguita facendo ricorso all'utilizzo di appositi sensori a spira, in modo tale che la corrente sia proporzionale al flusso di induzione magnetica ( $B = \mu H$ ) che attraversa la spira stessa. Quando è necessaria un'elevata risoluzione spaziale ed è necessario ridurre gli effetti perturbativi sul campo misurato, si ricorre a sonde dalle dimensioni ridotte. Se la sonda contiene una sola spira è necessario eseguire tre misure su tre piani ortogonali e calcolare il campo magnetico H risultante come:

$$H = \sqrt{H_{xy}^2 + H_{yz}^2 + H_{xz}^2} \quad (6.2)$$

dove  $H_{ij}$  rappresenta la misura del campo magnetico sul piano  $i$ - $j$  (con  $i, j = x,y,z$  e  $i \neq j$ ).

Se la sonda è composta da tre spire mutuamente ortogonali si parla di sonda isotropica, analogamente alla misura del campo elettrico.

Per frequenze al di sopra dei 300 MHz, nelle misure eseguite in campo lontano, usualmente, la grandezza più significativa adottata come indicatore di esposizione è la densità di potenza. Tuttavia, è difficile determinare direttamente questo parametro, eccetto nei casi di stazionarietà, di componente singola, di campi a onda piana di polarizzazione nota. Non esistono, infatti, strumenti che misurino direttamente la densità di potenza: essi generalmente misurano una o più componenti di intensità di campo elettrico, o di campo magnetico o entrambe e poi possono ricavare le densità di potenza tramite la relazione dell'onda piana.

Nella regione di campo vicino, dove il campo elettromagnetico può assumere configurazioni complesse, o comunque in presenza di riflessioni, sorgenti multiple o interferenze, è necessario misurare separatamente il campo elettrico e il campo

magnetico e calcolare successivamente la densità di potenza dell'onda piana equivalente.

Come già descritto nei capitoli 3 e 4, per aumentare l'efficienza di trasmissione di un segnale vengono adottate diverse tecniche di modulazione. Le caratteristiche di modulazione modificano i valori efficaci delle intensità dei campi misurati e della densità di potenza e occorre tenerne conto anche per stabilire la durata di tempo in cui avviene la misura.

Anche la polarizzazione influenza le misure, in quanto indirizza verso la scelta di un certo tipo di strumentazione e la modalità di utilizzo. Le antenne di misura, infatti, presentano un comportamento differente a seconda del loro orientamento rispetto alla polarizzazione dell'onda incidente: un uso non corretto porta a valutazione errate delle intensità da misurare. Nel caso non si abbiano informazioni sulla polarizzazione dell'onda è preferibile ricorrere a sensori isotropici.

Anche la presenza di oggetti metallici e comunque il suolo perturbano la distribuzione nello spazio del campo elettrico rispetto al semplice caso di un'onda piana uniforme. Tali oggetti ostacolano la propagazione dell'onda elettromagnetica che subisce riflessione. Nel caso ci si trovi in presenza di una sola sorgente che emetta una sola frequenza, la regione di spazio interessata, dove sono presenti oggetti riflettenti, è caratterizzata dalla presenza di punti in cui l'intensità del campo è massima e punti dove è minima. La distanza tra questi punti dipende dalla lunghezza d'onda (minore è la lunghezza d'onda e minore è la distanza tra massimi e minimi). Nel caso in cui siano presenti più sorgenti a frequenze diverse e ostacoli riflettenti, la distribuzione nello spazio di tali massimi e minimi delle intensità dei campi non è più prevedibile e occorre effettuare una mappatura della zona utilizzando una sonda il cui sensore abbia dimensioni inferiori ad almeno un decimo della lunghezza d'onda relativa all'emissione alla frequenza più alta.

La permittività di un tessuto biologico è più grande di quella dell'aria e perciò le onde elettromagnetiche si propagano nel tessuto con una velocità inferiore a quella della luce. I tessuti biologici non hanno proprietà magnetiche e quindi la permeabilità magnetica è uguale a quella nel vuoto. Le conseguenze di queste proprietà sono che il campo elettrico si attenua all'interno del corpo umano e l'attenuazione cresce all'aumentare della frequenza mentre l'induzione magnetica

non cambia; il corpo umano perturba il campo elettrico e perciò quando si eseguono le misure l'operatore deve stare distante dalla sonda di misura; il corpo umano si comporta come un'antenna ricevente e l'energia assorbita è massima quando la sua altezza è pari a  $0.4\lambda$ .

Per effettuare misure di esposizione a fini protezionistici nel campo di frequenze che si estende da 10 kHz a 300 GHz, è necessario adottare vari tipi di strumenti di misura in relazione al tipo di sorgente che si deve analizzare e del relativo campo presente nella zona di interesse. La caratterizzazione dell'esposizione umana si basa principalmente sulla misura dell'intensità dei campi elettrico e magnetico e delle densità di potenze ma possono comprendere anche misure e valutazioni delle correnti elettriche indotte nel corpo umano. È necessario conoscere adeguatamente le caratteristiche degli strumenti di misura, in particolare il tipo di sensore utilizzato, la grandezza misurata e il principio su cui è basata la misura.

Gli strumenti di misura debbono essere accuratamente selezionati controllandone le caratteristiche e le limitazioni in funzione del tipo di indagine che si intende svolgere, delle peculiarità delle sorgenti e della collocazione del sito di misura rispetto alle sorgenti.

Nella struttura generale della strumentazione per misure di protezione a radiofrequenze è sempre possibile riconoscere la presenza di tre elementi base:

- la sonda costituita dal sensore e dal trasduttore;
- la linea di collegamento che trasferisce il segnale dal trasduttore all'unità di lettura ed elaborazione dei dati;
- l'unità di visualizzazione ed elaborazione.

Il sensore è l'elemento che si accoppia alla grandezza fisica (campo elettrico o magnetico) da misurare e produce, per mezzo del trasduttore, una tensione o corrente elettrica direttamente proporzionale all'ampiezza istantanea della grandezza rilevata. Il sensore deve essere sensibile a una sola grandezza fisica e non rispondere in modo significativo a componenti spurie, avere dimensioni tali da non perturbare sensibilmente la misura, avere comportamento noto in funzione della variabilità delle condizioni ambientali e, infine, avere un'incertezza nota associata alla misura eseguita.

Per non influenzare la misura, la linea di collegamento tra sensore e trasduttore non deve perturbare in modo significativo il campo (elettrico o magnetico) presente sul sensore e non deve accoppiarsi all'energia proveniente dal campo elettromagnetico presente nel sito per non condurre il segnale direttamente ai circuiti e componenti dell'unità di analisi, alterandone il funzionamento.

I cavi costituenti la linea di connessione possono essere interni allo strumento o mancare del tutto, nel caso in cui il sensore sia integrato nello strumento stesso. Sovente, come cavi di collegamento vengono impiegate le fibre ottiche, le quali consentono di ridurre drasticamente i problemi di accoppiamento con il campo elettromagnetico esterno, data la loro elevata capacità schermante.

Le unità di visualizzazione (o lettura) e di elaborazione dei dati hanno come compito quello di trasformare l'informazione proveniente dalla sonda in una delle grandezze derivate (E, H, S) e fornire all'operatore un'indicazione quantitativa della grandezza in esame.

Esistono diversi parametri che permettono di descrivere, valutare e confrontare le prestazioni di uno strumento e soprattutto di condurre l'esecuzione delle misure nel modo corretto. Tali specifiche sono:

- l'intervallo di frequenza (o banda passante);
- la sensibilità;
- la dinamica;
- la stabilità;
- il tempo di risposta;
- la risposta ad altra radiazione elettromagnetica;
- la risposta ai segnali modulati;
- la risposta ai campi pulsati;
- il livello di sovraccarico;
- l'errore di sovraccarico;
- il livello di rottura;
- l'incertezza strumentale.



### **Intervallo di frequenza**

La banda passante è il parametro che indica l'intervallo di frequenze all'interno del quale un dispositivo fornisce una risposta corretta, entro determinati margini di errore. In alcuni casi, le case costrittrici forniscono anche la risposta in frequenza che descrive, in genere mediante un diagramma, l'effettivo e dettagliato comportamento del dispositivo per diversi valori di frequenza all'interno e agli estremi della banda passante.

### **Sensibilità**

La sensibilità è quella specifica strumentale che viene espressa come il rapporto tra la variazione della grandezza in uscita del misuratore e la variazione della grandezza in ingresso che l'ha provocata. Non è da confondere con la risoluzione, la quale rappresenta la più piccola variazione nella quantità sotto misura cui può essere assegnato dallo strumento un valore numerico senza interpolazioni.

### **Dinamica**

La gamma di dinamica rappresenta l'intervallo di valori del segnale di ingresso all'interno del quale lo strumento è progettato per operare secondo specifiche assegnate e viene espressa come rapporto (solitamente in decibel) tra il massimo e il minimo valore misurabile.

### **Stabilità**

La stabilità descrive la capacità dello strumento nel mantenere invariate le proprie caratteristiche per tutta la durata della misura. Cause interne (come le variazioni dei livelli in continuo) e cause esterne (come le variazioni di temperatura) possono avere influenza sul risultato della misura (tipica a questo proposito è la variazione del valore di zero dello strumento). Occorre, pertanto, che lo strumento sia dotato di un sistema automatico di regolazione oppure che sia nota la procedura di correzione matematica sul valore misurato.

### **Tempo di risposta**

Il tempo di risposta viene definito come il tempo necessario a uno strumento di misura per campi elettromagnetici, dopo essere stato immerso nel campo da

misurare, per raggiungere una specificata percentuale (ad esempio 90%) del valore finale della grandezza rilevata.

### **Sicurezza e compatibilità elettromagnetica**

Gli strumenti da utilizzare nell'esecuzione delle misure di esposizione ai campi elettromagnetici devono essere conformi alle norme di prodotto relative alla sicurezza e alla compatibilità elettromagnetica della strumentazione di misura, controllo e da laboratorio.

### **Risposta ai segnali modulati**

La casa costruttrice dello strumento deve rendere disponibile l'informazione sul comportamento dell'apparato di misura ai segnali modulati (per esempio radar, AM, FM, GSM). Lo strumento deve essere provvisto, inoltre, dei dati di taratura per assicurare la migliore determinazione della misura al variare della frequenza dei campi elettromagnetici.

### **Risposte fuori banda**

Molti tipi di sensori rispondono a frequenze al di fuori del campo di misura indicato nelle specifiche. Le cause di questo comportamento nelle sonde ad alta frequenza sono da ricercarsi nella presenza di campi a bassa frequenza (specialmente a quella industriale di 50/60 Hz) e negli effetti di risonanza degli elementi della sonda (a frequenze maggiori di quelle di utilizzo). La documentazione sulle risposte fuori banda fornite dal costruttore servono proprio per compensare gli errori di misura generati nei due casi appena citati.

### **Incertezza strumentale**

La documentazione deve essere comprensiva delle informazioni sulle caratteristiche di incertezza della misura (incertezza sulla risposta in frequenza, isotropia, linearità, taratura, temperatura, incertezza dovuta ai parametri ambientali). Il valore dell'incertezza deve essere espresso in percentuale del valore di misura indicato.

Oltre a fornire le informazioni riguardanti le caratteristiche strumentali appena menzionate, il costruttore deve munire il dispositivo di misura di un manuale d'uso contenente indicazioni pratiche sulle procedure idonee a ottenere misure corrette. Il manuale d'uso deve consentire all'operatore un corretto impiego della strumentazione nell'ambiente di misura reale con riferimento a:

- condizioni ambientali;
- peso, volume e dimensione;
- resistenza meccanica;
- alimentazione elettrica.

Le misure di esposizione ai campi elettromagnetici ad alta frequenza possono essere svolte sia nel dominio della frequenza (come normalmente avviene) sia nel dominio del tempo. In questo ultimo caso, al fine di ottenere risultati corretti dalla successiva analisi spettrale mediante trasformata di Fourier, si rende necessaria la scelta di strumentazione di misura e di analisi con caratteristiche adeguate (in termini di risposta in frequenza e risoluzione).

Di seguito sono elencati i requisiti specifici della strumentazione per misure nel dominio della frequenza, essendo questi del tipo più comunemente impiegati nell'esecuzione di indagini espositive.

Gli strumenti per la realizzazione delle misure di esposizione nel dominio della frequenza possono essere suddivisi in due categorie:

- misuratori a banda larga (broadband): data la loro sensibilità pressoché indipendente dalla frequenza stessa, forniscono il valore globale del campo elettrico o magnetico nell'intervallo di frequenze considerato; la larghezza di banda deve essere abbastanza ampia da consentire la misura di tutte le sorgenti rilevanti;
- misuratori a banda stretta (narrowband): sono denominati anche misuratori selettivi per la loro capacità di essere sintonizzabili su una frequenza specifica fornendone il corrispondente valore dell'intensità di campo elettrico o magnetico; la banda passante deve essere abbastanza ridotta per consentire la misura accurata delle singole componenti spettrali alle diverse frequenze di interesse.

Negli strumenti a banda larga il sistema di misura è composto rispettivamente:

- dal sensore formato da uno o più dipoli se misura campi elettrici, oppure da uno o più spire se misura campi magnetici;
- dal trasduttore che converte la risposta del sensore in un segnale elettrico funzione del tipo di campo rilevato oppure funzione degli effetti termici prodotti dalla radiazione elettromagnetica sul sensore stesso, secondo note leggi fisiche;
- dai cavi di collegamento;
- dall'unità di analisi che elabora e visualizza o il campo elettrico in V/m, o il campo magnetico in A/m, o ancora la densità di potenza in W/m<sup>2</sup> della radiazione elettromagnetica rilevata nell'ambiente.

La strumentazione a larga banda viene anche catalogata in base al tipo di trasduttore presente al suo interno, che può essere:

- a diodo
- a bolometro
- a termocoppia.

Tale strumentazione può utilizzare un singolo sensore per essere sensibile a una sola componente del campo o utilizzare tre sensori ortogonali per rendere la misura indipendente dalla direzione e dalla polarizzazione del campo, come già detto nei paragrafi precedenti. In questo ultimo caso si parla di strumentazione isotropica. Se si utilizzano strumenti non isotropici si può misurare il valore massimo del campo orientando il sensore nella direzione di polarizzazione del campo stesso, purché quest'ultima sia lineare. Se, al contrario, la polarizzazione non è lineare, la direzione lungo la quale oscilla l'intensità del campo varia continuamente nel tempo rispetto all'orientamento del sensore, il quale fornisce un valore letto variabile anch'esso nel tempo. Per ovviare a questo problema dovrebbero essere eseguite tre misure nelle tre direzioni ortogonali, ma contemporaneamente, operazione che può essere agevolmente eseguita mediante uno strumento isotropico.

È molto importante ricordare che gli oggetti metallici irradiano parzialmente o totalmente il campo elettromagnetico che incide su di essi, sovrapponendosi al campo da misurare e influenzando così il valore misurato dalla sonda. È inoltre altrettanto importante conoscere il rapporto di soppressione in decibel (dB) tra la

componente di campo magnetico che si accoppia con una sonda di campo elettrico e viceversa, al fine di evitare errori di misura.

La strumentazione a larga banda deve essere in grado di misurare l'intensità del campo elettromagnetico in tempo reale, di calcolare il valor medio della grandezza misurata in un intervallo di tempo regolabile e di poter applicare un opportuno fattore di correzione dipendente dalla risposta in frequenza del sensore. Tale strumentazione deve, inoltre, essere in grado di misurare il campo elettrico (V/m), il campo magnetico (A/m) e la densità di potenza ( $W/m^2$ ). Alcune funzioni, che si rivelano di estrema utilità durante l'esecuzione delle misure, sono rappresentate da:

- memorizzazione del massimo valore della grandezza di campo raggiunta durante il periodo di misura;
- presentazione dei valori delle grandezze calcolate con la condizione di campo lontano in funzione della grandezza realmente misurata;
- segnalazione acustica di superamento di un livello reimpostato;
- possibilità di eseguire una operazione di media tra diversi punti di misura nello spazio.

La strumentazione a larga banda risulta essere estremamente maneggevole e trasportabile, essendo dotata di alimentazione autonoma, mentre non permette di conoscere la frequenza del campo o dei campi elettromagnetici misurati, la localizzazione delle sorgenti e i relativi campi irradiati. Particolare attenzione deve essere posta nei confronti delle sonde di rivelazione, che possono essere danneggiate, anche a strumento spento, qualora si superi il massimo livello di campo consentito.

I principali tipi di sensore utilizzati nella realizzazione di strumenti a larga banda sono quelli a diodo, a bolometro e a termocoppia.

Il sensore a diodo utilizza appunto dei diodi sui quali vengono chiusi dei dipoli o delle spire dalle dimensioni ridotte. Tale sensore presenta due zone di rivelazione, una quadratica a bassi livelli di segnale di ingresso, e una lineare per elevati livelli di segnale di ingresso: queste zone rispecchiano le caratteristiche elettriche dei diodi. Per livelli eccessivamente elevati si raggiunge la saturazione. Tale comportamento

caratteristico deve essere compensato ricorrendo a opportuni circuiti di equalizzazione.

Se i segnali sono modulati in ampiezza il valore fornito in uscita è uguale al valor medio dell'involuppo del campo: in tal caso è necessario utilizzare un opportuno fattore di correzione che dipende dalla profondità della modulazione.

Il sensore a diodo è caratterizzato da una elevata sensibilità, da un'ampia dinamica e da una elevata capacità di resistere ai sovraccarichi, mentre giocano a suo sfavore l'errore elevato quando si misurano segnali pulsati o segnali multipli caratterizzati da una elevata ampiezza, e la sensibilità alla temperatura, che richiede opportuni circuiti di compensazione.

Se si utilizzano diodi di tipo Schottky è necessario fare attenzione all'eventuale diminuzione dell'indicazione quando la misura viene eseguita all'ombra piuttosto che al sole diretto in quanto tali diodi sono sensibili sia alla luce visibile intensa che alle radiazioni infrarosse.

Il sensore a bolometro impiega un termistore per misurare l'innalzamento della temperatura indotto dalla radiazione elettromagnetica assorbita. Tale sensore permette di misurare campi di una certa intensità ed è in grado di sopportare sovraccarichi di una certa consistenza.

Dato il suo principio di funzionamento, tale sensore risulta essere estremamente sensibile alle variazioni di temperatura ambiente, che possono provocare derive di lettura qualora non venissero adeguatamente compensate mediante accorgimenti circuitali opportuni.

Il sensore a termocoppia utilizza appunto termocoppie del tipo a film sottile, parte delle quali viene talora utilizzata come antenna. La risposta di questo tipo di sensore ha andamento quadratico rispetto al campo elettrico. Le giunzioni fredde e calde vengono poste a distanza estremamente ridotta, permettendo al sensore di essere relativamente insensibile alle variazioni della temperatura ambiente.

Tale elemento può danneggiarsi se surriscaldato e per questo motivo non deve essere utilizzato per misurare campi elettromagnetici che possano superare di un fattore tre il valore di fondo scala dello strumento.

La strumentazione a banda stretta permette di conoscere le singole componenti del campo sulle varie frequenze all'interno della banda di interesse. Tale

strumentazione è caratterizzata dalla stessa composizione di quella a banda larga, con la differenza che l'unità di analisi è rappresentata da un analizzatore di spettro in grado di visualizzare il valore dell'ampiezza o dell'intensità del campo in funzione della frequenza, permettendo di conoscere il contenuto armonico del campo in esame. Questo tipo di strumentazione utilizza, quali sonde, antenne che possono essere del tipo a dipolo (o antenne con funzione di guadagno analogo), a bassa direttività (quali le biconiche) e a direttività più elevata (tipo le log-periodiche). La metodologia di misura sarà differente per le diverse tipologie di antenne; per le antenne a dipolo accordato, si acquisiscono tre spettri corrispondenti a tre posizioni mutuamente perpendicolari mantenendo il centro elettrico sempre nella medesima posizione. I tre spettri acquisiti sono elaborati sommando quadraticamente i valori di campo elettrico o magnetico rilevati per ogni frequenza nelle tre posizioni per ottenere lo spettro risultante. Tale procedura risulta correttamente applicabile nel caso di segnali persistenti nel tempo. Per quanto riguarda l'uso delle antenne a bassa direttività, può essere utilizzata la stessa metodologia di misura delle antenne a dipolo accordato tenendo presente che il risultato può essere affetto da incertezze maggiori. Infine, utilizzando antenne a elevata direttività, se la direzione di provenienza della radiazione è ben individuabile, si orienta l'antenna verso la sorgente e si acquisisce lo spettro. Tale operazione va ripetuta per due direzioni di polarizzazione ortogonali alla direzione di provenienza del segnale e i valori così ottenuti vanno sommati quadraticamente tra di loro per ottenere il campo risultante. Se la radiazione proviene da più direzioni si devono effettuare più misure orientando l'antenna verso le diverse sorgenti.

Per consentire la riproducibilità delle misure a banda stretta è necessario che gli strumenti siano forniti della più completa documentazione e, in particolare, del campo di frequenza coperto, della larghezza di banda a frequenza intermedia, dell'attenuazione di ingresso, del tempo di spazzata e del tipo di antenna.

La strumentazione che viene adoperata per assicurare il rispetto dei limiti di esposizione stabiliti dalle norme, deve essere tarata. La taratura consiste in un insieme di operazioni, effettuate sotto precise condizioni, tramite le quali è stabilita una relazione tra i valori delle quantità indicati dallo strumento e i corrispondenti valori realizzati dai campioni. Questo insieme di operazioni è eseguito in appositi

laboratori, i cui campioni sono verificati per confronto periodico con i campioni nazionali e internazionali. La catena ininterrotta di confronti, con incertezze stabilite, che permette di risalire dal campione del laboratorio in cui avviene la taratura al campione nazionale costituisce la catena di reperibilità.

È evidente che la taratura è una operazione che deve essere ripetuta periodicamente e, comunque, ogni qualvolta si abbia il sospetto che possa essere avvenuta una variazione nelle prestazioni dello strumento (per esempio, dopo una riparazione).

In Italia, i laboratori accreditati per la taratura degli strumenti costituiscono i centri SIT (Servizio Italiano di Taratura).

Esigenze legate al monitoraggio ambientale, alla dosimetria, alla compatibilità elettromagnetica e, più in generale, alla metrologia delle radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti richiedono metodi affidabili e accurati per la taratura di antenne o sensori di campo, che generalmente sono di tipo isotropico e a larga banda.

Questi misuratori di intensità di campo sono costituiti normalmente da tre parti:

- antenna o sensore di campo;
- rilevatore;
- strumento misuratore

e tra queste, quella che costituisce l'elemento critico del sistema, è senz'altro il sensore.

I metodi di taratura prevedono di esaminare il comportamento dei sensori di campo in funzione dei seguenti parametri: frequenza, livello dell'intensità di campo, orientamento dell'elemento captante.

La mancanza di queste informazioni può causare errori anche notevoli nell'uso del sensore nei suoi diversi campi di applicazione. Infatti, la misura del livello di intensità di campo all'aperto o in ambiente confinato, può essere affetta da un'incertezza anche notevole (dell'ordine del 30 ÷ 40%) a causa di diverse sorgenti di errore. In particolare, si possono avere errori casuali come quelli dovuti alla presenza dell'operatore, alla diversa distanza dalla sorgente (campo vicino o campo lontano), agli effetti dell'accoppiamento diretto del campo con lo strumento misuratore.



A questi si aggiungono gli errori sistematici che dipendono essenzialmente dal funzionamento e dalla qualità del misuratore di campo, la cui entità può essere notevolmente ridotta da una taratura accurata.

Oltre all'esistenza di indicazioni normative europee relative alla taratura e riferibilità degli strumenti di misura (Norme delle serie EN 29000 ed EN 45000) ed al D.L. 273 – 11 agosto 1991, che istituisce il Sistema Italiano di Taratura, differenti organizzazioni scientifiche e normative internazionali sottolineano l'importanza dell'armonizzazione e dell'accuratezza nello svolgimento delle misure dei campi elettromagnetici. Ad esempio, l'ANSI (American National Standard Institute) raccomanda che i misuratori di campo abbiano risposta isotropica entro 1 dB e siano forniti con un'incertezza sul fattore di taratura entro più o meno 2 dB.

È, quindi, necessario poter disporre di campi elettromagnetici "campione" noti con buona accuratezza nell'intervallo di frequenze di interesse. Nelle applicazioni sopraccitate la gamma da 100 kHz ad 1 GHz è quella maggiormente coinvolta.

I metodi di taratura utilizzati sono i seguenti:

- metodi che si basano sulla generazione di campi elettromagnetici "campione" all'interno delle celle TEM, celle GTEM e camere anecoiche;
- metodo del campione di trasferimento (transfer standard).

Un sistema di misura è composto normalmente da diverse parti ognuna delle quali contribuisce all'incertezza complessiva della misura stessa. Gli apparati di misura utilizzati devono essere forniti della documentazione riguardante l'incertezza introdotta dalle diverse componenti. Tale documentazione dovrebbe comprendere informazioni sulla larghezza di banda degli strumenti ed eventuali risposte fuori banda, l'incertezza associata alla non perfetta isotropia, l'attenuazione in funzione della frequenza dovuta ai connettori e ai cavi impiegati e infine l'eventuale effetto della temperatura sulla risposta degli strumenti. Alcune condizioni costruttive e operative possono portare a risultati di misura errati: accoppiamento dei cavi di collegamento al campo, effetto termoelettrico sui cavi di collegamento, presenza di campi statici o quasi-statici e risposte fuori banda. A frequenze inferiori a 1MHz, l'impedenza dei piccoli elementi a dipolo aumenta notevolmente e l'ordine di grandezza della loro resistenza può avvicinarsi alla elevata resistenza dei cavi normalmente usati per il collegamento allo strumento indicatore. I cavi possono,

allora, diventare essi stessi elementi captanti e quindi fornire un segnale RF all'unità di lettura, causando così una lettura più elevata del valore reale. Tale effetto può essere minimizzato orientando i cavi, durante la misura, radialmente alle sorgenti. La soluzione costruttiva adottata e raccomandata è l'utilizzo di cavi rigidi di cui è noto il percorso.

I conduttori a elevata resistenza non presentano in genere una resistenza elettrica uniforme per la loro intera lunghezza. Eventuali differenze nella resistenza hanno come conseguenza differenze nella dissipazione della potenza e si possono verificare variazioni della temperatura che generano una certa quantità di tensione termoelettrica. Ciò ha effetto trascurabile sull'accuratezza della misura in campo lontano. Aumenti di temperatura dovuti a campi molto intensi possono provocare danni permanenti o guasti ai cavi di collegamento.

Gli elementi della sonda di campo elettrico sono ad alta impedenza e i circuiti di ingresso dell'unità di lettura hanno un elevato guadagno. Ogni movimento di tali parti all'interno di un campo statico può indurre una tensione che può aumentare o diminuire la lettura dello strumento. Pertanto tali parti devono essere posizionate in modo stabile durante la lettura.

Le sonde sono sensibili a campi di frequenze al di fuori della loro banda prestabilita in modo diverso secondo la loro natura. La maggior parte delle sonde di campo elettrico hanno una risposta fuori banda ridotta, tale da procurare un piccolo effetto sulla misura dei campi nella banda di funzionamento della sonda. Le sonde di campo magnetico presentano risposte risonanti a campi elettrici di frequenze superiori al loro intervallo di funzionamento stabilito. L'effetto di tale risonanza è di esaltare un eventuale campo di bassa intensità fuori banda al punto tale da saturare lo strumento e riportare una misura errata. Questo effetto può essere fortemente accentuato se il campo fuori banda è di tipo pulsato.

Le procedure di misura devono seguire protocolli che consentano di ottenere le maggiori informazioni, in relazione agli obiettivi delle misure, che possono essere molteplici. Le procedure possono essere differenti in relazione al tipo e al numero delle sorgenti, alla zona di campo interessata dalle misure (campo reattivo o campo radiativi), alle variazioni temporali delle emissioni, al loro campo di frequenze, al tipo di territorio interessato. In ogni caso tutte le procedure di misura devono essere scelte in modo da minimizzare i rischi per il tecnico addetto alle misure e le

possibilità di danneggiamento della strumentazione e, in diversa misura in relazione all'obiettivo, le interferenze esterne e gli errori di misura.

Nel seguito si descriveranno le varie fasi delle procedure di misura, che includono un'attività di caratterizzazione preliminare delle sorgenti e una definizione dell'area di misura, la scelta del tipo di misura (in particolare se sono sufficienti misure a banda larga o se sono anche necessarie misure a banda stretta), la definizione e l'allestimento del sistema di misura, la verifica dei singoli componenti di tale sistema e delle modalità di assemblaggio, nonché i vari tipi di misura da eseguire per le diverse situazioni.

Vengono anche presentati alcuni criteri di estrapolazione dei risultati delle misure che, nei casi di campi molto dipendenti dalle condizioni di esercizio degli impianti, possono servire a ottenere informazioni per situazioni diverse da quelle riscontrabili al momento in cui vengono eseguite le misure stesse.

Prima di procedere a una misura di campi elettromagnetici, è di fondamentale importanza acquisire il maggior numero possibile di informazioni sulle sorgenti e sulle caratteristiche di propagazione dei campi da esse generati. Questo studio preventivo del sito di misura, se è piuttosto approfondito e tiene conto delle sorgenti, dei manufatti presenti e della morfologia del terreno, permetterà una scelta più adatta della strumentazione e della procedura di misura, dei punti e dei periodi di misura e una conseguente migliore stima delle distribuzioni spaziali e temporali del campo elettromagnetico. Le informazioni sulle sorgenti non riguardano soltanto quelle che sono direttamente oggetto di indagine, ma anche le altre sorgenti eventualmente presenti che potrebbero contribuire con segnali fuori banda: tra le sorgenti, in particolare, va considerato il sistema di alimentazione sia delle antenne sia degli apparati, tenendo presente che la componente elettrica prevale intorno alle linee di collegamento, ai condensatori, ai filtri, agli apparati delle cabine di sintonia e alle antenne, mentre la componente magnetica prevale intorno agli stadi finali degli amplificatori, e intorno alle bobine.

Le informazioni relative alle caratteristiche di propagazione dei campi elettromagnetici riguardano soprattutto la distanza tra la sorgente e il punto oggetto di indagine, rapportata alla lunghezza d'onda del segnale emesso dalla sorgente stessa e le caratteristiche dell'area tra la sorgente e il punto di misura e in particolare la presenza di oggetti assorbenti o riflettenti che possono contribuire

alla distorsione del campo; l'analisi di tale area permette, infatti, di evidenziare eventuali effetti di riflessione, diffusione o risonanza su strutture secondarie quali tralicci, tubature, recinzioni metalliche, che, per una loro cattiva messa a terra, possono generare punti caldi nei quali il valore dei campi può essere anche piuttosto elevato.

Le informazioni raccolte permettono in primo luogo di orientarsi sul tipo di zona di campo (reattivo o radiativo) che si intende investigare e di definire quindi le grandezze da misurare successivamente e le relative tecniche da adottare. Come già accennato, nella zona di campo reattivo la misura della densità di potenza  $S$  ( $W/m^2$ ) è di scarso significato: interessano le misure delle intensità dei campi elettrico  $E$  ( $V/m$ ) e magnetico  $H$  ( $A/m$ ), che, tra l'altro, con gli strumenti attualmente disponibili, risultano molto complesse e richiedono particolari precauzioni; nella zona di campo radiativo è sufficiente la misura di una sola delle suddette grandezze  $E$  ed  $H$ , oppure della densità di potenza  $S$ . Sulla base delle informazioni raccolte può quindi essere fatta una stima del campo atteso mediante modelli di calcolo più o meno sofisticati, in relazione all'obiettivo delle misure successive. È da tenere in considerazione il fatto che, ai fini della verifica della conformità ai limiti indicati da alcune legislazioni e norme tecniche, la valutazione del campo attraverso il calcolo è una procedura accettata, pur con qualche verifica mediante misura, qualora i risultati dei calcoli forniscano valori vicini ai limiti.

Per eseguire stime di calcolo del campo elettromagnetico in varie situazioni sono disponibili, nella letteratura specializzata, modelli matematici più o meno sofisticati e precisi in relazione ai tipi di sorgente e alla complessità della zona di campo interessata.

Esclusivamente per gli impianti a onde medie e lunghe, che sfruttano il terreno come componente fondamentale della trasmissione, l'effetto del suolo dovrebbe essere considerato nei calcoli. Per questi impianti è applicabile, esclusivamente per calcoli di larga massima, l'approssimazione che sostituisce al terreno un piano conduttore o un materiale dielettrico uniforme, allo scopo di applicare in via semplificata la teoria delle immagini.

In molti casi, in aggiunta alle valutazioni mediante calcolo è opportuno eseguire, dopo aver selezionato lo strumento più idoneo, alcune misure esplorative, finalizzate non alla valutazione dei livelli ambientali di esposizione, ma alla

caratterizzazione dell'emissione, analizzando un largo spettro di frequenze. Le procedure per tali misure differiranno a seconda che la sorgente in esame sia un radiatore intenzionale o non. Nel primo caso è sufficiente prendere in esame soltanto il lobo principale di irradiazione, individuato sulla base delle informazioni raccolte, mentre nel secondo caso è opportuno indagare sull'intera area attorno alla sorgente.

Un criterio generale per la scelta della catena strumentale è quello relativo all'analisi in frequenza del segnale da misurare. In relazione all'obiettivo della misura e al tipo di segnale può essere sufficiente, in alcuni casi, eseguire una misura globale in banda larga, che è più semplice e più immediata, o è invece necessario, in altri casi, affinare l'indagine in frequenza mediante misure selettive che forniscano informazioni più dettagliate sullo spettro di frequenza dei campi emessi dalle sorgenti presenti nell'intorno dell'area di misura.

Con riferimento al caso di misure volte alla verifica della conformità ai limiti imposti da legislazioni o norme tecniche, un criterio di scelta del tipo di misura normalmente adottato è il seguente.

In generale è sufficiente effettuare soltanto misure di campo in banda larga se le misure sono volte a individuare punti critici in una zona su cui insistono più impianti: la tecnica di misura in banda larga è, infatti, preferibile in un'indagine di primo livello in relazione soprattutto alla sua semplicità di esecuzione oppure se il valore misurato in banda larga non supera il 75% del valore del limite più basso applicabile fra quelli relativi alle frequenze di emissione delle sorgenti presenti.

Viceversa è necessario effettuare la misura utilizzando una catena strumentale in banda stretta se sono presenti più sorgenti che emettono in intervalli di frequenza su cui devono essere applicati differenti valori limite e il valore precedentemente misurato in banda larga è superiore al 75% del limite più basso oppure se mediante la misura in banda larga viene evidenziato un superamento del limite per cui si rende necessaria la riduzione a conformità, procedura che richiede di valutare i diversi contributi forniti singolarmente da ogni sorgente.

Se si sono effettuate ambedue le misure e vi è discordanza tra i risultati delle misure in banda larga e quelli delle misure in banda stretta, si considerano validi ai fini della verifica di conformità ai limiti questi ultimi. Se la differenza fra i risultati ottenuti con le due modalità è rilevante (per esempio, maggiore del 50% del risultato più

basso) è opportuno indagare sulle cause di tale differenza e riportare i risultati dell'indagine. Per le misure in banda larga la scelta del sensore e della catena di misura non dipende in modo importante dalle caratteristiche della sorgente di campo. Per le misure in banda stretta è bene invece analizzare in modo specifico i criteri di scelta dei sensori e dei misuratori in funzione del tipo di sorgente. Per quanto riguarda i misuratori, che sono in generale riconducibili ai ricevitori (apparecchi misura campo) e agli analizzatori di spettro, si possono, tuttavia individuare alcuni aspetti generali.

Qualora si utilizzi un ricevitore, esso deve essere predisposto con il rivelatore adatto al tipo di segnale da misurare e ai risultati che si vogliono ottenere. Pur non essendo indispensabile, in quanto il ricevitore è già munito di filtri sintonizzati, è bene verificare che il ricevitore stia lavorando in condizioni di linearità e che lo stadio d'ingresso non sia sovraccaricato.

Con l'analizzatore di spettro, che generalmente dispone di un'ampia dinamica, possono essere eseguite scansioni in frequenza allo scopo di individuare le componenti spettrali presenti o, utilizzandolo semplicemente come ricevitore sintonizzabile, indagini sull'andamento temporale del segnale associato a una frequenza ben precisa (modalità span zero). L'analizzatore presenta in ingresso un attenuatore variabile (tipicamente sono possibili attenuazioni fino a qualche decina di dB), che permette di limitare il segnale in ingresso al mixer al fine di evitarne il funzionamento in condizioni di saturazione; ciononostante, in presenza di segnali di ampiezza sconosciuta è buona norma iniziare la misura antepoendo un attenuatore esterno che protegga lo stadio di ingresso dell'analizzatore da danni permanenti. Poiché l'inserzione dell'attenuatore esterno può peggiorare il rapporto segnale/disturbo, può essere proposta una procedura alternativa, che prevede che lo strumento, se non munito di filtri sintonizzati all'ingresso, venga predisposto in full span, in modo da ottenere, agendo sull'attenuatore d'ingresso ed escludendo i preamplificatori, se presenti, le necessarie condizioni di linearità del front end e dell'amplificatore logaritmico. Fissato il valore di attenuazione, esso non deve più essere variato nel corso della misura.

Vengono riportati, di seguito, i criteri di scelta della catena strumentale e delle metodologie di misura che è opportuno differenziare per alcuni tipi di sorgenti, in

relazione soprattutto alle diverse frequenze coinvolte e alle diverse caratteristiche del segnale che si vuole sottoporre a indagine.

### **Campi da impianti radio FM**

Per le misure a banda larga viene normalmente utilizzato un sensore supportato da un'asta al cui interno sono posti i conduttori ad alta resistività che trasferiscono il segnale dal sensore allo strumento di presentazione e lettura o al ripetitore ottico. Le misure a banda stretta possono, invece, essere eseguite con antenne sintonizzate sulla frequenza del campo o con sensori di dimensioni ridotte qualora si vogliano analizzare con maggior dettaglio gli andamenti spaziali del campo.

Considerando che le lunghezze d'onda associate ai campi elettromagnetici delle radiotrasmissioni in FM sono dell'ordine di  $2 \div 3$  metri, le antenne accordate possono essere prese in considerazione solo per misure all'aperto o in ambienti confinati di grandi dimensioni, quali ad esempio capannoni industriali, in cui le strutture adiacenti non alterano in modo sensibile il funzionamento delle antenne stesse.

Per ambienti confinati o comunque ristretti, quali gli ambienti domestici, è necessario invece operare con sensori di campo di dimensioni limitate, preferibilmente connessi agli strumenti misuratori con un sistema in fibra ottica.

Anche per campi dovuti alle radiotrasmissioni in FM, lo strumento misuratore per le indagini selettive può essere o un ricevitore o un analizzatore di spettro, quest'ultimo funzionante in modalità MAX-HOLD.

Nel caso si usi un ricevitore, esso deve disporre di un filtro IF tale da contenere le bande laterali principali (tipicamente entro 100 kHz) e del rivelatore di valore efficace.

Se si effettuano le misure con un analizzatore di spettro, tenendo conto delle impostazioni disponibili su tale tipo di strumento, risulta accettabile l'adozione di una RBW di 30 kHz con una uguale VBW. Per avere una buona risoluzione video dei segnali e una migliore accuratezza nell'individuazione del picco, è opportuno l'utilizzo di un intervallo di lettura (SPAN) al più pari a 10 MHz: si ritiene consigliabile un valore di 5 MHz.

### **Campi da ponti radio**

Prima dell'esecuzione delle misure è necessario ottenere informazioni sul tipo di segnale trasmesso dall'impianto radio (frequenza, banda occupata dal canale, presenza di più canali radio, canalizzazione, potenza trasmessa e se la trasmissione è di tipo continuo o discontinuo). Solitamente si effettuano misure di campo elettrico in quanto è il parametro più facilmente misurabile viste le frequenze in gioco (da qualche GHz fino a circa 40 GHz).

Normalmente i ponti radio utilizzano trasmissioni nelle due polarizzazioni verticale e orizzontale con una preferenza per la polarizzazione verticale; le misure devono perciò essere eseguite in entrambe le polarizzazioni a meno di non utilizzare un'antenna ricevente con polarizzazione circolare.

Se si utilizza un analizzatore di spettro l'acquisizione dei dati può essere fatta con modalità di MAX-HOLD (tenendo conto che questo tipo di misura potrebbe portare a sovrastimare il valore del campo elettrico presente). Nel caso di sistemi di trasmissione discontinui occorre mediare il valore misurato con l'effettivo periodo di trasmissione. Data la vasta gamma di frequenze e della larghezza dello spettro emesso dai ponti radio non è possibile dare dei valori precisi per i parametri di misura Resolution Bandwidth e Video Bandwidth. Una indicazione generica è quella di utilizzare normalmente una RBW di circa 10 MHz per sistemi a bassa capacità trasmissiva (sistemi che trasmettono fino 8 Mbit/s, sistemi normalmente utilizzati nelle reti GSM) e di circa 30 ÷ 50 MHz per sistemi con una capacità trasmissiva maggiore. La scelta della resolution bandwidth deve essere fatta partendo dal tipo di segnale trasmesso dall'impianto: considerando che in sistemi modulati la potenza del segnale viene suddivisa in uno spettro continuo, per ottenere delle misure utili a determinare il livello del campo elettrico occorre che la resolution bandwidth sia maggiore della banda di frequenza occupata dal segnale, tipicamente uguale o maggiore del passo di canalizzazione.

### **Campi da stazioni radio base GSM**

Per le misure in banda larga vale quanto già detto per gli impianti radio: mediante tali misure è possibile verificare il valore di campo elettromagnetico in un certo intervallo di 6 minuti (utilizzando la modalità AVERAGE).



Per le misure in banda stretta lo strumento misuratore che viene utilizzato di solito è l'analizzatore di spettro. I ricevitori selettivi in frequenza sono poco utilizzati, se non per misure in laboratorio: essi consentono comunque di effettuare una misura del valore efficace del campo elettromagnetico mediato su un intervallo di 6 minuti, così come prescritto dalle normative.

Se si utilizza un analizzatore di spettro l'acquisizione dello spettro si può effettuare memorizzando i valori massimi (modalità MAX-HOLD) per un tempo sufficiente affinché i valori di picco si stabilizzino. È evidente che il valore così ottenuto rappresenterà comunque una sovrastima rispetto al valore mediato sullo stesso intervallo temporale, previsto dalla normativa: nel caso di stazioni radio base GSM, ad esempio, l'unica portante che viene trasmessa sempre alla massima potenza è quella relativa al canale di segnalazione (BCCH), mentre la potenza di trasmissione di tutte le altre portanti non è costante nel tempo. Il valore di campo elettromagnetico ottenuto tramite l'acquisizione per 6 minuti in modalità MAX-HOLD rappresenterà, quindi, la somma dei valori di picco (non necessariamente simultanei) raggiunti in tale periodo da ogni portante. L'acquisizione dello spettro in modalità MAX-HOLD in presenza della tecnica di funzionamento RF Frequency Hopping (variazione continuata della frequenza dei time-slot in trasmissione) può dar luogo alla visualizzazione di contributi spettrali che non rappresentano portanti effettivamente presenti. La tecnica del RF Frequency Hopping, infatti, prevede che il segnale associato a una comunicazione sia trasmesso su una frequenza che varia temporalmente: in tal caso il numero di portanti visibili tramite un'acquisizione in modalità MAX-HOLD è indipendente dal numero di portanti effettivamente attive al momento della misura (tipicamente sarà visualizzato un numero di portanti maggiore di quelle effettivamente presenti).

### **Campi da stazioni radio base UMTS**

Le procedure di misura a banda larga fin qui descritte per altri tipi di impianti sono da considerarsi valide anche per misure in banda UMTS. Per le misure selettive in frequenza si possono considerare due tipi di strumentazione:

a. analizzatore di spettro tradizionale, adottando opportuni accorgimenti nella impostazione dei parametri di acquisizione e della catena strumentale (a es.

integrazione sul canale occupato, impostazione di RBW e VBW, scelta delle antenne di misura)

b. analizzatore di segnali vettoriali (VSA, Vector Signal Analyzer), con la possibilità di effettuare misure nel dominio dei codici.

Nel seguito si farà riferimento solo a misure selettive realizzate mediante analizzatore di spettro.

La misura di potenza irradiata da stazioni radio base UMTS, rispetto al caso sistema GSM, ha due vantaggi: l'involuppo di potenza è continuo (anche se non del tutto costante) su tutti i canali radio (o portanti) e ci sono pochi canali radio (o portanti) per ogni operatore.

Una complicazione, invece, è data dal fatto che il segnale trasmesso al chip rate di 3.84 Mchip/s occupa un canale di 5 MHz, che è molto più largo dei 200 kHz del GSM.

Per misure effettuate con analizzatore di spettro è preferibile che sia presente sullo stesso la modalità di funzionamento CHANNEL POWER, al fine di eseguire le misure integrando su tutta la banda del canale radio pari ai 5 MHz sopra menzionati. Lo strumento, inoltre, deve essere impostato (oltre che con uno SPAN di 5 MHz) con una RBW compresa tra 100 kHz e 300 kHz, in accordo con la prescrizione minima:

$$RBW \geq 3 \frac{SPAN}{N-1} \quad (6.3)$$

dove N è il numero di punti della traccia acquisita; la VBW, invece, deve essere impostata a un valore maggiore di 3 RBW. Il rivelatore, inoltre, deve essere di tipo Sample o RMS e non Peak o Negative Peak.

È opportuno utilizzare rivelatori di tipo SAMPLE o RMS, in quanto sono i soli rivelatori che forniscono risultati che rendono possibile il calcolo della potenza complessiva. I rivelatori di tipo picco non sono adatti per misure di segnali noise-like, tra cui rientrano i segnali UMTS, per il fatto che non può essere stabilita la correlazione tra la tensione video rilevata e il segnale a RF in ingresso allo strumento. Siccome i segnali con modulazione digitale sono noise-like, la traccia ottenuta con un rivelatore di tipo SAMPLE è soggetta a grandi variazioni: il numero di campioni su cui si effettua il calcolo del valore di potenza da associare a ogni singolo pixel dello schermo è indipendente dallo SWEEP TIME scelto, poiché dalla serie dei campioni viene estratto solo il primo. Il rivelatore RMS dà, invece, risultati

più stabili, perché la potenza per pixel è calcolata sulla base di diversi valori misurati, e inoltre il tempo di misura può essere aumentato per permettere la media della traccia. Il rivelatore di tipo RMS è quindi generalmente la scelta migliore per misure in modalità CHANNEL POWER. L'utilizzo del rivelatore SAMPLE è, quindi, indipendente dalla scelta del tempo di spazzolamento; al contrario la variazione dello SWEEP TIME scelto influisce sul risultato fornito dal rivelatore RMS, perché varia il numero di campioni considerati per pixel (in relazione alla frequenza di campionamento del convertitore A/D).

In assenza dell'opzione CHANNEL POWER nell'analizzatore di spettro, è comunque possibile realizzare la misura, sempre mantenendo i valori consigliati di RBW, VBW e SPAN, predisponendo un banco di misura che consenta di calcolare il valore della potenza spettrale associato alla traccia acquisita, sull'intera banda di integrazione (SPAN), risolvendo in modo autonomo, per mezzo di algoritmi software, l'espressione qui di seguito riportata:

$$CP = \frac{B_s}{NBW} \left( \frac{1}{N} \sum_i P_i \right) 10^{10} \quad (6.4)$$

dove:

- CP è la misura del CHANNEL POWER e fornisce la potenza misurata sul canale radio;
- $B_s$  è la banda di integrazione (SPAN);
- NBW è la banda equivalente di rumore dell'analizzatore di spettro dove  $NBW = \alpha \cdot RBW$  ;
- N è il numero di pixel contenuti nella banda di integrazione;
- $P_i$  è la potenza associata a ciascun pixel ( $1 \leq i \leq N$ ) della traccia visualizzata sullo schermo.

In questo caso occorrerà reperire dal costruttore dello strumento il valore del coefficiente  $\alpha$ , dipendente dal tipo di filtro selettivo utilizzato (analogico o numerico, numero di poli della funzione di trasferimento, forma del filtro), allo scopo di determinare la banda equivalente di rumore NBW dell'analizzatore di spettro.

Nel caso di segnali numerici a larga banda (come quelli UMTS), a meno di non effettuare le misure in spazio libero, a distanza dagli ostacoli e dal terreno (limite

difficilmente praticabile in scenari urbani), la forma dello spettro del segnale misurato è soggetta a fenomeni di fading selettivo, dovuti alla combinazione di più componenti elettromagnetiche, provenienti da cammini propagativi diversi e generati dalle riflessioni. L'utilizzo di una antenna direttiva (ad esempio una log-periodica) potrebbe fornire risultati eccessivamente conservativi e sovrastimati. Per la misura di segnali UMTS è da preferire, quindi, l'utilizzo di antenne a dipolo accorato o con funzione di guadagno simile.

Nel caso in cui una SRB trasmetta su più di una frequenza (due o tre a seconda dell'operatore, del grado di maturità degli apparati e della rete, delle condizioni di traffico localizzato da servire) la misura in modalità CHANNEL POWER deve essere applicata a ogni singola portante della SRB e il contributo totale sarà dato dalla somma dei singoli contributi associati alle diverse portanti:

$$E_{UMTS} = \sqrt{\sum_{i=1}^n E_i^2} \quad (6.5)$$

dove:

- $n$  è il numero di portanti UMTS attive associate alla SRB in esame;
- $E_i$  è il valore di campo elettrico totale relativo a una singola frequenza portante UMTS, misurato con la modalità CHANNEL POWER e calcolato tenendo conto del parametro di rete  $\rho$ .

Resta inteso che, essendo l'UMTS un sistema cellulare con riuso unitario delle frequenze, l'analisi selettiva deve essere preceduta dalla verifica, tramite simulazione teorica, che il punto di indagine sia situato in modo tale da ritenere preponderante il contributo della SRB esaminata rispetto a quelli che potrebbero essere ricevuti sulla medesima frequenza, ma emessi da SRB differenti poste nelle vicinanze: a tal scopo i contributi delle SRB situate in zone vicine e non oggetto di indagini (espressi in termini di campo elettrico) devono essere inferiori di almeno un fattore 10 rispetto al contributo della SRB sotto indagine. Nel caso in cui si voglia effettuare la misura in un punto in cui non sia possibile verificare per via teorica il requisito di preponderanza appena esposto, la misura non potrà essere associata univocamente all'impianto sotto esame e non sarà possibile applicare le normali tecniche di estrapolazione; l'estrapolazione applicabile sarà quella relativa

all'indagine tramite analisi nel dominio dei codici, poiché solo in questo modo è possibile stabilire quanta potenza viene irradiata da una SRB rispetto a un'altra che trasmette sulla stessa frequenza portante.

Questo concetto permette di introdurre, in prima battuta, la sovrastima che inevitabilmente si commette nel misurare il segnale generato da una SRB UMTS con un analizzatore di spettro classico: la misura restituita da questo tipo di strumento rappresenta l'insieme dei contributi trasmessi da differenti SRB sulla stessa frequenza portante.

In commercio esistono differenti modelli di analizzatori di spettro che si distinguono sia per le loro caratteristiche operative sia per le funzioni che permettono di implementare. Essendo necessaria una misura che consenta di effettuare una media temporale su 6 minuti (come previsto dalla normativa vigente), l'analizzatore di spettro utilizzato deve garantire la funzionalità di media nel tempo del CP delle singole tracce. L'intervallo su cui effettuare la media può essere coperto mediante la scelta del numero di tracce (a cui è associato un valore di CP) su cui effettuare l'operazione di media stessa: il numero di tracce deve essere il massimo possibile, compatibilmente con l'intervallo di 6 minuti, e tale da stabilizzare la lettura della misura.

Nel caso si utilizzi un rivelatore di tipo SAMPLE, l'analizzatore di spettro restituisce, per ogni pixel visualizzato sullo schermo, il primo valore campionato dal convertitore A/D. L'impiego di tempi di spazzolamento lunghi non comporta un reale incremento del numero di campioni acquisiti. Per tale rivelatore, quindi, è opportuno che i tempi di scansione siano più brevi possibili, compatibilmente con i valori di RBW, VBW e SPAN impostati (ad esempio i valori selezionati in modalità automatica dallo strumento). Se si utilizza, per contro, il rivelatore RMS, che restituisce per ogni pixel della traccia il valore efficace dei campioni processati, la scelta è diretta a non diminuire eccessivamente il numero di campioni significativi (tracce) ai fini della media temporale nei 6 minuti (dei valori di CP o delle singole tracce nel caso di strumento privo dell'opzione CHANNEL POWER), tenendo anche conto degli eventuali tempi di acquisizione e di elaborazione da parte di un calcolatore. In entrambi i casi (analizzatore di spettro privo o dotato della modalità di funzionamento CHANNEL POWER), utilizzando il rivelatore RMS, un periodo di spazzolamento paragonabile o superiore al tempo di acquisizione ed elaborazione

dei dati, fa sì che il tempo utile per acquisire campioni da mediare sia uguale o superiore al tempo impiegato per elaborare la misura (che è un periodo di tempo in cui non si acquisiscono valori relativi alla potenza del segnale presente all'ingresso). In altri termini, aumentando il parametro SWEEP TIME, ed essendo i tempi di elaborazione costanti, si massimizza il tempo dedicato alla misura rispetto al tempo di calcolo.

Qualora la funzione che permette di mediare nel tempo i valori di CP non sia presente nello strumento a disposizione, collegando opportunamente quest'ultimo a un calcolatore (secondo i criteri espressi all'interno della Guida CEI 211-7), si possono adottare due diverse modalità operative:

- acquisizione dei valori di CP calcolati dallo strumento in un intervallo temporale pari a 6 minuti e successiva post-elaborazione delle misure effettuate; il valore medio sarà ottenuto come media aritmetica dei valori di CP acquisiti nell'intervallo di 6 minuti. Bisogna tener conto, a tal proposito, che il tipo di interfaccia utilizzato per il collegamento tra elaboratore e strumento influenza la durata dello SWEEP TIME (un collegamento realizzato tramite interfaccia IEEE-488 risulta sicuramente più rapido, in termini di bit rate, rispetto a un collegamento via RS-232);
- acquisizione del valore massimo di CP misurato nell'intervallo di tempo pari a 6 minuti; in questo caso il valore ottenuto rappresenterà una sovrastima ulteriore rispetto al valore mediato sullo stesso intervallo temporale: la potenza trasmessa da una SRB, infatti, varia nel tempo e solamente alcuni canali di controllo relativi alla cella (codici di controllo come, ad esempio, il CPICH) sono trasmessi sempre alla stessa potenza (inseriti opportunamente nella trama UMTS), mentre la potenza associata ai canali di traffico (codici destinati unicamente al servizio) non è costante nel tempo. In definitiva, quindi, il valore così ottenuto consentirà di tenere in considerazione anche i contributi di canali di traffico che in determinati istanti temporali sono attivi contemporaneamente.

Nel caso in cui la strumentazione non sia in grado di gestire la modalità di misura in CHANNEL POWER, l'analizzatore di spettro dovrà consentire, sempre tramite linea di connessione, il trasferimento delle tracce a un calcolatore per una successiva elaborazione; in questa evenienza devono essere acquisite le intere tracce in un

intervallo temporale di 6 minuti. Al termine dovrà essere effettuata l'integrazione relativa a ogni traccia acquisita secondo l'algoritmo presentato nell'equazione (6.4) (determinando, così, la potenza sul canale relativa all'istante di misura) e, successivamente, calcolare la media dei valori precedentemente ottenuti nell'intervallo di 6 minuti esaminato.

Alternativamente, qualora l'analizzatore di spettro consenta l'operazione di media in potenza delle tracce (POWER AVERAGE), si acquisisce il maggior numero di tracce possibile, sempre nell'intervallo di 6 minuti, e successivamente si trasferisce sul calcolatore collegato all'analizzatore, la traccia risultante dall'operazione di media in potenza delle singole tracce, e su questa si effettua l'operazione di calcolo del CP secondo l'equazione (6.4), per ottenere la potenza sul canale radio considerato nell'intervallo di 6 minuti.

### **Campi da impianti radio e TV numerici (DAB e DVBT)**

Per quel che concerne le misure eseguite con strumentazione a banda larga valgono le stesse considerazioni già esposte per gli impianti radio.

Una linea guida adottabile, per le misure in banda stretta, è quella di eseguire le misure sul canale di interesse in modalità CHANNEL POWER; questa scelta è dettata dal fatto che, per effetto della moltiplicazione delle portanti in tecnica OFDM, si ha una distribuzione uniforme dell'energia spettrale dei segnali sull'intera banda assegnata al canale e non solo nell'intorno della frequenza portante dello stesso, come avviene per i sistemi di diffusione radio e TV analogici.

Nel caso di segnali TV numerici, a differenza della TV analogica tradizionale, non si ha più la distinzione tra frequenze portanti audio, video e colore: queste informazioni vengono opportunamente codificate tramite adeguati bit nella trama che compone ciascun quadro del segnale TV. Viene meno, pertanto, la necessità di acquisire per ogni canale una traccia per la determinazione del picco audio e una per quello video.

Per una corretta esecuzione delle misure su segnali ad allargamento di spettro come quelli in questione, i parametri di impostazione dello strumento devono rispettare le seguenti condizioni:

- la larghezza di banda del filtro selettivo a frequenza intermedia (RBW) deve essere piccola in confronto alla larghezza del canale da esaminare,

soprattutto per consentire una netta discriminazione tra canali adiacenti; la migliore RBW è tipicamente compresa tra 1 ÷ 3% della larghezza del canale, ma anche valori più bassi sono ammissibili, purché il tempo di spazzolamento dello strumento (SWEEP TIME) non aumenti troppo;

- dovendo utilizzare, per misure di tipo CHANNEL POWER, un detector di tipo SAMPLE o RMS, la larghezza di banda del filtro video passa basso (VBW) deve essere almeno il triplo della RBW, al fine di evitare l'effetto di media sulla tensione video, con conseguente sottostima dei segnali noise-like come quelli in questione.

L'allestimento della catena strumentale deve essere eseguito con estrema cura per contenere gli errori di misura entro limiti accettabili. Un ruolo importante a questi fini è giocato anche dalle modalità di utilizzazione dei sensori e dei misuratori. Una sintesi delle principali precauzioni da adottare può essere la seguente:

- i cavi di collegamento del sensore allo strumento misuratore, se non in fibra ottica, devono essere disposti perpendicolarmente alla direzione della polarizzazione del campo;
- durante la misura, lo strumento non deve subire interferenze;
- lo strumento non deve appoggiare su strutture conduttrici;
- il corpo dell'operatore deve distare almeno 3 m dallo strumento;
- qualora si utilizzi un sensore isotropico, è opportuno verificarne l'isotropicità montandolo sull'asse principale dello strumento;
- nel caso di misure in ambienti confinati, i punti di misura devono essere scelti a distanze dalle pareti di almeno 3 volte la dimensione massima del sensore o dell'antenna, in modo da ottenere valori mediamente validi in tutto il locale.

Con riferimento alle modalità di utilizzazione della strumentazione nel seguito vengono riportate alcune utili osservazioni per una migliore esecuzione delle sessioni di misura.

Le caratteristiche della strumentazione a banda larga, normalmente fornite a corredo dello strumento, sono ricavate con segnale test monocromatico, e inoltre spesso solo la parte terminale del sensore è interessata alla caratterizzazione. Sul



campo normalmente queste condizioni non si ripetono in quanto quasi sempre si è in presenza di sorgenti multiple, spesso in campo perturbato: in questo caso tutto lo strumento è interessato dal campo elettromagnetico nel quale è immerso.

Prima di iniziare una campagna di misure è necessario verificare il corretto funzionamento degli strumenti attraverso i seguenti controlli:

- eseguendo le prove funzionali descritte sui rispettivi manuali d'uso;
- nel caso di sonde isotrope, controllando che la lettura sia indipendente dall'orientamento della sonda rispetto alla sorgente;
- verificando eventuali effetti di captazione dei cavi, variandone la posizione rispetto al sensore lasciato in posizione fissa;
- verificando la scadenza dei certificati di taratura dei componenti il sistema di misura.

Quando è usata strumentazione con sonde intercambiabili, si deve avere cura di usare i corretti dati di calibrazione relativi alla particolare sonda utilizzata per la misura, preferibilmente riportati sulla sonda stessa da una apposita targhetta.

L'accuratezza della misura dipende inoltre dalle eventuali perturbazioni introdotte dalla presenza dell'operatore nell'area di interesse: pertanto è necessario che le misure di intensità di campo elettrico (o magnetico) siano effettuate negli spazi accessibili ai soggetti potenzialmente esposti, ma in assenza degli stessi soggetti.

Oltre ai criteri generali sull'allestimento e le verifiche del sistema di misura appena esposti, si riportano di seguito ulteriori suggerimenti, soprattutto con riferimento alle misure in banda stretta, che richiedono, data la loro delicatezza, precauzioni e accorgimenti particolari:

- la sorgente di alimentazione deve essere tale da non influenzare in modo apprezzabile la misura;
- per ottenere ciò, la sorgente in corrente alternata deve produrre una tensione il più vicino possibile alla sinusoidale. È comunque preferibile che l'apparecchiatura possa funzionare con alimentazione in corrente continua;
- il ricevitore, o l'analizzatore di spettro, deve presentare una immunità elettromagnetica ai campi ad alta frequenza adeguata all'impiego. Qualora la strumentazione in uso debba funzionare in presenza di campi

elettromagnetici superiori a quelli dichiarati dal costruttore, si rende necessario mettere in atto provvedimenti tali da ridurre l'esposizione, per esempio con l'ausilio di schermature. È comunque necessario verificare ogni volta l'efficienza dei provvedimenti adottati;

- i sensori e le antenne devono funzionare in condizioni di campo imperturbato evitando accoppiamenti con oggetti metallici. Allo scopo è indispensabile tenere presente che le variabili che possono influenzare le condizioni di funzionamento sono principalmente le dimensioni del sensore o dell'antenna, le dimensioni dell'oggetto perturbante, la lunghezza d'onda e la presenza di sorgenti di emissione fuori banda.

Le misure devono essere eseguite dopo che tutti gli elementi componenti il banco di misura hanno raggiunto la stabilizzazione termica, secondo le indicazioni fornite dai costruttori degli apparati sui relativi manuali d'uso.

Le misure da eseguire dipendono dalle finalità delle stesse, dalla tipologia delle sorgenti e dal tipo di territorio interessato. Con riferimento alle misure volte alla verifica della conformità degli impianti e delle apparecchiature ai limiti prescritti dalle legislazioni o dalle norme tecniche, si precisano qui di seguito alcuni aspetti essenziali relativi all'esecuzione di tali misure:

- le misure di intensità di campo elettrico (o magnetico) devono essere effettuate negli spazi accessibili ai soggetti potenzialmente esposti, ma in assenza degli stessi: infatti, i limiti di esposizione sono espressi in termini di campi imperturbati, anche se in realtà i campi possono essere perturbati dalla presenza di persone nell'area di interesse;
- si deve considerare una suddivisione dell'area da caratterizzare in parti omogenee (per esposizione alle sorgenti, per popolazione, ecc.) e all'interno di queste si deve eseguire un numero di misure statisticamente significativo, tale da permettere la determinazione delle distribuzioni temporali e spaziali dei campi; tale numero deve essere scelto sulla base della superficie oggetto di indagine e delle persone stabilmente residenti;
- la caratterizzazione dell'area, dopo l'esecuzione delle misure, si ottiene calcolando i parametri statistici più idonei (medie e deviazioni tipo) per

valutare la massima esposizione possibile della popolazione, anche in funzione della destinazione d'uso dell'area.

Tutte le misure volte alla verifica della conformità degli impianti e delle apparecchiature ai limiti prescritti dalle legislazioni o dalle norme tecniche devono essere effettuate con strumenti tarati. È necessario che le tarature siano riferibili a campioni nazionali o internazionali, attraverso una catena ininterrotta di tarature, tutte con incertezze definite. La periodicità della taratura dovrebbe seguire le indicazioni del costruttore ed essere comunque almeno biennale. Nell'intervallo che intercorre tra due tarature successive si devono eseguire, a cura dell'utilizzatore, verifiche periodiche della taratura dello strumento.

Gli strumenti di misura o le catene strumentali attualmente disponibili sul mercato consentono di eseguire le misure, in accordo con le procedure previste dalle norme con una incertezza contenuta entro 3 dB.

I livelli di intensità di campo ottenuti in queste condizioni possono essere confrontati direttamente con i "valori limite" prescritti dalle normative vigenti in materia.

I livelli di campo misurati con strumenti o catene strumentali aventi incertezza superiore a 3 dB sono da ritenersi solo indicativi; essi possono essere utilizzati quando differiscono dai valori limite di una quantità superiore alla incertezza di misura dichiarata. In caso contrario è necessario ripetere le misurazioni con strumentazione che garantisca una maggiore accuratezza.

Il valore dell'incertezza non deve essere sommato al livello di campo misurato ma deve essere sempre dichiarato nel rapporto di misura.

La valutazione dell'incertezza e la sua espressione nel rapporto di misura devono seguire la norma UNI CEI 9 (1997): "Guida all'espressione dell'incertezza di misura".

Le misure all'aperto devono essere eseguite in assenza di precipitazioni atmosferiche e con clima asciutto. La temperatura ambientale deve essere compresa nell'intervallo di buon funzionamento dichiarato dal costruttore per la strumentazione impiegata.

I limiti di esposizione sono espressi dalla normativa di riferimento in termini di medie spaziali e temporali del campo elettromagnetico. La distribuzione spaziale e temporale delle misure deve quindi essere tale da descrivere adeguatamente l'andamento del campo, in modo da poter effettuare correttamente le medie dei

valori misurati. Tali medie sono ottenute o come media aritmetica delle densità di potenza o, in modo equivalente, come media quadratica dei valori dei campi elettrici.

Come indicazione di carattere generale si può suggerire che qualora le valutazioni preliminari abbiano fornito valori di campo nettamente inferiori a quelli limite delle normative di riferimento (ad esempio inferiori a metà dei valori limite), le indagini spaziali e temporali descritte nel seguito possono essere opportunamente semplificate.

Con riferimento alla distribuzione spaziale, deve essere esaminato un numero di punti adeguato alla lunghezza d'onda del campo e alle dimensioni della sonda, per garantire che la misura possa rilevare valori approssimati sia massimi sia minimi. L'indagine spaziale deve permettere anche di valutare la variazione di campo lungo una superficie equivalente alla sezione verticale del corpo umano. Nel caso si utilizzino antenne accordate di dimensioni non trascurabili (per esempio, circa 2 m per le radiotrasmissioni in modulazione di frequenza), l'indagine può essere limitata, per ogni punto di misura, a una sola altezza dal suolo (altezza standard di 1,5 m), in quanto il risultato della misura costituisce già di per sé un media spaziale del campo sulla lunghezza totale dell'antenna. Nel caso, invece, si utilizzi un'antenna di piccole dimensioni rispetto all'altezza media del corpo umano, è generalmente necessario considerare, per ogni punto di misura, più altezze dal suolo per poter ottenere una media spaziale significativa. A questo scopo si consiglia di eseguire tre misure, ad altezze standard pari a 1,1 m, 1,5 m e 1,9 m da terra o dal livello dei piedi, se l'area d'interesse è al di sopra del livello del terreno: a tali altezze, infatti, possono essere esposti gli organi più critici di una persona adulta. Se, per motivi pratici, vengono scelte altezze diverse dai suddetti valori standard, esse devono essere debitamente indicate nella relazione tecnica relativa alle misure eseguite, specificando i motivi di tale scelta.

Qualora l'analisi spaziale del campo individui l'esistenza di "punti caldi" è opportuno che la relazione tecnica riporti tutte le informazioni che permettano di individuare la probabilità di presenza e permanenza di persone in tali punti, in modo da suggerire possibili successive azioni quali risanamento, spostamento di postazioni di lavoro, segnalazione con cartelli.

Con riferimento alla distribuzione temporale, la durata di ciascuna misura deve essere scelta in modo tale da poter caratterizzare adeguatamente la variazione del segnale in esame: per tener conto di segnali molto variabili nel tempo le normative di riferimento definiscono una durata di alcuni minuti (ad esempio 6 minuti).

Nel caso di segnali con livelli praticamente costanti nel tempo (quali ad esempio quelli di radiodiffusione sonora FM che sono determinati dall'ampiezza dell'onda portante, la quale si mantiene appunto praticamente costante), l'intervallo di misura può essere sensibilmente ridotto (ad esempio ad alcune decine di secondi, dell'ordine del tempo di stabilizzazione dello strumento).

Se la sorgente ha condizioni di funzionamento variabili nel tempo, la misura deve essere effettuata preferibilmente in condizioni di emissione massima: ad esempio per le stazioni radio base si potrà acquisire dal gestore l'indicazione della fascia oraria di massimo traffico in un periodo di 24 ore, ed effettuare quindi la misura nel momento di picco massimo.

Una volta effettuate le misure è necessario procedere con una operazione di elaborazione dei dati che, data una serie di valori misurati e data la conoscenza dell'ambiente elettromagnetico relativo alla zona di interesse, permette di sapere se in un generico punto appartenente a tale zona è possibile che si verifichino sfioramenti dei valori limite, tenendo conto che tali elaborazioni vengono condotte maggiorando i valori misurati al fine di garantire il necessario margine di sicurezza.

Le tecniche di estrapolazione sono modalità di calcolo del livello di campo elettromagnetico finalizzate a svincolare la misura dalla reale situazione di carico dell'impianto, permettendo così di verificare se in un dato punto sia possibile o meno superare i limiti, ipotizzando il caso peggiore di emissione della sorgente. È utile, quindi, ricorrere a tali tecniche se si stanno considerando sorgenti caratterizzate da emissione variabile nel tempo e non è possibile effettuare la misura nel momento di massima potenza irradiata perché non noto a priori, come nel caso delle stazioni radio base. Nel seguito, pertanto, si descriveranno le procedure estrapolative nel caso di misure eseguite su impianti GSM e UMTS.

In generale, le elaborazioni teoriche forniscono dei "limiti superiori" che maggiorano il valore di campo effettivamente presente in un dato punto: tali valori hanno, ovviamente, finalità diverse rispetto a quelle della misura vera e propria

(con la quale si accerta quanto realmente si verifica in un dato luogo, in alcune circostanze, secondo le metodologie descritte dalle norme), e l'eventuale superamento del valore limite tramite estrapolazione non deve intendersi come effettivo superamento dello stesso.

### **Misure a banda larga**

Se la sorgente ha condizioni di funzionamento variabili nel tempo, l'utilizzo di tecniche di estrapolazione è inutile nel caso in cui la misura venga effettuata in condizioni di emissione massima. Ad esempio, per le stazioni radio base si potrà acquisire dal gestore l'indicazione della fascia oraria di massimo traffico in un periodo di 24 ore, ed effettuare quindi la misura nel momento di picco massimo.

Quando nel caso delle SRB non si conosce il momento di massimo traffico, è possibile, a partire dalla misura, utilizzare tecniche di calcolo che richiedono la conoscenza del numero massimo di portanti a disposizione delle sorgenti presenti, e quindi il coinvolgimento del gestore. Quando si effettua una misura in banda larga il risultato della misura sarà, in generale, la somma di diversi contributi. Nel caso di una SRB esso sarà dato dal valore di fondo cui sono sommati i contributi delle portanti attive in quel momento. Ipotizzando che, indipendentemente dal reale contenuto spettrale del campo misurato, il valore di campo elettrico  $E_{MIS}$  (in V/m) letto sullo strumento sia dovuto a un segnale a una singola frequenza (portante o canale), e conoscendo le caratteristiche tecniche delle sorgenti sotto indagine, si può cautelativamente estrapolare che la massima esposizione possibile nel punto considerato sia sempre minore della quantità:

$$E_{max} = E_{MIS} \cdot \sqrt{k} \quad [V/m] \quad (6.6)$$

dove  $k$  rappresenta il numero massimo di frequenze (portanti o canali) a disposizione delle sorgenti presenti.

Il valore misurato  $E_{MIS}$  rappresenta già la somma del valore di fondo e delle portanti attive in quel momento. È evidente che, moltiplicando questo valore per il fattore che tiene conto del numero di portanti presenti nell'impianto, si moltiplica anche il valore di fondo e le eventuali altre portanti attive. Pertanto il valore  $E_{max}$  non rappresenta il valore massimo possibile del campo in quel punto, ma esclusivamente un limite superiore estremamente cautelativo. In altre parole quel

valore potrà essere raggiunto solo nel caso in cui il fondo presente sia nullo e nel momento della misura sia attiva una sola portante. Nella pratica questa condizione non si verifica pressoché mai.

È da notare che nel caso delle SRB l'impianto può essere dotato di un numero  $n$  di frequenze di servizio sempre attive (una per il GSM, una per il DCS, ecc.); il campo massimo è calcolato nel seguente modo:

$$E_{\max} = \frac{E_{MIS}}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{k} \quad (6.7)$$

In ogni caso, se  $E_{\max}$  risulta minore del limite da applicare, è evidente che in nessuna condizione di funzionamento dell'impianto sarà possibile il superamento del limite nel punto di misura. In caso contrario sarà sufficiente ripetere la misura in condizioni di massimo traffico, o approfondire l'indagine con una catena strumentale a banda stretta. Nell'eventualità in cui la misura venga effettuata già nelle condizioni di massimo traffico, le stime sopraindicate perdono di significato.

### **Misure a banda stretta**

Nel caso, ad esempio, di indagini su stazioni radio base GSM possono essere effettuate delle stime che, pur non avendo valore di misura, possono aiutare a individuare un valore calcolato per il limite superiore del livello di campo che può trovarsi in un punto. La procedura consiste nel misurare nel punto in esame il livello di campo relativo alla portante di servizio BCCH, che è sempre attiva alla massima potenza, e poi moltiplicare tale valore per la radice quadrata del numero massimo di portanti disponibili per l'impianto in esame, dato che deve essere comunque comunicato dal gestore.

Il valore così ottenuto rappresenta una stima del valore di campo che si misura nelle condizioni di massima emissione della sorgente. Tali condizioni sono particolarmente difficili da verificare nella pratica; affinché il campo realmente presente sia pari al valore calcolato come descritto in precedenza, occorrerebbe il verificarsi contemporaneo di tre condizioni:

- tutti i canali di traffico dovrebbero essere occupati da altrettanti clienti, situazione che il progetto di rete tende a ridurre e a evitare, dimensionando opportunamente i canali di traffico su ogni impianto;

- tutti i clienti dovrebbero essere in condizioni "critiche" di collegamento tra il telefono mobile e la stazione radio base (grande distanza o frapposizione di ostacoli), in modo da forzare l'impianto a trasmettere tutti i canali di traffico alla massima potenza: in caso contrario, infatti, il meccanismo di Power Control interviene riducendo automaticamente la potenza di ogni canale di traffico laddove non sia necessaria per mantenere una buona qualità della conversazione;
- tutti i clienti dovrebbero essere contemporaneamente in ricezione, cioè dovrebbero "ascoltare" il segnale sonoro dal proprio telefono: in caso contrario, infatti, il meccanismo di DTX down-link interviene per "spegnere" automaticamente la trasmissione del canale di traffico se si è in ascolto e non viene emesso alcun suono da trasmettere.

Il valore calcolato appare, dunque, come una estrapolazione puramente teorica, un "caso peggiore" possibile in via ipotetica, ma che non si può ragionevolmente verificare nel corso della vita dell'impianto per un periodo di 6 minuti consecutivi. Anche in questo caso, quindi, se la stima evidenzia un valore superiore al limite, non si può concludere che questo verrà superato.

Per stimare il valore di campo elettrico in un punto di misura in condizioni di massimo traffico di una SRB UMTS posta sotto indagine è necessario:

- verificare attraverso simulazioni teoriche, che il punto di misura sia posizionato in modo tale da garantire che il segnale dominante nella banda di frequenza in esame sia quello della cella sotto indagine (rapporto di almeno 1/10 tra i valori di campo elettrico prodotti dalla SRB oggetto di indagine e quelli generati da altre SRB);
- accertarsi che la misura sia effettuata in un intervallo temporale in cui ci si trovi il più vicino possibile alla situazione "ideale" di attività dei soli canali di controllo della cella: SCH (Sincronization CHannel), CPICH (Common Pilot Channel), P-CCPCH (Primary-Common Control Physical Channel) e S-CCPCH (Secondary-CCPCH); in pratica la misura dovrà essere effettuata nelle fasce orarie di minor traffico telefonico, al limite da concordare con l'operatore;



- conoscere il parametro di rete, impostabile dal gestore telefonico, che rappresenta la percentuale  $\rho$  di potenza dedicata al CPICH rispetto alla massima potenza erogabile dalla stazione radio base: tale parametro  $\rho$ , essendo variabile e compatibile con l'ottimizzazione della rete, potrà essere comunicato dal gestore di telefonia anche in un momento successivo alla misura. In particolare  $\rho$  può assumere valori che dipendono dalle dimensioni della cella e dal traffico che la cella stessa deve gestire: per tale motivo non potrà avere valori troppo elevati al fine di non generare interferenza (generata dalla porzione associata al CPICH) sulle altre celle, ma non potrà avere valori troppo piccoli che non permettono ai terminali mobili di effettuare le procedure necessarie per la connessione alla rete; un valore che può essere ritenuto indicativo è di  $\rho = 10\%$ .

Dividendo la potenza ricevuta (associata ai canali di controllo) per  $\rho$ , si ottiene la misura associata alle condizioni di potenza massima erogabile dalla cella, quindi:

$$E_{UMTS} = \frac{E_{CP}}{\sqrt{\rho}} \quad (6.8)$$

dove:

- $E_{CP}$  è il valore di campo elettrico misurato in V/m sull'intera banda sotto esame (modalità CHANNEL POWER);
- $E_{UMTS}$  è il valore di campo elettrico estrapolato sempre in V/m.

Tale valore è cautelativo nel caso in cui il parametro  $\rho$  impiegato nel calcolo sia quello associato al solo canale CPICH; per ottenere un valore più veritiero di  $E_{UMTS}$  occorrerebbe il  $\rho$  relativo a tutti i canali di controllo sempre presenti come SCH, P-CCPCH e S-CCPCH.

È opportuno sottolineare che il valore così ottenuto è il risultato di una misura che tiene in considerazione i contributi derivanti anche da celle vicine, che trasmettono sulla medesima frequenza, o dei settori appartenenti al medesimo sito (qualora questi utilizzino la medesima portante). Il valore estrapolato con l'equazione (6.8), inoltre, rappresenta il valore massimo teorico raggiungibile in caso di massima potenza erogabile dalla SRB. Così come per il GSM, nel funzionamento reale di una cella, oltre agli algoritmi di riduzione della potenza, sono presenti differenti algoritmi che tendono a evitare che la cella raggiunga la saturazione (in termini di

potenza erogabile). Ad esempio, è stabilita una soglia (parametro di ottimizzazione della rete) che consente di rifiutare le chiamate entranti, al fine di garantire il corretto servizio agli utenti che utilizzano la SRB. Tale soglia può essere superata solo in caso di eventi prioritari (ad esempio soft-handover o richiesta di potenza da parte di utenti già attivi), ma il raggiungimento della potenza massima erogabile della SRB è un evento puramente teorico.

Nel caso in cui si desiderasse valutare il campo elettrico nella condizione di massima potenza emessa dalla stazione radio base UMTS, senza incorrere nelle sovrastime eccessive che si possono riscontrare con l'impiego di un analizzatore di spettro classico (problema relativo alla misura dei contributi derivati da SRB vicine), è necessario adottare come strumento di misura un analizzatore di segnali vettoriali. Esso, operando nel dominio dei codici, consente di misurare con precisione la potenza associata al CPICH: l'adozione di questo strumento permette di eseguire le misure, finalizzate all'estrapolazione, in qualsiasi momento della giornata, prescindendo dal carico della rete (effetto di cui bisogna tener conto per l'estrapolazione mediante utilizzo dell'analizzatore di spettro classico).

Qualora la cella interessata dalla sessione di misura fosse in posizione di co-siting con altri sistemi di telefonia mobile, il campo elettrico totale in un determinato punto di indagine dovrà essere calcolato, tenendo conto del contributo apportato dai diversi sistemi presenti, secondo l'equazione:

$$E_{SRB\ TOT} = \sqrt{E_{GSM}^2 + E_{DCS}^2 + E_{UMTS}^2} \quad [V/m] \quad (6.9)$$

dove i termini sotto radice sono i valori di campo elettrico in V/m estrapolati per i diversi sistemi di telefonia mobile.

A conclusione della campagna di misura è necessario organizzare i risultati ottenuti in maniera organica ed esplicativa, redigendo una relazione tecnica alla quale aggiungere piante o planimetrie e l'ulteriore documentazione che si ritiene opportuna, al fine di rendere maggiormente comprensibili i risultati ottenuti.

La relazione deve riportare una serie di informazioni preliminari, facendo particolare attenzione alla tutela della privacy del soggetto proprietario, quali:

- luogo e data delle misure;
- descrizione e caratteristiche della sorgente o dell'impianto oggetto della misura;

- dati di funzionamento;
- dati della strumentazione utilizzata;
- condizioni di misura;
- punti di misura opportunamente riportati anche sulle piante o planimetrie e relative altezze della sonda rispetto al terreno.

La relazione deve successivamente riportare sia i valori misurati sia i valori calcolati, espressi come campo elettrico (V/m), come campo magnetico (A/m), come induzione magnetica (T) o come densità di potenza ( $W/m^2$ ); in quest'ultimo caso si deve indicare se il valore riportato è scaturito dalla misura del campo elettrico o magnetico, oppure se è stato stimato.

In alcuni casi può essere di interesse esprimere i risultati:

- in termini di andamento temporale dei valori complessivi ottenuti con misure a banda larga;
- in funzione della distanza dalla sorgente;
- in termini di parametri statistici relativi ai risultati ottenuti per misure eseguite a banda larga o a banda stretta su determinati intervalli di tempo;
- in termini di analisi localizzate intorno a zone o ambienti di rilevanza dal punto di vista protezionistico.

Nella relazione dovrebbero, inoltre, essere riportati i riferimenti alla legislazione, le eventuali norme tecniche e raccomandazioni, nonché le conclusioni sui risultati ottenuti, corredati eventualmente da proposte e suggerimenti per l'esecuzione di interventi di bonifica ai fini protezionistici.

Ciò che è stato fin'ora descritto riguarda le modalità e la strumentazione da adottare per eseguire misure su impianti già esistenti. Ma nel caso in cui un nuovo impianto debba essere installato, è necessario eseguire una serie di calcoli e simulazioni per comprendere se il campo emesso da questa nuova sorgente, sommato ai campi già presenti, rispetta ancora i limiti normativi oppure se è necessario cambiare i dati tecnici o il punto geografico di installazione. Tali simulazioni sono essenziali all'operatore per dimensionare tutti i parametri in modo da ottenere gli obiettivi di copertura voluti, ma anche a tutti gli organi che devono autorizzare la creazione di tale impianto. In generale è possibile eseguire una

valutazione teorica della densità di potenza, di campo elettrico o di campo magnetico ricorrendo a tecniche numeriche. La distribuzione di campo irradiato è descrivibile con un'espressione di tipo integrale risolvibile numericamente. I metodi numerici per risolvere i problemi di elettromagnetismo applicati alle antenne si basano sul calcolo delle correnti sull'antenna con opportune modellizzazioni e sulla loro successiva integrazione. Questi metodi possono essere suddivisi in tre gruppi e sono: il metodo dei momenti (MOM), quello degli elementi finiti (FEM) e quello delle differenze finite nel dominio del tempo (FDTD).

Per la valutazione del campo elettromagnetico in un punto generico dello spazio si impiega la semplificazione che utilizza le condizioni di campo lontano e trascura le riflessioni del terreno, infrastrutture e vegetazione. Bisogna però tenere conto che tale procedura di calcolo è di tipo cautelativo in quanto i valori di campo sono sovrastimati per via delle semplificazioni sopra descritte. A grandi distanze dalla sorgente si verificano le condizioni di campo lontano; la densità di potenza può essere ricavata se si conosce la funzione di guadagno dell'antenna e la potenza di alimentazione:

$$S(r, \theta, \varphi) = \frac{P_{\text{alim}} G(\theta, \varphi)}{4\pi^2} \quad (6.10)$$

Applicando la relazione di impedenza  $S = E^2/Z_0 = H^2 Z_0$  ( $Z_0 = 377\Omega$ ) si ricavano i valori efficaci del campo elettrico e del campo magnetico:

$$E(r, \theta, \varphi) = \frac{\sqrt{30 P_{\text{alim}} G(\theta, \varphi)}}{r} \quad (6.11)$$

$$H(r, \theta, \varphi) = \frac{\sqrt{\frac{P_{\text{alim}} G(\theta, \varphi)}{30}}}{4\pi r} \quad (6.12)$$

Dove  $P_{\text{alim}}(\text{dBm}) = P_{\text{srb}}(\text{dBm}) + G(\text{dB}) - A(\text{dB})$

$P_{\text{srb}}$  è la Potenza in uscita dalla SRB,  $G$  è il guadagno complessivo di eventuali amplificatori posti tra l'SRB e l'antenna e  $A$  è la somma di tutte le attenuazioni dei componenti passivi.

Ricordiamo che:

$$G(\theta, \phi) = G_{\text{max}} D_v(\theta) D_H(\phi) \quad (6.13)$$

dove  $D_V(\theta)$   $D_H(\phi)$  sono i diagrammi di irradiazione verticale e orizzontale e  $G_{\max}$  è il valore di guadagno nella direzione di massima irradiazione.

La valutazione dei livelli di campo elettromagnetico può essere effettuata secondo i seguenti passi:

- Calcolo del sistema di riferimento locale dell'antenna nelle coordinate sferiche  $(r, \theta, \phi)$  in funzione del sistema di riferimento globale:

$$\begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha \cos \beta & -\sin \beta \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ \cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_G - x_A \\ y_G - y_A \\ z_G - z_A \end{bmatrix}$$

$$r_L = \sqrt{(x_G - x_A)^2 + (y_G - y_A)^2 + (z_G - z_A)^2} \quad (6.14)$$

$$\theta_L = a \sin\left(\frac{z_L}{r_A}\right)$$

$$\varphi_L = a \sin\left(\frac{y_L}{\sqrt{r_L^2 - z_L^2}}\right) \operatorname{sgn}(x_L) + \frac{\pi}{2} \operatorname{sgn}(y_L)(1 - \operatorname{sgn}(x_L)) \quad (6.15)$$

- Calcolo della funzione del guadagno;
- Calcolo della potenza;
- Calcolo del valore della densità di potenza del campo elettrico e magnetico;

Nella grande maggioranza delle installazioni vi sono più antenne trasmettenti che coprono i medesimi settori o che presentano diagrammi di irradiazione con lobi principali sovrapposti. In questo caso è necessario operare le valutazioni di campo elettromagnetico considerando contemporaneamente le emissioni di tutte le antenne che contribuiscono al valore di campo. Considerando che le  $M$  sorgenti risultano essere non correlate, i contributi di campo vengono sommati quadraticamente:

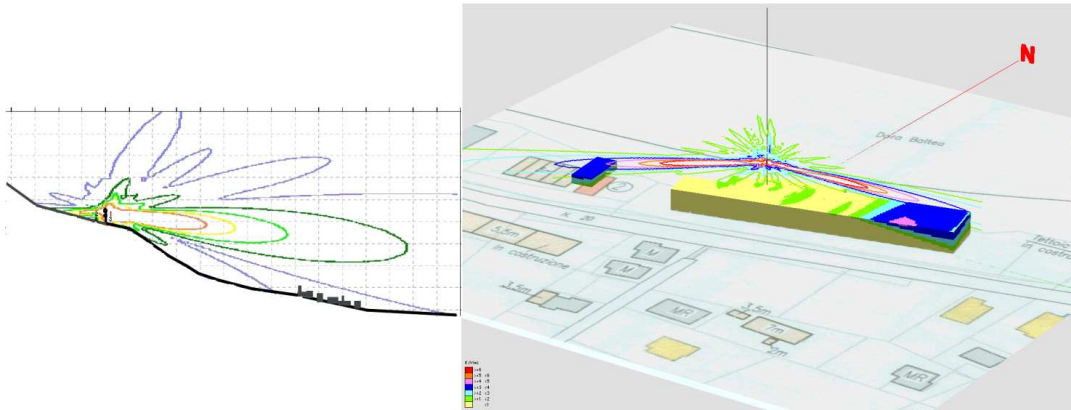
$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^M E_i^2} \quad (6.16)$$

$$H = \sqrt{\sum_{i=1}^M H_i^2} \quad (6.17)$$

$$S = \sum_{i=1}^M S_i \quad (6.18)$$

Per visualizzare le variazioni dei livelli di campo nello spazio si disegnano le curve di iso-livello su sezioni significative dello spazio intorno alle antenne (piani orizzontali a

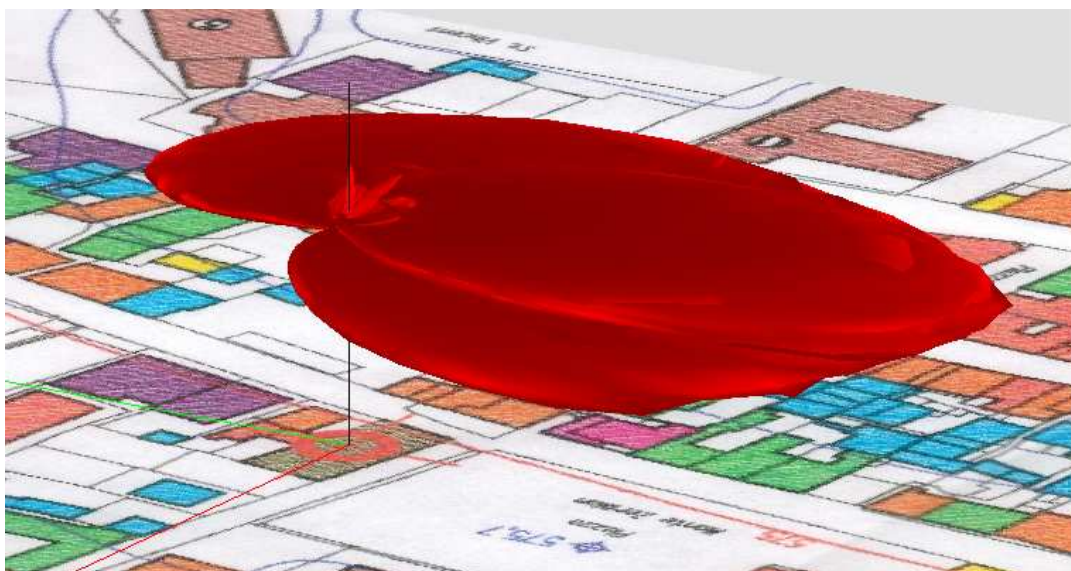
diverse quote e piani verticali che contengono l'asse di puntamento). Oltre a queste curve è utile l'utilizzo del volume di rispetto per valutare l'estensione del campo per determinati valori d'intensità.



**Figura 6.1: Esempi di simulazione mediante linee di isolivello**

Il volume di rispetto è la regione dello spazio attorno all'antenna, all'esterno della quale il campo elettromagnetico è inferiore al valore limite.

In presenza di più antenne trasmettenti non è possibile utilizzare semplici relazioni per la determinazione del volume di rispetto. Risulta raccomandabile costruire un'isosuperficie a campo costante calcolando il campo in un opportuno insieme di punti e collegando i punti isolivello.



**Figura 6.2 - esempio di volume di rispetto**

Le relazioni e le tecniche sopra descritte sono correttamente applicabili solo a grandi distanze dalla sorgente quando si verificano le condizioni di campo lontano. Tuttavia l'equazione della densità di potenza  $S$  fornisce valori conservativi anche per distanze inferiori alla distanza di campo lontano.

Esiste la possibilità di calcolare con metodi approssimati la distribuzione di campo nella zona vicina dell'antenna note le dimensioni fisiche e le caratteristiche radioelettriche già utilizzate nella formulazione di campo lontano. Anche in questo caso i limiti di applicabilità e i margini di errore sono di difficile verifica. È quindi opportuno operare delle verifiche attraverso il confronto con metodi numerici.

L'ottica geometrica può descrivere in modo corretto l'interazione di una sorgente di campo elettromagnetico con un corpo di forma qualsiasi, ma la sua validità si ferma ai soli campo diretto e riflesso e non copre le zone d'onda. Questa limitazione viene superata con l'utilizzo della GTD (Geometrical Theory of Diffraction), che tiene conto del campo diffratto dal bordo il quale viene diffuso in ampie regioni dello spazio. Per simulare l'effetto multipath si utilizzano gli algoritmi di ray-tracing; tali algoritmi hanno lo scopo di calcolare quali sono i raggi che collegano un punto di trasmissione  $T$  a un punto di ricezione  $R$ , tenendo conto che tali raggi possono essere sia riflessi che diffratti un numero qualsiasi di volte.

## 7. Strumento di Misura e Software

---

Per raggiungere l'obiettivo della tesi sono state eseguite misure di campo elettrico in diversi siti e i valori ottenuti sono stati messi in relazione con i dati di potenza irradiata e traffico smaltito forniti dall'operatore. L'analizzatore di spettro utilizzato da ARPA Valle d'Aosta per eseguire misure in banda stretta è l'SRM-3000 della casa costruttrice NARDA: esso è uno strumento progettato per misurare campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza compreso tra 100 kHz e 3 GHz. Esso permette di determinare il campo elettrico generato da sorgenti a RF e permette di fare misure in banda larga o in banda stretta, di poter misurare gli scrambling code del segnale UMTS o, se si vuole tenere conto dei canali di traffico, l'integrazione del segnale sull'intera banda. Inizialmente si era pensato di lasciare lo strumento a monitorare in continuo il campo elettrico nei pressi della SRB prescelta. Al di là dei problemi riscontrati nella scelta dei vari siti, descritti nel capitolo 8, sono sorti alcuni problemi legati all'utilizzo dello strumento. Innanzitutto, lo strumento possiede una batteria con un'autonomia estremamente limitata rispetto al numero di ore previste per le misure. Si era pensato, quindi, di collegare direttamente lo strumento alla rete ma tale soluzione è stata scartata in quanto la corrente transitante nel cavo di alimentazione avrebbe influito, secondo quanto affermato dal costruttore, sulla misura andando a disturbare la sonda. Per ovviare a tale disagio si è interposta un'apposita "prolunga" tra l'unità di controllo e la sonda, in modo da allontanare quest'ultima dall'alimentazione diminuendo, così, drasticamente i disturbi. A questo punto, è sorto un altro problema: lo strumento possiede una memoria di soli 16 MB, insufficienti a contenere tutti i dati delle misure, soprattutto perché la frequenza di campionamento è stata posta pari a 10 secondi che, moltiplicati per un numero di ore che varia da 6 a più di 24, crea un numero estremamente elevato di dati. E' sorta, quindi, la necessità di realizzare un'interfaccia grafica di comunicazione e controllo da remoto in modo da permettere la gestione dello strumento di misura tramite computer. Il software è stato creato, quindi, appositamente per questo lavoro di tesi e consente di controllare lo strumento secondo le principali necessità sorte durante le misure.



L'obiettivo principale della misurazione è determinare l'intensità di campo. Lo strumento, oltre al campo elettrico, è in grado di valutare la percentuale di esposizione rispetto al valore limite, la singola sorgente o il singolo canale che ci interessa, la lista di canali o sorgenti presenti in quel momento, il contributo di un



**Figura 7.1 - Unità base SRM-3000**

singolo servizio di telefonia oppure quello di tutti i canali e la loro percentuale rispetto al valore totale del campo. Il range di misurazione va da -27dBm a +23dBm. Lo strumento può rilevare valori di potenza fino a un massimo di 30 dBm. Come viene richiesto per legge, per poter

confrontare direttamente la misura data dallo strumento con il limite normativo, è necessario che l'incertezza dello strumento risulti inferiore a 3dB.

- Analizzatore di spettro portatile NARDA SRM – 3000 BN 3001/01  
N° serie: G-0115  
Data taratura: 12 giugno 2010
- Sonda di campo elettrico triassiale: NARDA BN 3501/01  
Banda di frequenza: 75 MHz – 3 GHz  
Data taratura: 12 giugno 2010
- Cavo RF: NARDA BN 3601/01 lunghezza=1,5m  
Banda di frequenza: 100 kHz – 3 GHz  
Data taratura: 12 giugno 2010

L'incertezza di misura estesa dovuta all'intera catena per valori di frequenza compresi tra 75 MHz e 3 GHz è pari a  $\pm 2.10$  dB ( $\pm 24.45\%$ ) con intervallo di confidenza del 95%.

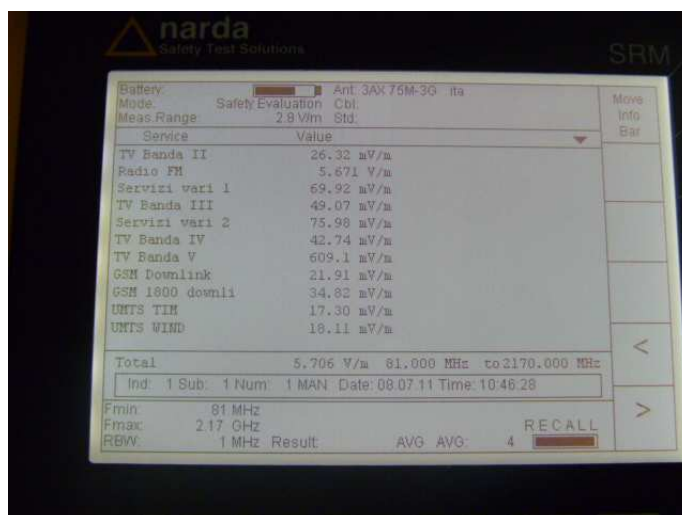
Lo strumento è costituito da un'unità centrale elaborativa e da una sonda: la casa costruttrice, NARDA, fornisce una sonda triassiale che consente di misurare l'intensità di campo

nell'intervallo di frequenze 75 MHz – 3 GHz. E' comunque possibile utilizzare altri tipi di sonde tenendo presente che lo strumento non sarà in grado di riconoscerle automaticamente ma si dovranno impostare i vari fattori di antenna. Tale



**Figura 7.2 - Sonda SRM-3000 durante l'esecuzione delle misure**

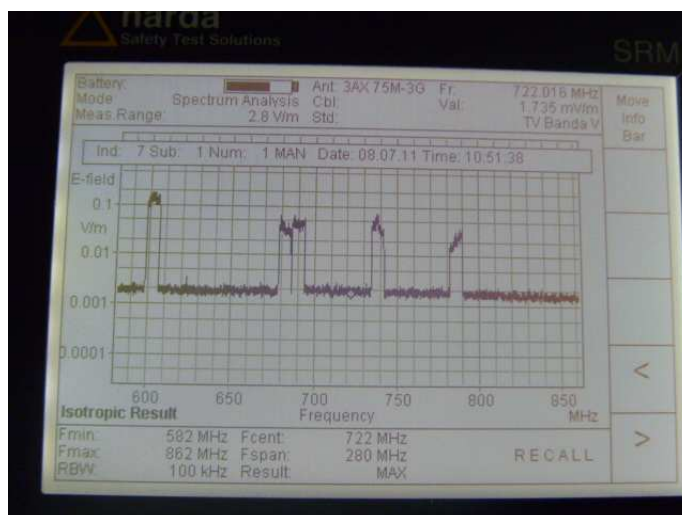
strumento è molto maneggevole e di facile utilizzo ed è stato progettato per eseguire misurazioni in esterno. Possiede uno schermo grande e molti tasti soft-key con i quali è possibile accedere al menu e configurare lo strumento. A seconda del tipo di misura che si vuole effettuare è consigliabile posizionare la sonda a una certa distanza oppure direttamente sullo strumento. Nel caso particolare delle misure, come già accennato, abbiamo posizionato la sonda su un cavalletto e l'abbiamo collegata all'unità elaborativa mediante un cavo da 1,5 m. Tale cavo di controllo trasmette i parametri dell'antenna (tipo, numero di serie, data di calibrazione, elenco dei fattori di antenna) perché possano essere riconosciuti dall'SRM-3000. E' possibile collegare l'antenna della NARDA direttamente sullo strumento di base: anche in questo caso è presente un tratto di cavo che permette il riconoscimento automatico dell'antenna e controlla l'antenna triassiale nell'esecuzione di misure isotropiche. Lo strumento possiede quattro modalità di misura differenti: Safety Evaluation, Spectrum Analysis, Time Analysis e UMTS P-CPICH Demodulation. Le varie modalità sono studiate per fornire sul posto risultati immediati di carattere informativo che non richiedono ulteriore elaborazione o analisi. Nella modalità "Safety Evaluation", sviluppata appositamente per analizzare l'esposizione all'intensità di campo in un ambiente multi frequenza, gli utenti possono accorpate un insieme di range di frequenze entro cui deve essere misurata l'intensità di campo. I risultati in ciascun intervallo di frequenza della cosiddetta Service Table, ovvero una tabella in cui sono contenute tutte le bande di frequenza (o servizi) che ci interessano, vengono visualizzati in unità di intensità di campo oppure in valore percentuale rispetto a uno standard di sicurezza selezionato. Un valore visualizzato pari a 100 % indica che il valore limite definito nello standard è stato raggiunto. Questo rende possibile la diretta rilevazione in loco della conformità ai valori limite predefiniti. La Service Table può essere modificata e integrata anche dall'utente che quindi potrà crearsi i propri setup. Nella Figura 7.3 sottostante è riportato un esempio di misura in modalità Safety Analysis e si vede che sono presenti i servizi più comuni: Radio FM, TV, GSM, GSM 1800 e UMTS.



**Figura 7.3 - Modalità Safety Analysis**

E' possibile eseguire la misura utilizzando vari tipi di traccia: è possibile visualizzare il valore misurato corrente (ACT), il valore massimo misurato (MAX), il risultato della media su un numero definito di valori misurati (AVERAGE) o il massimo tra tutti i valori medi (MAX AVERAGE). Per le misure si è sempre utilizzata la traccia ACT. E' presente, all'ingresso dello strumento, un attenuatore che viene impostato mediante il parametro Measure Range: questo definisce la sensibilità del sistema e ha effetto sui risultati visualizzati. Il parametro scelto per le misure è stato pari a 2,5 V/m in quanto non mi aspetto di misurare valori di campo superiori a tale limite. E' inoltre possibile effettuare una scelta sull'unità di misura con la quale saranno visualizzati i risultati: si può scegliere fra dBV/m, dBA/m, V/m, A/m, W/m<sup>2</sup> mW/cm<sup>2</sup> e %. L'unità di misura prescelta è stata il V/m in quanto viene misurato il campo elettrico e si vuole relazionare il valore misurato con la potenza tramite una relazione lineare e non logaritmica.

Nella modalità "Spectrum Analysis", è possibile rilevare tutte le componenti di campo nell'ambiente selezionato per ottenere una panoramica spettrale oppure per individuare i valori massimi. Anche in questo caso le funzioni avanzate dello strumento consentono l'analisi dei risultati ottenuti direttamente sul campo.



**Figura 7.4 - Modalità Spectrum Analysis**

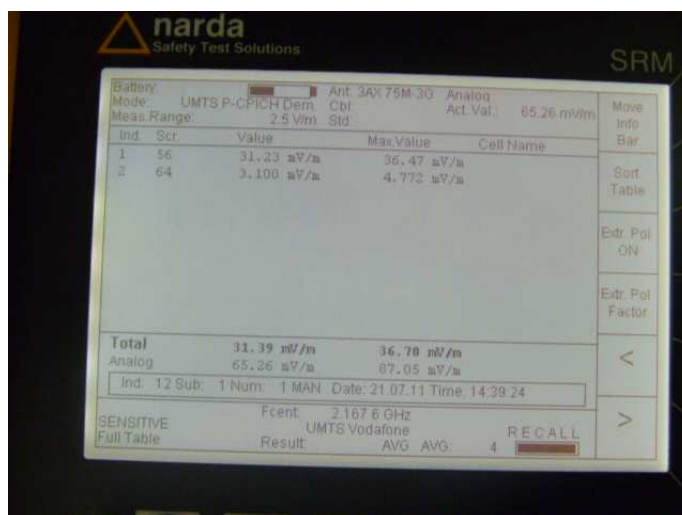
Come mostrato nella Figura 7.4, tale modalità da in uscita lo spettro totale centrato attorno alla frequenza centrale impostata. E' possibile impostare anche l'intervallo di frequenze, ovvero lo span, da visualizzare nell'intorno della frequenza centrale. In alternativa è possibile settare la frequenza massima e la frequenza minima della banda da visualizzare. Per le misure la frequenza centrale è stata posta pari a 2167.6 MHz ed è stato scelto uno span pari a 5MHz, ovvero la grandezza di banda dell'UMTS. E' importante anche impostare il valore di RBW, ovvero la risoluzione dell'ampiezza di banda, che caratterizza la selettività dell'analizzatore di spettro rispetto a segnali che presentano la stessa ampiezza. Solamente i segnali separati da una frequenza maggiore della risoluzione dell'ampiezza di banda definita possono essere distinti l'uno dall'altro. L'SRM-3000 è in grado di impostare automaticamente una risoluzione adatta in base allo span di frequenza selezionato. Tuttavia, per le nostre misure è stata scelta una RBW pari a 100 KHz, ovvero la più bassa consentita dalle normative tecniche, in modo da ottenere la risoluzione migliore.

Per una rapida valutazione dei risultati sono disponibili la funzione "marker" e una tabella dei valori di picco. Il marcatore standard (un rombo bianco) è sempre visibile, posizionato al cento dell'intervallo di frequenza e può essere spostato; sul lato dello schermo vengono indicati il valore della frequenza e quello del livello di campo relativi alla posizione del marcatore. Può essere visualizzata anche la tabella dei picchi che elenca i valori più alti rilevati nello spettro di frequenze considerato. E' possibile anche selezionare solo i picchi che superino un determinato valore soglia.

Un'interessante funzione fornita nella modalità Spectrum Analysis è la funzione di Band Integration. Tale funzionalità è stata utilizzata per le misure eseguite per la mia tesi. Essa consente di integrare i risultati in una determinata banda di frequenze; fornisce un valore di campo in banda larga all'interno dell'intervallo di frequenze considerato. La funzione di integrazione considera tutte le linee dello spettro entro l'intervallo di integrazione, comprese quelle sommerse nel rumore. Il risultato di questa funzione di analisi è quindi fortemente dipendente dal livello di rumore intrinseco e di conseguenza dall'intervallo di integrazione selezionato se i livelli di segnale sono troppo vicini al livello di rumore intrinseco. La banda di integrazione è stata posta pari a 5 MHz per le misure, dato che la tecnologia UMTS utilizza una banda di misura così costituita.

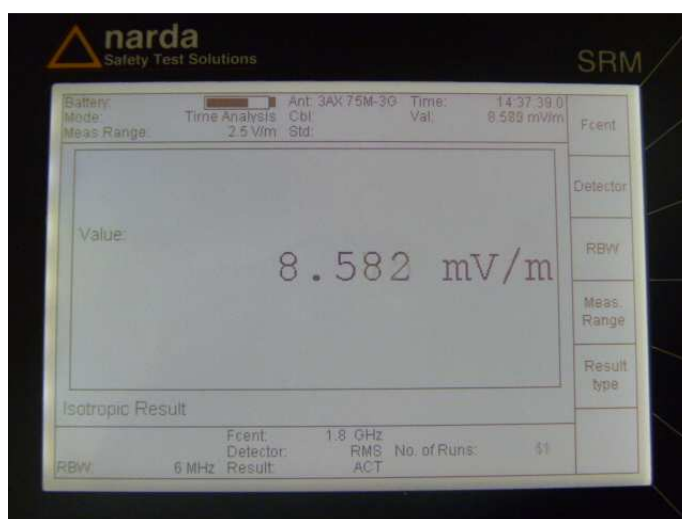
Al contrario del GSM, per la tecnologia UMTS non è sufficiente eseguire misure selettive in frequenza per individuare i canali e assegnarli a una determinata banda di frequenza. Questo poiché l'informazione di ogni canale è distribuita su un'intera banda di 5MHz ed è anche codificata mediante il codice di scrambling. Ogni cella, però, possiede una portante detta P-CPICH (Primary Common Pilot Channel) che trasmette in continuo lo stesso livello di potenza. Ogni cella possiede la propria portante P-CPICH e il proprio scrambling code. Tramite la modalità P-CPICH Demodulation lo strumento è in grado di decodificare tutti i codici di scrambling presenti nella banda di frequenza selezionata. In questo modo è possibile separare i vari contributi dovuti alle varie portanti e quindi alle singole celle, senza invece avere il valore di campo totale di quella banda di frequenze.

Per selezionare la banda di frequenza è possibile inserire la frequenza centrale (la banda è automaticamente settata pari a 5 MHz) oppure inserire il numero di canale. Anche in questo caso è necessario settare il valore del Measure Range e della risoluzione RBW.



**Figura 7.5 - Modalità UMTS P-CPICH Demodulation**

Il rumore intrinseco dello strumento è presente in tutti gli intervalli di frequenze, incluse quelle che non sono occupate dal segnale preso in considerazione. Quando si sceglie di effettuare un'analisi spettrale e di mostrare graficamente i risultati è semplice notare che le linee scompaiono sotto al piano del rumore. Ciò non è possibile quando viene visualizzato solo il valore numerico: è possibile settare una soglia in modo che lo strumento, qualora il risultato sia inferiore a tale valore, non indichi il valore vero ma indichi "<" della soglia. La soglia può assumere i valori 0, 3, 6 10, 15 e 10 dB. Tali valori sono relativi al livello di rumore intrinseco. Ciò serve per prendere in considerazione solo i valori che non si ritengano affetti da rumore. E' possibile far eseguire allo strumento una media, sia su un determinato numero di campioni che su un intervallo di tempo.



**Figura 7.6 - Modalità Time Analysis**

L'ultima modalità di misura offerta dallo strumento SRM-3000 è "Time Analysis". Tale modalità dà la possibilità di eseguire misure in banda stretta, selezionando una frequenza centrale; è possibile richiedere che venga eseguita una media su un determinato intervallo di tempo, per esempio 6 minuti come richiesto dalla normativa italiana. I risultati possono essere mostrati sia graficamente che direttamente tramite il valore misurato. Il modo "Time Analysis" è estremamente utile se vengono utilizzate sonde isotropiche, poiché nel caso di antenna mono-assiale le misure sui tre assi non sarebbero eseguite nello stesso preciso punto e nello stesso istante di tempo.

E' possibile eseguire misure RMS o del valore di picco. Nel caso in cui venga visualizzato solo il valore di campo elettrico, esso è l'ultimo valore immagazzinato. Nel caso, invece, in cui venga visualizzato il grafico, sono contenuti tutti i valori con una risoluzione in tempo di 0.1 secondi.

Grazie ad una memoria interna di 16 MB è possibile immagazzinare un certo numero di misure. I risultati della misura vengono salvati assieme all'indice, la modalità operativa, i suoi parametri, i dati dell'antenna, le modalità di misura, la data l'ora e un commento facoltativo. E' possibile settare lo strumento in modo che salvi automaticamente la misura solo nel caso in cui il valore raggiunga una soglia predefinita.

E' infine possibile controllare lo strumento da remoto. Tale funzionalità è stata molto utile ai fini della tesi in quanto è stato possibile far eseguire allo strumento misurazioni in continuo mediante il software creato appositamente per interfacciarsi con lo strumento. Il software utilizzato per comunicare con lo strumento è stato creato appositamente per questo lavoro di tesi utilizzando l'ambiente di sviluppo software "Microsoft Visual Basic 2008 Express Edition" e permette all'utente, tramite una semplice e immediata interfaccia grafica, di avere accesso ai principali comandi e funzioni dell'apparecchio. In questo capitolo verranno descritte le principali funzionalità del software, riportando solo le parti più significative del codice e i file di output generati.

La progettazione del codice è strutturata su tre form (Splash-Screen, Principale, About). Per quanto riguarda la veste grafica, invece, il programma software è

suddiviso in cinque sezioni distinte. La sezione “Parametri Seriale” dove è possibile impostare i settaggi della porta seriale alla quale verrà collegato lo strumento; la sezione “Comandi” che permette all’utente di selezionare le varie funzioni dello strumento; le sezioni “Misura Singola” e “Misure Multiple” che permettono di eseguire la misura e di salvare i dati su un file specificato dall’utente e un’ultima sezione consistente in una casella di testo, che riporta informazioni sullo stato attuale dello strumento, sulla connessione, sulle misure e avvisa l’utente nel caso in cui si verifichino degli errori di comunicazione. In questo modo è possibile monitorare il corretto funzionamento del sistema e intervenire fermando l’acquisizione dei dati in caso di necessità.

Se si lancia il programma, la prima schermata che compare è mostrata in Figura 7.7. Si tratta di uno “Splash-Screen” ossia una finestra temporanea che riporta il titolo dell’applicazione che si sta eseguendo e alcune informazioni riguardanti la versione e il nome del programmatore.



Figura 7.7 - Splash-Screen

Di seguito si riporta il codice relativo al form “Splash-Screen”:

```
Private Sub SplashScreen1_Load(ByVal sender As Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Me.Load
```

```
    My.Application.MinimumSplashScreenDisplayTime = 8000

    'Application title
    If My.Application.Info.Title <> "" Then
        ApplicationTitle.Text = My.Application.Info.Title
    Else
```



```

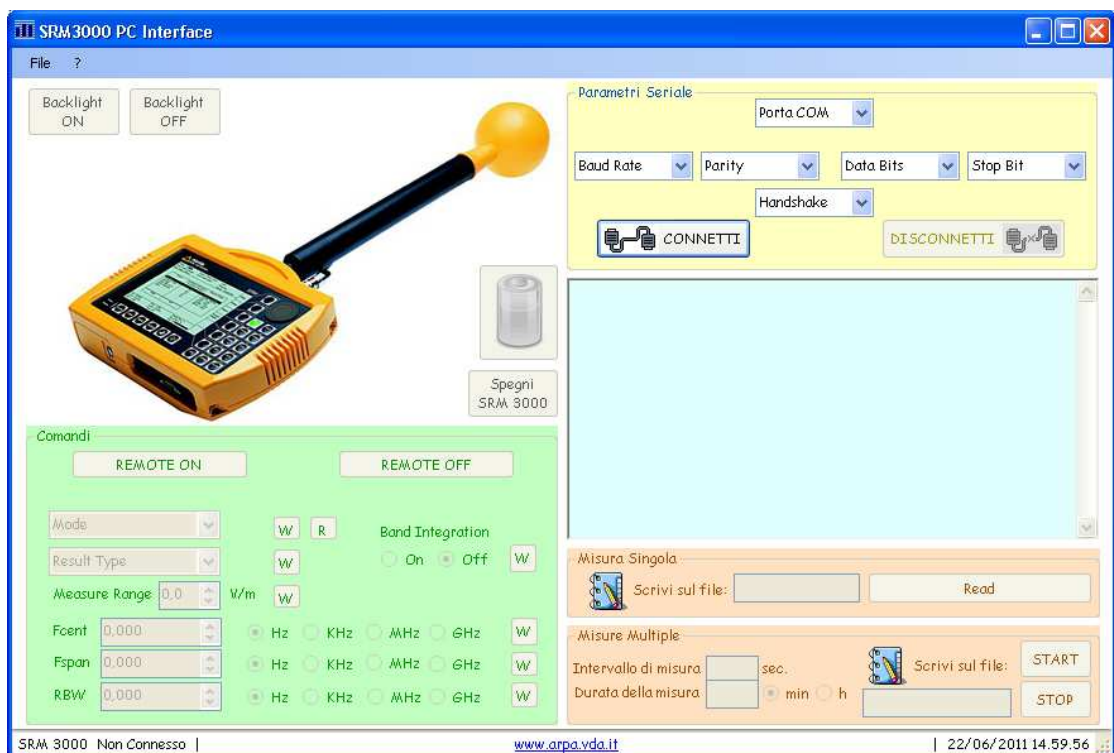
        ApplicationTitle.Text =
System.IO.Path.GetFileNameWithoutExtension(My.Application.Info.Assem
blyName)
    End If

    'Version
    Version.Text = System.String.Format(Version.Text,
My.Application.Info.Version.Major,
My.Application.Info.Version.Minor)

    Copyright.Text = "Mathiou Marzia"
End Sub

```

Quattro secondi dopo la comparsa dello Splash-Screen appare la pagina vera e propria dell'applicazione composta dal form principale (Figura 7.8). Qui sono visibili le cinque sezioni descritte in precedenza. Si può notare che tutte le sezioni, pulsanti e menu a tendina sono disabilitati ad eccezione di quelli contenuti nel riquadro "Parametri Seriale", in modo da evitare pressioni accidentali, prima che lo strumento sia effettivamente connesso, poiché potrebbero creare un blocco nel sistema.



**Figura 7.8 - Prima finestra del software**

Le prime operazioni da compiere sono quelle di collegare il cavo per il controllo da remoto dello strumento alla porta seriale del PC, mediante connessione RSR232, settare le impostazioni corrette relative alla porta COM utilizzata e aprire la connessione azionando il bottone "Connetti".

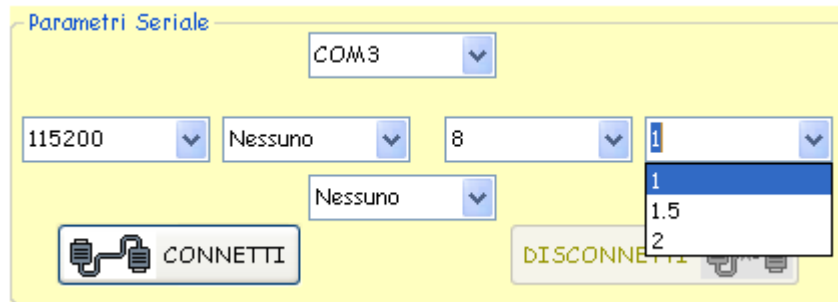


Figura 7.9 - Sezione "Parametri Seriale"

Per quanto riguarda lo strumento utilizzato, sul manuale operativo vengono indicati i parametri corretti per una buona connessione: Baud-Rate pari a 115200 Baud, Nessun parity e nessun handshake, stop bit posto pari a 1 e data bits uguale a 8 (Figura 7.9). Di seguito viene inserita la parte di codice relativa alla sezione appena descritta, che permette di selezionare una tra le porte COM disponibili sul computer in uso, e impostare tutti gli altri parametri della stessa:

```
Private Sub Form1_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles MyBase.Load
```

```
    Dim i As Integer
```

```
    'individua il nome delle porte COM in uso sul PC
```

```
    For i = 0 To My.Computer.Ports.SerialPortNames.Count - 1
```

```
        ComboBox6.Items.Add(My.Computer.Ports.SerialPortNames(i))
    Next
```

```
    'disabilita ogni comando finche non connetto la porta COM
```

```
    GroupBox2.Enabled = False
```

```
    GroupBox3.Enabled = False
```

```
    GroupBox4.Enabled = False
```

```
    Button7.Enabled = False
```

```
    Button16.Enabled = False
```

```
    Button17.Enabled = False
```

```
    Button18.Enabled = False
```

```
End Sub
```

```
Private Sub ComboBox1_SelectedIndexChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ComboBox1.SelectedIndexChanged
```

```
    BaudRate = ComboBox1.Text
```

```
End Sub
```

```
Private Sub ComboBox5_SelectedIndexChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ComboBox5.SelectedIndexChanged
```

```
    DataBit = ComboBox5.Text
```

```
End Sub
```

```
Private Sub ComboBox4_SelectedIndexChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ComboBox4.SelectedIndexChanged
```

```

        StopBit = ComboBox4.SelectedIndex
        If StopBit = 0 Then
            S = IO.Ports.StopBits.One
        ElseIf StopBit = 1 Then
            S = IO.Ports.StopBits.OnePointFive
        ElseIf StopBit = 2 Then
            S = IO.Ports.StopBits.Two
        End If
    End Sub

    Private Sub ComboBox3_SelectedIndexChanged(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ComboBox3.SelectedIndexChanged

        Parity = ComboBox3.SelectedIndex
        If Parity = 0 Then
            P = IO.Ports.Parity.Even
        ElseIf Parity = 1 Then
            P = IO.Ports.Parity.Odd
        ElseIf Parity = 2 Then
            P = IO.Ports.Parity.None
        ElseIf Parity = 3 Then
            P = IO.Ports.Parity.Mark
        ElseIf Parity = 4 Then
            P = IO.Ports.Parity.Space
        End If

    End Sub

    Private Sub ComboBox2_SelectedIndexChanged(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ComboBox2.SelectedIndexChanged

        Handshake = ComboBox2.SelectedIndex
        If Handshake = 0 Then
            H = IO.Ports.Handshake.None
        ElseIf Handshake = 1 Then
            H = IO.Ports.Handshake.RequestToSend
        End If

    End Sub

```

Il codice sottostante è relativo al tasto "CONNETTI" che, dopo aver verificato il corretto inserimento di tutti i parametri, stabilisce la connessione con lo strumento:

```

Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button1.Click

    If ComboBox6.Text = "Porta COM" Then
        MsgBox("Selezionare la porta COM da utilizzare",
            MsgBoxStyle.Exclamation, "Porta COM
sconosciuta!")
        GoTo errore
    End If

    'controllo se ho impostato la seriale
    If BaudRate < 0 Then
        MsgBox("Impostare il Baud Rate!",
MsgBoxStyle.Exclamation,
"Parametri della seriale non corretti!")
        GoTo errore
    ElseIf Parity < 0 Then

```

```

        MsgBox("Impostare il bit di parità!",
MsgBoxStyle.Exclamation,
            "Parametri della seriale non corretti!")
        GoTo errore
    ElseIf DataBit < 0 Then
        MsgBox("Impostare il parametro data bits!",
MsgBoxStyle.Exclamation,
            "Parametri della seriale non corretti!")
        GoTo errore
    ElseIf StopBit < 0 Then
        MsgBox("Impostare il valore dello stop bit!",
            MsgBoxStyle.Exclamation, "Parametri della seriale
non corretti!")
        GoTo errore
    ElseIf Handshake < 0 Then
        MsgBox("Impostare il parametro Handshake!",
MsgBoxStyle.Exclamation,
            "Parametri della seriale non corretti!")
        GoTo errore
    End If

    portaCOM = ComboBox6.Text
    If SerialPort1.IsOpen Then
        SerialPort1.Close()
    End If

    Try
        With SerialPort1
            .PortName = portaCOM
            .BaudRate = BaudRate
            .Parity = P
            .DataBits = DataBit
            .StopBits = S
            .Handshake = H
        End With

        SerialPort1.Open()
        Stato_Connessione_LBL.Text = SerialPort1.PortName & "
Connesso!"

        Button1.Enabled = False
        Button3.Enabled = True
        GroupBox2.Enabled = True
        GroupBox3.Enabled = True
        GroupBox4.Enabled = True
        Button7.Enabled = True
        Button16.Enabled = True
        Button17.Enabled = True
        Button18.Enabled = True

        Catch ex As Exception
            Stato_Connessione_LBL.Text = SerialPort1.PortName & "
Errore di connessione!"
            MsgBox(ex.ToString)
            Button1.Enabled = True
            Button3.Enabled = False
            GroupBox2.Enabled = False
            GroupBox3.Enabled = False
            GroupBox4.Enabled = False
        End Try
    errore:
    End Sub

```

Se tutti i passaggi sono stati svolti correttamente vengono abilitate le altre quattro sezioni, tra cui la sezione "Comandi"; selezionando il pulsante "REMOTE ON" si mette lo strumento in remoto, ossia vengono disabilitati i tasti dell'SRM3000 e lo strumento è pronto a ricevere comandi solamente tramite la porta seriale. Da questo momento in poi l'utente è in grado di comunicare con il sistema e può procedere alla configurazione andando a scegliere il tipo di misura desiderata (vedi Figura 7.10). È quindi possibile abilitare o disabilitare la retroilluminazione del display, ottenere informazioni sulla carica disponibile della batteria o addirittura spegnere l'SRM3000 tramite gli appositi pulsanti. Il codice riportato sotto la figura 7.10 si riferisce alle azioni che vengono compiute quando vengono premuti i tasti "REMOTE ON", "LIGHT ON", "BATTERY" e "POWER OFF".

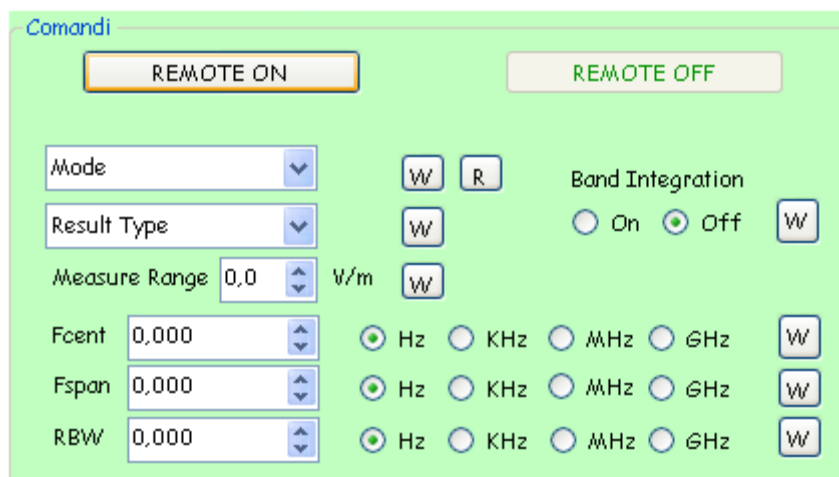


Figura 7.10 - Sezione "Comandi"

Tasto REMOTE ON:

```
Private Sub Button2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
    System.EventArgs) Handles
        Button2.Click
    Dim d As Integer = 0

    Try
        SerialPort1.Write("Remote ON;")
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try

    If (d = 0) Then
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "REMOTE ON;")
        Button15.Enabled = True
        Button2.Enabled = False
    End If
End Sub
```

Tasto LIGHT ON:

```
Private Sub Button17_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
    System.EventArgs) Handles Button17.Click
```

```

Dim d As Integer = 0

Try
    SerialPort1.Write("LIGHT ON;")
Catch ex As Exception
    MsgBox(ex.ToString)
    d = 1
End Try

If (d = 0) Then
    Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "LIGHT ON;")
End If
End Sub

```

#### Tasto BATTERY:

```

Private Sub Button7_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
    System.EventArgs) Handles
        Button7.Click
Dim d As Integer = 0

Try
    SerialPort1.Write("BATTERY?;")
Catch ex As Exception
    MsgBox(ex.ToString)
    d = 1
End Try
succes = Verifica_scrittura()
If succes = 1 Then
    MsgBox("ERRORE! Comando non ricevuto dallo strumento!
Per maggiori dettagli leggere la lista dei comandi." _
        , MsgBoxStyle.Critical, "ERRORE!")
    d = 1
End If

If (d = 0) Then
    Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "BATTERY?;")
End If

stringa = SerialPort1.ReadExisting()
Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "Batteria Residua: " &
stringa & "%.")

End Sub

```

#### Tasto POWER OFF:

```

Private Sub Button16_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
    System.EventArgs) Handles
        Button16.Click
Dim d As Integer = 0

Try
    SerialPort1.Write("POWER_OFF;")
Catch ex As Exception
    MsgBox(ex.ToString)
    d = 1
End Try

If (d = 0) Then
    Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "POWER_OFF;")
End If
End Sub

```

Alla pressione del tasto “REMOTE ON” il software lo disabilita e attiva quello “REMOTE OFF” che verrà utilizzato al termine delle operazioni per ripristinare il funzionamento normale dello strumento. In questa sezione è possibile selezionare, tramite l’apposito menu a tendina, una tra le quattro modalità di misura offerte dallo strumento. Queste modalità, già ampiamente descritte, sono: *Spectrum analysis*, *Safety evaluation*, *Time analysis* e *UMTS P-CPICH demodulation*.

Con la prima modalità lo strumento è in grado di analizzare lo spettro di frequenze dei segnali una volta impostato il valore della frequenza centrale e lo span. Data la particolarità delle misure eseguite in questa tesi è stato necessario l’inserimento dell’opzione “Band Integration”, attivabile solamente nel modo *Spectrum analysis*, che consente di calcolare l’integrale del segnale sull’intera banda di frequenza selezionata. Tale opzione è specifica per le misure di campo elettrico relative alla tecnologia UMTS perché il segnale si estende su una banda di 5MHz centrata sulla portante a differenza del segnale radiofonico o GSM dove portante e telefonate occupano solamente singole frequenze.

*Safety evaluation* è una modalità che permette una misura in banda stretta, ovvero fornisce il valore di campo elettrico differenziato per i diversi servizi attivi (tv analogica o digitale, operatori di telefonia mobile, operatori radiofonici, altri servizi). Ciò permette di valutare immediatamente il servizio che contribuisce maggiormente al valore totale del campo misurato in banda larga.

Tramite *Time analysis* è possibile avere il valore di campo elettrico complessivo, dato quindi dalla somma di tutti i servizi, attuale o mediato su diversi minuti. Per le misure eseguite dall’ARPA che servono per valutare l’esposizione umana è necessario impostare una media su 6 minuti.

L’ultima modalità fornisce il valore di campo elettrico emesso dalla portante UMTS. Da alcune prove fatte si è appurato che anche la portante viene utilizzata per smaltire una piccola parte di traffico, ma in generale il suo valore di campo elettrico e conseguentemente di potenza rimane pressoché costante. Questa modalità fornisce il campo relativo ai vari codici di scrambling, che vengono utilizzati per distinguere le varie portanti fra di loro. Può essere, quindi, anche utilizzato per conoscere gli scrambling attivi in quell’istante in un determinato sito.

Per ogni modalità sopra descritta, vengono attivati diversi pulsanti o menu a tendina della sezione comandi, in modo da poter eseguire nella maniera più efficiente le misure desiderate. Nell'esempio riportato in Figura 7.11 si vede che il tasto "REMOTE ON" è stato disattivato e pertanto lo strumento è in ascolto e in attesa delle istruzioni dell'operatore. E' stata selezionata la modalità UMTS, e perciò i valori di Fspan e RBW non sono necessari in quanto già pre-impostati, visto che l'UMTS ha sempre uno span pari a 5 MHz. E' invece molto importante settare la frequenza centrale, diversa per ogni operatore (ogni operatore ne possiede più di una) ma identica per le diverse portanti, avendo l'UMTS fattore di riuso pari a 1.

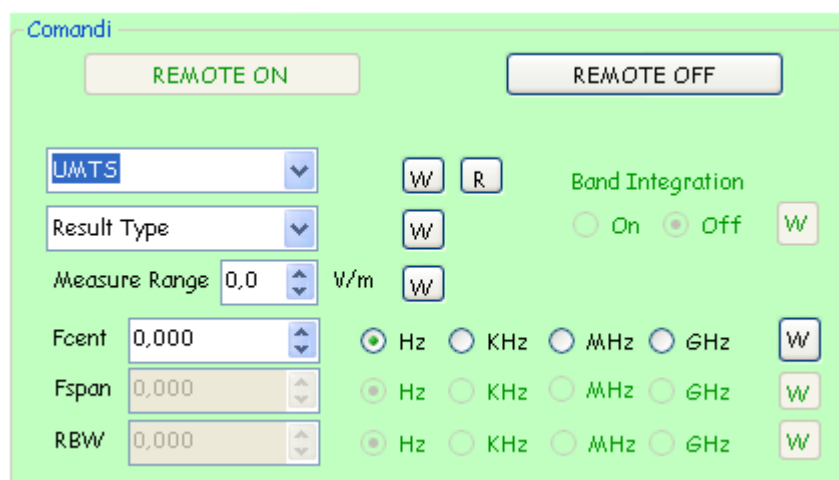


Figura 7.11 - Sezione "Comandi" dopo la pressione del tasto "REMOTE ON", modalità "UMTS"

Per tutte le modalità è sempre attivo il menu "Result Type" e "Measure Range", che consentono rispettivamente di selezionare il tipo di risultato voluto, ovvero misura istantanea o mediata, e di settare il valore massimo di campo elettrico che ci si attende di misurare. In particolare, come mostrato in Figura 7.12, è possibile scegliere tra misura istantanea, misura mediata, valore massimo misurato e valore medio massimo misurato. Solitamente, come ricordato sopra, le misure vengono eseguite in media, ma nel caso in esame le misure sono state eseguite istantaneamente per avere il valore di campo istantaneo in modo da poterlo correlare correttamente con i dati di potenza, campionati essi stessi in modalità *actual*; il valore di "Measure Range" è solitamente settato pari ai valori limiti, ma in questo caso è stato sufficiente porlo pari a 2,5 V/m in quanto da misure effettuate preliminarmente si è appurato che il valore massimo non superava mai i 2 V/m.



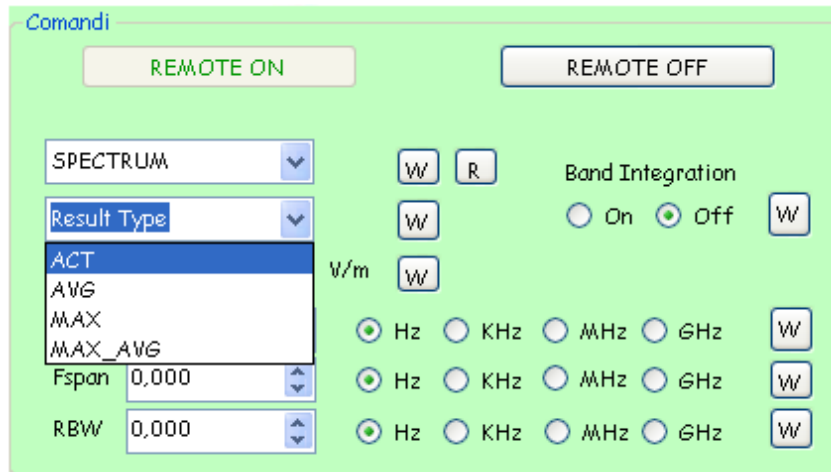


Figura 7.12 - Sezione "Comandi" tipo di misura selezionabile

Tutti i pulsanti e menu descritti sinora prevedono la scrittura di un comando sul buffer destinato allo strumento, che viene inviato alla pressione del relativo tasto "W" (write). Nel caso in cui si vogliono eseguire delle verifiche, è possibile anche richiedere allo strumento di indicare in quale modalità si trova attualmente mediante il tasto "R" (read) inserito accanto al primo menu a tendina. Dopo qualche istante lo strumento invierà alla seriale la risposta che verrà visualizzata nella casella di testo dedicata.

Esempio del codice di un tasto "W":

```
Private Sub Button4_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
    System.EventArgs) Handles
    Button4.Click

    Dim mode As String

    mode = ComboBox7.Text

    If mode = "Mode" Then
        MsgBox("Selezionare il modo", MsgBoxStyle.Exclamation,
"Mode")
        GoTo errore1
    End If

    Try
        SerialPort1.Write("MODE " & mode & ";")
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try
    succes = Verifica_scrittura()
    If succes = 1 Then
        MsgBox("ERRORE! Comando non ricevuto dallo strumento!
Per maggiori dettagli leggere la lista dei comandi." _
            , MsgBoxStyle.Critical, "ERRORE!")
        d = 1
    End If
```

```

        If (d = 0) Then
            Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "MODE " & mode & ";")
        End If
errore1:
    End Sub

```

Esempio del codice di un tasto "R":

```

Private Sub Button5_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
                        System.EventArgs) Handles
                        Button5.Click

    Try
        SerialPort1.Write("MODE?;")
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try

    If (d = 0) Then
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "MODE?;")
    End If

    .....Wait 1000 ms:
    StartTime = Now
    Do
        Application.DoEvents()
    Loop Until (Now - StartTime).TotalMilliseconds > 1000
    .....
    stringa = SerialPort1.ReadExisting()
    Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & vbCrLf & stringa)
End Sub

```

A questo punto, dopo aver selezionato modalità e aver impostato tutti i parametri necessari, è possibile iniziare l'esecuzione delle misure volute. L'utente può scegliere di eseguire misure singole o misure prolungate nel tempo, obiettivo per cui è stato sviluppato il software.

Nella sezione "Misura Singola" è possibile scegliere il nome del file nel quale salvare i risultati e premere il tasto per l'esecuzione della misura. Il nome del tasto varia a seconda della modalità di misura selezionata in precedenza poiché varia il comando che viene inviato allo strumento. La risposta al comando di misura è differente da modalità a modalità (viene fornito l'intero spettro per la modalità "Spectrum Analysis" o il valore di campo e il relativo scrambling nella modalità "UMTS P-CPICH Demodulation") e viene scritta sia su un file di testo che su un file di Microsoft Excel, entrambi aventi il nome definito dall'utente, salvati nella directory principale del computer. Si è scelto di fornire in uscita anche la cartella di lavoro Excel per poter più facilmente elaborare i dati. Premendo nuovamente il tasto per ulteriori misure i dati in output vengono inseriti in coda su una nuova linea nei files già creati, a meno che non venga inserito un nuovo nome per il file di salvataggio.

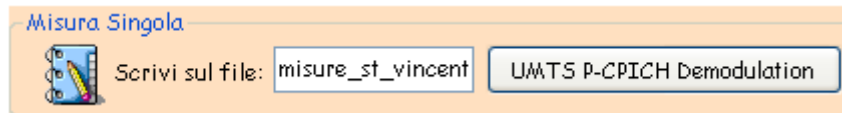


Figura 7.13 - Sezione "Misura Singola"

Codice relativo al tasto di invio della misura singola:

```
Private Sub Button12_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
    System.EventArgs) Handles
    Button12.Click

Dim comando As String = ComboBox7.Text

If ComboBox7.Text = "SPECTRUM" Then
    If BandInt_On = True Then
        comando = "BI_VALUE?;"
    Else
        comando = "SPEC?;"
    End If

ElseIf ComboBox7.Text = "SAFETY" Then
    comando = "TAB?;"
ElseIf ComboBox7.Text = "UMTS" Then
    comando = "UTAB?;"
ElseIf ComboBox7.Text = "TIME" Then
    comando = "VAL?;"
End If

If comando = "Mode" Then
    MsgBox("Selezionare il modo", MsgBoxStyle.Exclamation,
"Mode")
    GoTo errore5
End If

Try
    SerialPort1.Write(comando)
Catch ex As Exception
    MsgBox(ex.ToString)
    d = 1
End Try

If (d = 0) Then
    Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & comando)
End If

stringa = SerialPort1.ReadExisting()
Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & vbCrLf & stringa)

If primavolta = True Then
    If TextBox1.Text = Nothing Then
        nomefile = "c:\File_misura_singola_SRM3000.txt"
        nomefileXLS = "c:\File_misura_singola_SRM3000.xls"
    Else
        nomefile = "c:\\" & TextBox1.Text & ".txt"
        nomefileXLS = "c:\\" & TextBox1.Text & ".xls"
    End If
End If

If primavolta = True Then
    'crea il file .txt e scrive il dato
```

```

        WriteFile(nomefile, stringa, False)
        WriteFile(nomefileXLS, "Data e Ora di misurazione: " &
System.DateTime.Now & vbCrLf & stringa & vbCrLf & vbCrLf
& vbTab, False)
        primavolta = False
    Else
        WriteFile(nomefile, stringa, True) 'appende in coda il
dato
        WriteFile(nomefileXLS, "Data e Ora di misurazione: " &
System.DateTime.Now & vbCrLf & stringa & vbCrLf & vbCrLf & vbTab,
True)
    End If
errore5:
    End Sub

```

Nella sezione “Misure Multiple”, oltre alla possibilità di scelta del nome dei files su cui verranno scritti i risultati, vi sono due caselle di testo nelle quali l’utente deve inserire l’intervallo di misura desiderato, ovvero l’intervallo di tempo, espresso in secondi, che deve passare tra una misura e la successiva, e la durata totale delle misure, espresse in minuti oppure in ore. Il conteggio viene gestito tramite due timer, il primo che amministra l’intervallo tra una misura e la successiva e il secondo che tiene conto dell’avanzare del tempo totale. Anche in questo caso vengono creati, nella directory principale un file di testo e una cartella di Excel. Le misure termineranno allo scadere del tempo impostato, ma possono anche essere interrotte in qualsiasi istante premendo il pulsante “STOP”. Al termine delle misure, occorre cambiare il nome del file di salvataggio (che viene evidenziato in rosso) a meno che non lo si voglia sovrascrivere.

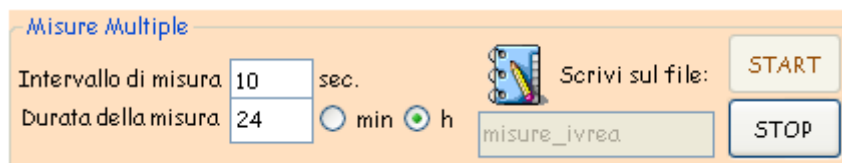


Figura 7.14 - Sezione "Misure Multiple"

Codice relativo all’esecuzione di misure prolungate nel tempo:

```

Private Sub Button13_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles
    Button13.Click

    Dim intervallo As Integer = TextBox2.Text * 1000
    Dim durata As Integer

    If RadioButton13.Checked = True Then
        durata = TextBox3.Text * 1000 * 60 + 1000
    ElseIf RadioButton14.Checked = True Then
        durata = TextBox3.Text * 1000 * 3600 + 1000
    End If

    Dim comando As String = ComboBox7.Text
    temp = 0

```

```

If ComboBox7.Text = "SPECTRUM" Then
    If BandInt_On = True Then
        comando = "BI_VALUE?;"
    Else
        comando = "SPEC?;"
    End If

ElseIf ComboBox7.Text = "SAFETY" Then
    comando = "TAB?;"
ElseIf ComboBox7.Text = "UMTS" Then
    comando = "UTAB?;"
ElseIf ComboBox7.Text = "TIME" Then
    comando = "VAL?;"
End If

If comando = "Mode" Then
    MsgBox("Selezionare il modo", MsgBoxStyle.Exclamation,
"Mode")
    GoTo errore6
End If

Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "Inizio
misurazioni...")
comando_pubblico = comando
'comando pubblico è visibile anche all'interno del timer1

If intervallo = Nothing <> durata = Nothing Then
    MsgBox("Intervallo o Durata di misura non impostati!",
        MsgBoxStyle.Critical,
        "ERRORE!")

    GoTo errore6
End If

Button13.Enabled = False
TextBox4.Enabled = False
'disabilita textbox dove inserisco il nome file
'per evitare modifiche accidentali al nome file mentre è in
uso

Button14.Enabled = True

Timer1.Enabled = True
Timer2.Enabled = True

GroupBox2.Enabled = False
'disabilita il pannello dei comandi per non far modificare
all'utente
' il tipo di misura desiderata mentre sono già iniziate le
misurazioni automatiche

Timer1.Interval = intervallo
Timer2.Interval = durata
Timer1.Start() 'intervallo
Timer2.Start() 'durata delle misure
temp = 0 'resetto il contatore del numero di misure

If primavolta2 = True Then
    If TextBox4.Text = Nothing Then
        nomefile2 = "c:\Misure_SRM3000.txt"
        nomefileXLS2 = "c:\Misure_SRM3000.xls"
    Else
        nomefile2 = "c:\" & TextBox4.Text & ".txt"
        nomefileXLS2 = "c:\" & TextBox4.Text & ".xls"
    End If
End If

```

```

        End If
    End If

errore6:
    End Sub

```

Si riporta anche il codice dei due timer utilizzati per effettuare le misure prolungate:

```

Private Sub Timer1_Tick(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
    System.EventArgs) Handles
    Timer1.Tick

'esegue la misura ogni "tick" secondi (tick = intervallo)

    d = 0

    Try
        SerialPort1.Write(comando_pubblico)
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try

    temp = temp + 1 'indica il numero dell'attuale misura

    If (d = 0) Then 'comando eseguito con successo
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "Misura n° " & temp
& " eseguita.")
    End If

    stringa = SerialPort1.ReadExisting()
    'stringa contiene la lettura dello strumento

    If primavolta2 = True Then
        WriteFile(nomefile2, vbCrLf & "Misura n° " & temp & ":"
& vbCrLf & stringa & vbCrLf & vbCrLf, False) 'la prima volta crea il
file
        WriteFile(nomefileXLS2, "Misura n° " & temp & ":" &
vbCrLf & "Data e Ora di misurazione: " & System.DateTime.Now &
vbCrLf & vbCrLf & stringa & vbCrLf & vbCrLf & vbTab, False)
        primavolta2 = False
    Else
        WriteFile(nomefile2, vbCrLf & "Misura n° " & temp & ":"
& vbCrLf & stringa & vbCrLf & vbCrLf, True) 'le altre volte appendo
il testo in fondo
        WriteFile(nomefileXLS2, "Misura n° " & temp & ":" &
vbCrLf & "Data e Ora di misurazione: " & System.DateTime.Now &
vbCrLf & vbCrLf & stringa & vbCrLf & vbCrLf & vbTab, True)
    End If
End Sub

Private Sub Timer2_Tick(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles Timer2.Tick
    Timer1.Stop()
    Timer1.Enabled = False
    Timer2.Stop()
    Timer2.Enabled = False
    Button14.Enabled = False 'disabilita pulsante stop
    Button13.Enabled = True 'abilita pulsante start
    TextBox4.Enabled = True 'abilita textbox dove inserisco
il nome file
    GroupBox2.Enabled = True

```

```

Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "...Misurazioni
conclude.")
temp = 0 'resetto il contatore del numero
di misure
TextBox4.ForeColor = Color.Red
End Sub

```

Tutti i comandi che vengono inviati allo strumento e le relative risposte vengono scritte nella casella di testo dedicata. Nella Figura 7.15 si vede che l'utente, dopo avere messo lo strumento in remoto mediante il comando REMOTE ON, ha acceso la luce di backlight, ha richiesto il livello di carica della batteria e ha impostato tutti i parametri per la misura.

Ogni volta che il software interroga lo strumento e riceve i risultati, viene visualizzata nella casella di testo "Misura n° \_\_ eseguita", che tiene traccia di tutte le misure eseguite dall'avvio delle misure prolungate.

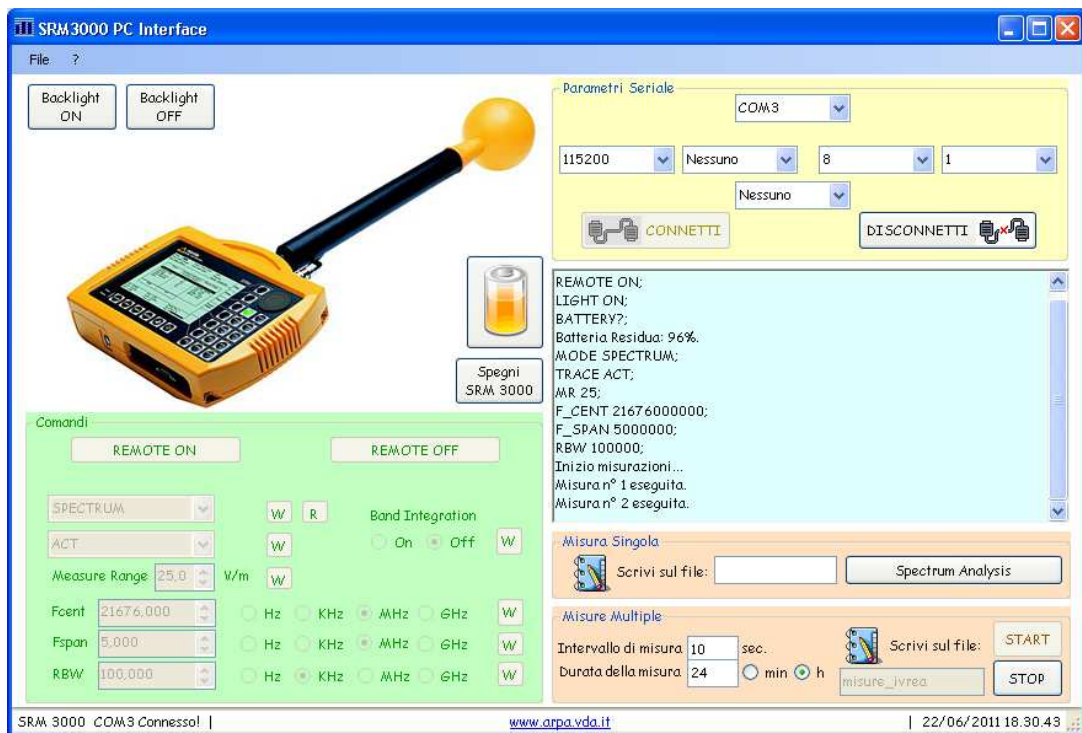


Figura 7.15 - Esempio di schermata durante una misura prolungata

Tramite barra dei menu è possibile lanciare l'ultimo form: "about".

Esso riporta alcune informazioni riguardanti il software, la società che l'ha prodotto e lo sviluppatore che lo ha realizzato:



**Figura 7.16 - Form "About"**

Il software, come già detto, scrive i risultati delle misure, ovvero le risposte dello strumento alle sue interrogazioni, su un file di tipo .txt e uno di tipo Excel.

A seconda delle misure effettuate gli output sono diversi. In particolare, le misure Spectrum Analysis danno in uscita tutti i valori di campo, uno per ogni frequenza della banda presa in considerazione; le misure con la modalità UMTS P-CPICH Demodulation danno in uscita 14 parametri, tra cui il numero dello scrambling code, il valore di campo massimo misurato e il valore attuale. Nelle tabelle 7.1 e 7.2 sottostanti sono riportati i parametri che lo strumento da in output a ogni misura, nell'ordine con cui vengono scritti sulla seriale, per le modalità utilizzate in questa tesi, ovvero UMTS P-CPICH Demodulation e Spectrum Analysis.



PARAMETRI	FORMATO	UNITA DI MISURA	RANGE	NOTE
AvgFlag	Enum		AV,OK	
OvlFlag	Enum		OV,OK,MAX_OV	
Total	Float	"Unit"		
TotalMax	Float	"Unit"		
Analog	Float	"Unit"		
AnalogNoiseFlag	Enum		UNCHECKED,LOW,OK	
AnalogMax	Float	"Unit"		
AnalogMaxNoiseFlag	Enum		UNCHECKED,LOW,OK	
n CR/	ShortInt			Number of following lines
UMTSCode	ShortInt		0 to 8191	
UMTSValue	Float	"Unit"		
UMTSMaxValue	Float	"Unit"		
UMTSCell	String		max . 15 chars	
UMTSSelected /CR	Enum		YES, NO	

**Tabella 7.1 - Parametri in uscita per la modalita UMTS**

Notiamo che tra i parametri vi sono dei flag, come per esempio i AVGFLAG che serve per capire se il valore in uscita è il risultato di una media o è un valore istantaneo oppure OVLFLAG che indica se il dato è andato in overflow oppure no. Ci sono poi una serie di numeri che indicano il valore massimo misurato e il valore di rumore misurato, dopodiché vengono inseriti i dati veri e propri, ovvero il codice di scrambling, il valore misurato di campo elettrico, il valore massimo misurato fino ad ora e la cella in cui ci troviamo.

Per maggiore chiarezza si riporta una misura eseguita in modalità UMTS:

OK,OK,0.62762,0.70533,1.0592,UNCHECKED,1.2522,UNCHECKED,2  
214,0.10698,0.10698, ,YES  
222,0.61844,0.70533, ,YES;

Nell'esempio, la prima riga contiene tutti i parametri fino al "n CR/"; in questo caso il numero di righe che seguono è pari a 2 in quanto sono presenti due portanti con due scrambling code differenti, "214" e "222". Per entrambi viene riportato il valore misurato, il valore massimo, mentre non viene indicato il numero della cella, sostituito con uno spazio.

PARAMETRI	FORMATO	UNITA DI MISURA	RANGE	NOTE
NoSAVG	LngInt		0 to 999999	
AvgFlag	Enum		AV,OK	
OvIFlag	Enum		OV,OK,MAX_OV	
df	Double	Hz		frequency resolution
n CR/	ShortInt			Number of following lines
SpecValue /CR	Float	"Unit"	d.dddE(-)(e)e (normal) or (-)(d)(d)d.dd (dB Units)	Value ( max. 10 bytes per line)

**Tabella 7.2 - Parametri in uscita per la modalità Spectrum Analysis**

Anche per questa modalità sono presenti i due flag di overflow e di media, inoltre notiamo che viene indicata anche la frequenza di risoluzione e il numero di linee che comprendono le misure vere e proprie: tale modalità, infatti, da in uscita l'intero spettro delle frequenze.

Di seguito si riporta un esempio di una misura eseguita con la modalità Spectrum Analysis; notiamo che il numero di salvataggi è posto pari a 0 in quanto non viene salvato nulla sullo strumento ma viene tutto memorizzato sul computer, la misura viene eseguita in media ("AV"), non vi sono overflow ("OK"), la frequenza di risoluzione è pari a 2,34375 kHz e saranno riportati 4268 valori di campo elettrico, uno per ogni frequenza dello spettro preso in esame. Per motivi di spazio non vengono riportati tutti i 4268 valori, anche perché tale misura viene inserita solo a scopo esemplificativo.

```

0,AV,OK,2343.750000,      0.0011117      0.00064619
4268                    0.0010701      0.00063731
0.0029953              0.0010105      0.0006576
0.002787               0.00093469     0.00067616
0.0023268             0.00092457     0.0007014
0.0020205             0.0010285      0.00071274
0.0019844             0.0010994      0.00070248
0.0019472             0.0011384      0.00068042
0.0017761             0.0009933      0.00067383
0.0016788             0.00087025     0.00068923
0.0016985             0.00073739     0.00069934
0.0015382             0.00067862     0.00069917
0.001259              0.00068283     0.00069571
0.0011146            0.00070829     .....
0.0010663            0.0007028      .....
0.0011014            0.00068092

```

Se le misure sono prolungate nel tempo, davanti ad ognuna viene inserito il numero della misura, la data e l'ora.

Misura n° 1:

Data e Ora di misurazione: 13/06/2011 14.18.10

2165100000,2170100000,1.0908;

Misura n° 2:

Data e Ora di misurazione: 13/06/2011 14.18.20

2165100000,2170100000,0.60033;

Misura n° 3:

Data e Ora di misurazione: 13/06/2011 14.18.30

2165100000,2170100000,0.98692;

Misura n° 4:

Data e Ora di misurazione: 13/06/2011 14.18.40

2165100000,2170100000,0.58706;

Misura n° 5:

Data e Ora di misurazione: 13/06/2011 14.18.50

2165100000,2170100000,1.2104;

Tale esempio utilizza sempre la modalità Spectrum Analysis, ma viene attivata l'opzione Band Integration che da in uscita solo tre parametri, la frequenza minima, la frequenza massima e il valore derivato dall'integrazione su tale banda. In tutte queste misure le frequenze minime e massime sono sempre uguali e distano di 5MHz in quanto si sta eseguendo una misura su un segnale UMTS. Quest'ultima tipologia di misura è quella che verrà utilizzata principalmente per il lavoro di tesi.

## 8. Misure ed Elaborazioni

---

La diffusione sempre più capillare del telefono cellulare all'interno di tutti i livelli di interconnessione della società moderna (lavoro, famiglia, tempo libero, ecc) ha comportato un continuo sviluppo della tecnologia in modo da fornire sempre più servizi e di miglior qualità. Tutto ciò ha reso necessario un repentino aumento degli impianti per rendere possibili le connessioni sempre e dovunque. La terza generazione delle tecnologie per la diffusione del segnale di telefonia mobile, l'UMTS, ha cambiato anche la modalità di sfruttamento del campo elettromagnetico generato dalle antenne. L'obiettivo di questa tesi è stato, quindi, quello di indagare il legame reale tra la potenza utilizzata dagli impianti, SRB, e il corrispondente campo elettrico generato al quale è esposta la popolazione.

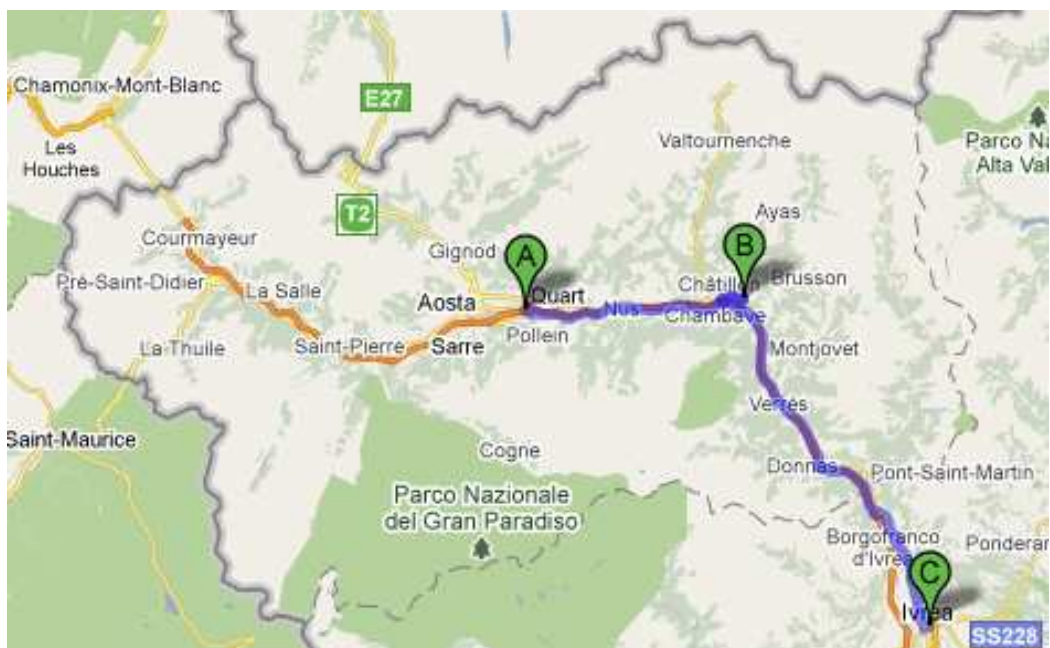
Teoricamente la relazione fisico-matematica che lega la potenza al campo elettrico è nota e relativamente semplice, una volta fissate le condizioni al contorno. Nella realtà, invece, ci sono molti fattori che entrano in gioco quando si cerca la correlazione tra le due grandezze. Per comprendere meglio la loro reale relazione sono state effettuate misure in ambiente di campo elettrico irradiato da antenne utilizzando la tecnologia UMTS, cercando la configurazione di misura che meglio descriveva il segnale stesso, trovando così la correlazione più elevata tra campo misurato e potenza irradiata. Sono anche stati eseguiti dei tentativi di correlazione con il traffico (sia voce che dati) generato dalla stazione radio base UMTS.

Il lavoro è stato svolto in collaborazione con il gestore telefonico Vodafone, sezione Campi Elettromagnetici di IVREA, e l'Area Operativa NIR (Non Ionizing Radiation) dell'ARPA Valle d'Aosta. Grazie alle conoscenze territoriali di ARPA e quelle gestionali di Vodafone sono stati individuati alcuni siti in prossimità di stazioni radio base utilizzando la tecnologia UMTS in cui fosse possibile effettuare le misure di campo elettrico prolungate nel tempo. I siti di misura e i motivi della loro scelta sono descritti nel paragrafo 8.1. La metodologia utilizzata nelle misure è descritta nel dettaglio nel paragrafo 8.2. Preventivamente rispetto all'esecuzione delle misure sono state effettuate delle simulazioni per meglio comprendere l'andamento teorico del campo nei siti prescelti e comprendere, così, quale fosse il punto di misura migliore: le simulazioni sono descritte al paragrafo 8.3. Infine, nel

paragrafo 8.4 sono riportate tutte le elaborazioni effettuate sulle misure: sono riportati i valori di correlazione ottenuti, i grafici e l'analisi statistica eseguita sulle sequenze di dati.

## **8.1 Descrizione Siti e Sorgenti**

Le misure di campo elettrico sono state effettuate in vari siti con caratteristiche territoriali differenti in cui però fosse presente il servizio UMTS del gestore con cui si è collaborato. Le caratteristiche che doveva avere un sito ottimale erano quelle di possedere una o più antenne di telefonia mobile di proprietà dell'operatore Vodafone e che utilizzassero la tecnologia di terza generazione. Inoltre era indispensabile che la sonda dello strumento potesse essere posizionata in un punto illuminato dal lobo principale del diagramma di irradiazione di una di tali antenne. Oltre a ciò era necessario disporre di alimentazione elettrica per la catena strumentale, quindi sono stati esclusi i siti in zone isolate. Infine era indispensabile poter porre gli strumenti in condizioni di sicurezza, scartando così tutti quei siti in cui il lobo principale puntasse in zone non accessibili (es. tetti inclinati, zone impervie e sdruciolevoli, senza corrimani di sicurezza, ecc.). Sono state considerate tutte le postazioni Vodafone presenti in Valle d'Aosta; per ognuna è stata eseguita una valutazione preventiva, tramite analisi delle cartografie, fotografie o tramite sopralluoghi in loco, atta a comprendere se tale postazione possedesse le caratteristiche desiderate. I siti prescelti sono stati tre: due in Valle d'Aosta e uno presso la sede della Vodafone di IVREA (TO). I siti individuati sono rappresentativi dell'esposizione in zone urbane/turistiche e commerciali o adibite a uffici: il sito di Saint Vincent (vedi punto B sulla cartina in Figura 8.1.1) è un sito in zona residenziale e turistica. Il sito di Ivrea (punto C) e di Quart (punto A) sono invece posti in zone prevalentemente costituite da uffici e edifici commerciali.



**Figura 8.1.1 - Cartina della Valle d'Aosta con indicati i tre siti di misura: sito A (Quart - Amerique), sito B (Saint Vincent), sito C (Ivrea)**

Una volta individuati i tre siti, sono state eseguite delle simulazioni teoriche per prevedere l'andamento del campo elettrico nello spazio circostante gli impianti. In questo modo è stato possibile scegliere il punto di misura ottimale, che ricadesse il più possibile all'interno del lobo principale di uno dei settori della SRB presente. Sono state inoltre eseguite delle misure in banda larga in loco per confermare i risultati ottenuti con le simulazioni.

Il primo sito scelto si trova nel centro della cittadina turistica di Saint Vincent (AO) che rappresenta una zona residenziale/turistica in cui si raggiunge la maggior concentrazione di popolazione nei mesi estivi e nelle vacanze invernali. Le antenne sono installate sul tetto di un albergo, di fronte al quale è situato un condominio di altezza paragonabile all'edificio che ospita le antenne.

Uno degli appartamenti di tale condominio ha un terrazzo accessibile che ricade dentro al lobo principale di un settore dell'SRB. La foto di Figura 8.1.2 è stata scattata proprio dall'appartamento stesso e mostra l'impianto di trasmissione.



**Figura 8.1.2 - Sito di Saint Vincent (AO) fotografato dalla postazione di misura**

La SRB della Vodafone utilizza le tecnologie GSM, DCS e UMTS, ed è composta da tre settori. Dalle misure e dalle simulazioni eseguite preventivamente è risultato che il punto di misura si trova all'interno del lobo principale di un settore. Tramite la simulazione teorica è stata calcolata anche l'influenza degli altri settori sul nostro punto di misura: entrambe le altre antenne sono orientate in modo da non coprire l'appartamento nel quale sono state eseguite le misure e per tale motivo influiscono di un fattore inferiore a 1/10 della misura stessa; si può concludere che il valore di campo elettrico misurato è generato in maggior parte dal settore scelto. La SRB presente in questo sito utilizza una tecnologia che prevede di riservare una portante per il traffico voce e una per il traffico dati: tale tecnologia prevede, in ogni modo, che, qualora venga raggiunta la capacità massima dei canali di una portante, il traffico in eccesso possa essere servito dall'altra portante. In generale il traffico voce è quello che occupa più banda e che richiede maggiori risorse, mentre il traffico dati, anche per la peculiarità di essere un traffico a spot, ovvero ad impulsi, non richiede molte risorse e quindi anche la potenza ad esso associata risulta essere molto inferiore. Per questi motivi sono state eseguite le misure selezionando la sola frequenza di portante che viene utilizzata principalmente per il traffico voce. Presso questo sito sono state eseguite due misure prolungate nel tempo: la prima è stata eseguita dall'11 al 12 aprile 2011, per 24 ore circa, in cui la misura viene effettuata acquisendo il campo elettrico generato dalla sola portante di servizio dell'antenna e

la seconda è stata eseguita in data 13 e 14 giugno 2011 per 27 ore consecutive, acquisendo il valore dell'integrazione sull'intera banda di 5MHz.

Il sito presso la sede Vodafone di IVREA (TO), vedere Figura 8.1.3, ha una posizione centrale nella città ed è situato in una zona prevalentemente commerciale. Nelle vicinanze si trova, infatti, la sede dell'Olivetti, la sede di ARPA Piemonte, la stazione ferroviaria e vari esercizi commerciali. L'edificio ha una parte centrale più bassa e una parte esterna più alta, su un lato sono poste le antenne di telefonia. La SRB è composta da due settori orientati parallelamente alla strada. Sono state eseguite più misure preventive, sia direttamente sotto le antenne sia in un punto leggermente più basso ma posto in direzione di uno dei due settori che costituiscono la SRB. Si è scelto di effettuare le misure in questo secondo punto perché il valore di campo misurato era maggiore; nel punto situato proprio sotto le antenne non si misuravano invece valori di campo sufficientemente adeguati perché non si rientrava nel lobo principale essendo troppo a ridosso delle antenne.



**Figura 8.1.3 - Sito di Ivrea (TO)**

In questo sito la trasmissione è gestita in modo diverso rispetto a Saint Vincent; in questo sito, entrambe le portanti presenti sono in grado di gestire sia il traffico voce che il traffico dati. In questo caso, quindi, sono stati richiesti all'operatore anche i



dati di traffico relativi alle sessioni dati. Si nota comunque che il traffico dati ha un valore inferiore di un ordine di grandezza rispetto a quello relativo alla voce. Come si vede dalla foto di Figura 8.1.3 il sito è costituito quasi integralmente da parti metalliche e questo potrebbe alterare la misura. Le misure sono state eseguite il 9 e il 10 giugno 2011 rispettivamente dalle 8 alle 14 e dalle 10 alle 15. Non è stato possibile eseguire misure per un tempo superiore alle 5-6 ore per motivi di maltempo.

Nel sito preso in esame in località AMERIQUE nel comune di Quart (AO) (Figura 8.1.4) è installata una SRB sul tetto di un edificio pubblico. Tale zona è costituita prevalentemente da uffici e attività

commerciali. La SRB è costituita da tre settori. L'unico punto di misura accessibile si trova su una terrazza posta vicino alle antenne ma ad una altezza tale da trovarsi non completamente all'interno del lobo principale di nessun settore della SRB. È stato ritenuto ugualmente significativo eseguire la misura in quanto i valori rilevati preventivamente sono risultati sufficientemente elevati. L'SRB utilizza una tecnologia tale per cui una portante è in grado



Figura 8.1.4 - Sito dell'Amerique - Quart (AO)

di servire sia il traffico voce che il traffico dati. A differenza del sito di Ivrea, ogni settore è composto da due portanti ognuna delle quali è in grado di gestire sia traffico voce che traffico dati. Le misure sono state eseguite in data 20 e 21 giugno e in questo caso è stato possibile lasciare lo strumento a monitorare in continuo per circa 27 ore.

## 8.2 Metodologie di Misura

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di trovare una correlazione tra campo elettrico e potenza. La metodologia che viene riportata sulle norme tecniche di riferimento per la verifica del rispetto dei limiti normativi e che viene comunemente utilizzata da ARPA Valle d'Aosta prevede l'acquisizione del campo elettrico generato dalla sola portante dell'antenna, differenziando i vari settori mediante gli

scrambling code. Tale metodologia, fornendo un risultato in cui il valore di campo elettrico è emesso dalla sola portante e, quindi, non dovuto al traffico effettivamente generato, potrebbe risultare non adeguato perché il traffico viene effettivamente smaltito dai canali di traffico, e solo in parte viene servito anche dalla portante. Tramite l'impostazione dello strumento nella modalità "UMTS P-CPICH Demodulation", mantenendo fissa la frequenza e lo scrambling code, viene memorizzato il valore di campo elettrico associato alla portante. L'intervallo di campionamento è stato scelto in base alla frequenza con cui vengono forniti i dati di potenza e di traffico da parte del



gestore. Inizialmente il gestore pensava di poter fornire i dati con un intervallo di un minuto, pertanto le prime misure sono state eseguite con tale frequenza di campionamento. In realtà, tale intervallo di tempo è risultato essere eccessivo, in primo luogo poiché i valori di potenza e di traffico sono stati forniti da Vodafone con un intervallo di soli 3 o 4 secondi l'uno dall'altro, per cui per ogni valore di campo si avevano a disposizione più o meno 20 valori di potenza e quindi i dati erano effettivamente poco confrontabili se non effettuando delle medie; in secondo luogo avere una sola misura ogni minuto non rende visibili tutti i picchi di campo elettrico che possono verificarsi

nel caso in cui inizi una telefonata e termini in breve tempo. Tali variazioni sono ben visibili sui dati di potenza, in quanto la probabilità che una telefonata duri meno di tre secondi è estremamente bassa e quindi tutte le variazioni di potenza sono registrate, mentre vengono persi nelle misure di campo in quanto in un minuto possono succedersi tantissime richieste di connessione ma viene memorizzato il solo valore istantaneo. Grazie a tali misure è stato possibile evidenziare che anche nei casi in cui la potenza erogata e il traffico generato siano particolarmente bassi, l'antenna eroga comunque una potenza minima del valore di 35 dBm. Tale potenza

è la potenza necessaria a tenere attiva la portante per eseguire tutte le segnalazioni di rete ed è correlata al valore di campo elettrico emesso dalla portante. Tale metodologia è stata utilizzata per il primo set di misure, eseguite nel sito di Saint Vincent nei giorni 12 e 13 aprile 2011. Questa prima serie di dati di campo elettrico misurato non sono stati messi in correlazione con i dati di potenza, proprio perché non rappresentavano una variazione reale di traffico. Il metodo UMTS P-CPICH, però, fornisce, tra i vari parametri in uscita, anche un valore che indica l'integrazione su tutta la banda presa in considerazione. Per tale motivo è stato comunque possibile eseguire un'elaborazione anche per questi dati, in quanto l'integrazione sull'intera banda prende in considerazione tutto il contributo dei canali di traffico e non solo della portante. Essendo l'integrazione di banda una metodologia più corretta nel caso in esame, in tutte le misure successive si è preferito variare la metodologia impiegata e il valore dell'intervallo di campionamento. Non viene più utilizzata la funzione UMTS P-CPICH Demodulation ma la funzione Band Integration, che esegue una integrazione della banda e fornisce in uscita un solo valore di campo elettrico. Questa seconda metodologia fornisce dati immediatamente correlabili con i dati di potenza e di traffico. Le misure sono state eseguite scegliendo un intervallo di misura più appropriato posto pari a 10 secondi. I valori di potenza sono forniti con un intervallo di campionamento di 3 secondi; si è deciso di adottare un intervallo di campionamento delle misure di campo elettrico superiore a 3 secondi in quanto dopo un'attenta analisi dei dati forniti dal gestore si è appurato che i valori venivano talvolta forniti con intervalli di 4 o 5 secondi anziché 3, pertanto si è scelto il valore di 10 in modo da poter in ogni caso mettere i due set di dati a confronto.

I dati misurati e le varie elaborazioni eseguite sono descritte nel paragrafo 8.4.



Figura 8.2.2 - Sessione di misura presso il sito di Ivrea

### 8.3 Simulazioni

Preliminarmente alle misure sono state eseguite simulazioni numeriche delle emissioni per individuare in via teorica la collocazione ideale della sonda di misura. Sono stati utilizzati modelli in campo libero consapevoli che la presenza di ostacoli altera la distribuzione del campo.

Sono stati utilizzati due software di simulazione in uso presso ARPA Valle d'Aosta, Aldena NFA3D (Near Field Analyzer 3D) e Vector WINEDT.

Per costruire un modello dell'impianto sono necessari i seguenti dati:

- Il modello dell'antenna. (Nei software è già presente un elenco delle antenne più utilizzate con le specifiche tecniche e il diagramma d'irradiazione nei piani orizzontale e verticale).
- L'altezza del centro elettrico dell'antenna, ovvero il centro fisico del dispositivo che talvolta corrisponde al centro di fase.
- Il tilt elettrico e meccanico del dispositivo. Il tilt è l'inclinazione della direzione di massima irradiazione dell'antenna rispetto al caso in cui questa sia di tipo broadside, ovvero ortogonale al piano in cui giace l'antenna stessa. Tale variazione della direzione di massima irradiazione può essere ottenuta

meccanicamente inclinando fisicamente l'antenna sul proprio sostegno, o elettronicamente andando a modificare le caratteristiche proprie dell'antenna, che rimane meccanicamente nella stessa posizione.

- L'orientamento, ovvero la direzione di massima irradiazione rispetto al nord geografico.
- I dati sulla potenza e sulla frequenza a cui trasmette l'antenna.
- I dati cartografici: la mappa topografica in scala con indicato il nord geografico e le coordinate cartografiche dell'impianto. Questi dati sono utili per inserire l'impianto nel contesto ambientale preciso in cui verrà a trovarsi. E' così possibile conoscere la presenza o meno di edifici e l'eventuale inclinazione di terreno.

E' opportuno ricordare che le simulazioni sono sempre svolte in condizioni cautelative, ovvero utilizzando la massima potenza dichiarata dal gestore dell'impianto e/o il numero massimo di portanti previste, in modo da simulare il caso limite. Come già detto, le SRB UMTS non irradiano mai la massima potenza in quanto non raggiungono mai la propria capacità massima: utilizzando la massima potenza teorica, quindi, non si simula l'esposizione nelle reali condizioni.

La principale caratteristica dei software di simulazione è la possibilità di rappresentare il solido di irradiazione e i suoi tagli nei piani verticale e orizzontale, nonché di ricostruire l'ambiente urbano circostante, calcolandone l'esposizione.

I software utilizzati non tengono conto della riflessione o diffrazione causata dalle costruzioni o dal terreno circostante e gli algoritmi di calcolo su cui si basano sono quelli del "campo lontano in spazio libero".

Il software analizza il solido d'irradiazione complessivo generato da più sistemi d'antenna trasmettenti posizionati in una determinata area geografica. Ogni sistema d'antenna può essere composto da una o più antenne elementari.

I livelli di informazione su cui si basa NFA3D sono tre: antenna elementare, sistema radiante, postazione.

L'antenna elementare è l'insieme di dati elettrici e meccanici di funzionamento forniti dal gestore. Indispensabile è la conoscenza dei diagrammi di irradiazione nei piani orizzontale e verticale dell'antenna. L'antenna elementare costituisce uno dei settori di un SRB.

Dalla precisione con cui sono state inserite e con cui vengono trattate queste informazioni, si ha il grado di affidabilità del programma. Nel programma, come già accennato, è presente una vasta libreria di antenne elementari. Ogni utente ha anche la possibilità di inserire i propri dati o di modificare quelli esistenti, partendo anche da tabelle esterne.

Il sistema radiante è un insieme di antenne elementari opportunamente accoppiate tra loro e alimentate da un unico trasmettitore di potenza tale da ottenere la copertura dell'area geografica desiderata (area di servizio). Un esempio tipico di sistema radiante è la SRB, costituita da due o più settori, ovvero antenne elementari. Il calcolo del campo irradiato dal sistema è il risultato della somma vettoriale dei singoli campi emessi dalle antenne elementari.

La postazione è un insieme di sistemi radianti dislocati in un'area geografica limitata dalla massima potenza di calcolo del computer. Il calcolo del campo irradiato è il risultato della somma quadratica dei campi di ciascun sistema.

Le uscite del calcolo possono essere rappresentate in due dimensioni (piano H e piano V) o in tre dimensioni, mostrando i volumi relativi a singoli valori di campo.

Sono riportati di seguito alcuni dei risultati delle simulazioni delle due postazioni A (Amerique) e B (Saint Vincent). In particolare si è calcolato il volume di irradiazione di rispetto a 3 V/m e 10 V/m e le due sezioni nei piani orizzontale e verticale.

Tali risultati sono mostrati nelle Figure 8.3.1 a 8.3.5.

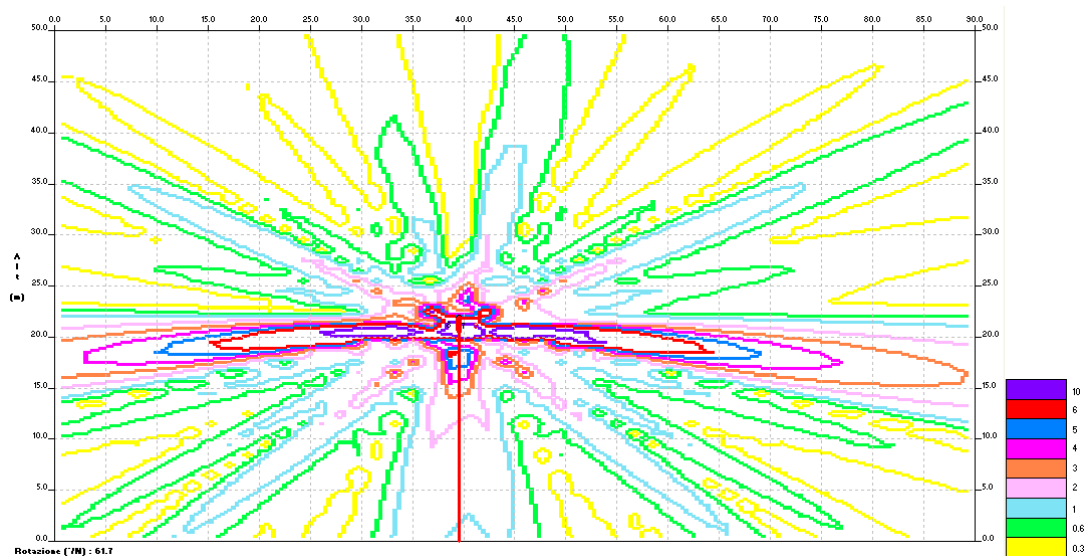


Figura 8.3.1 - Sezione verticale Amerique



Figura 8.3.2 - Piano orizzontale - Saint Vincent

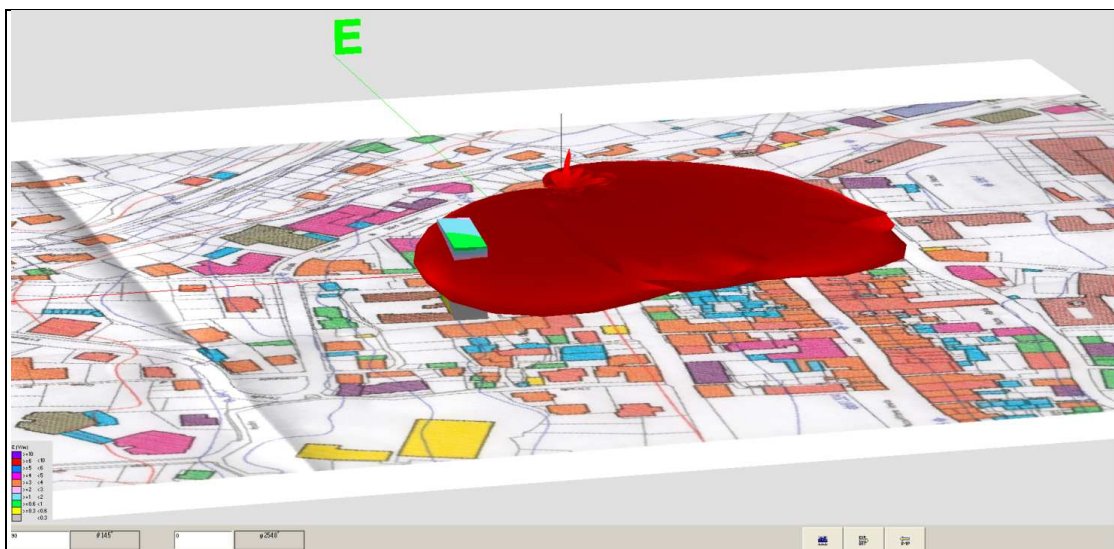


Figura8.3.3 - Volume di rispetto a 3 V/m - Saint Vincent

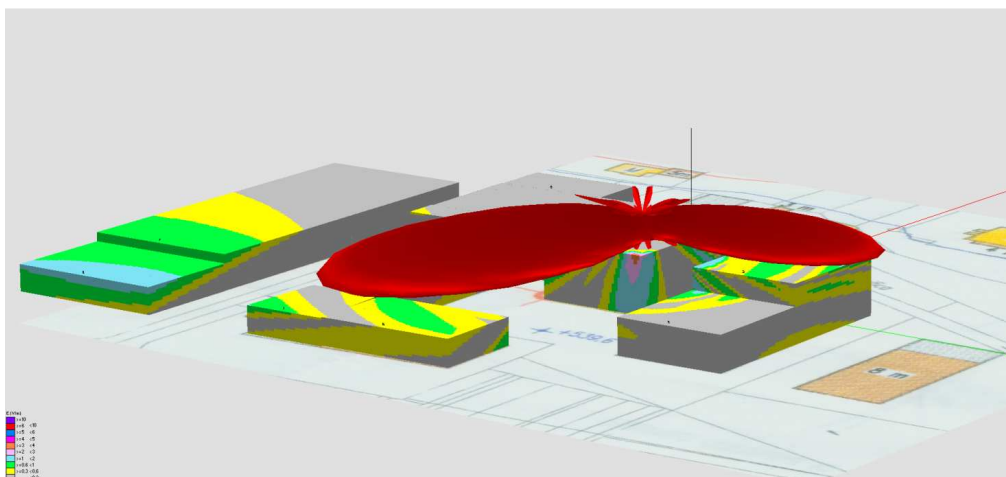


Figura 8.3.4 - Volume di rispetto a 3 V/m - Amerique

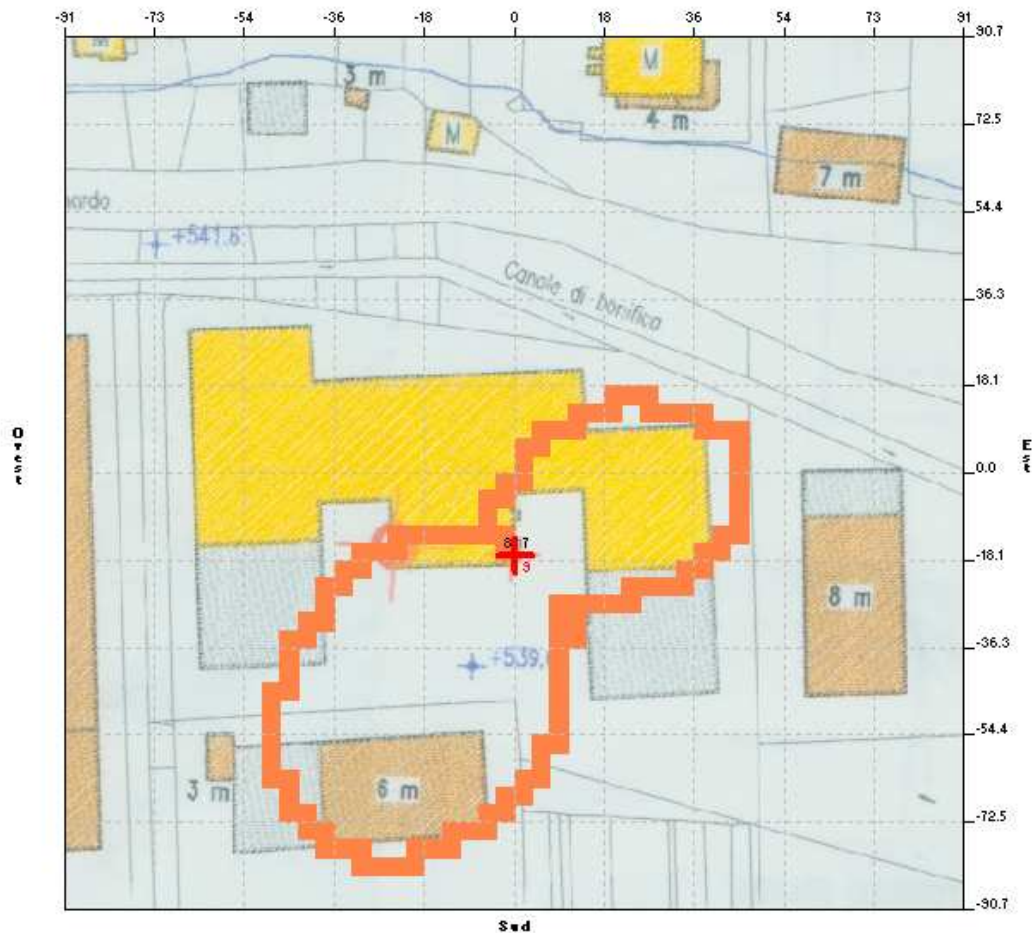


Figura 8.3.5 - Proiezione a terra del volume di rispetto a 3 V/m - Amerique

#### 8.4 Dati, Grafici ed Elaborazioni

Dopo aver eseguito le misure in tutti e tre i siti e aver ricevuto dall'operatore i dati di potenza e di traffico relativi ai giorni di misura, si è potuto procedere con l'elaborazione di tutti i dati. Come già detto nel paragrafo precedente, non sono stati forniti i dati di traffico in maniera completa e pertanto si sono esclusi dall'analisi per i due siti valdostani mentre verranno presi in considerazione per le misure eseguite a Ivrea. Per tutti i siti presi in esame, le misure di campo sono state eseguite ogni 10 secondi mentre i dati di potenza (e di traffico, quando disponibili) sono stati forniti ogni 3 secondi. Sarebbe stato naturale porre la frequenza di campionamento pari a 3 secondi in modo da poterla direttamente confrontare con i dati di potenza, tuttavia, si è deciso di impostare un intervallo superiore in quanto dopo l'analisi dei dati di potenza forniti nella prima misura, dove la frequenza di campionamento era stata posta pari a un minuto, si è visto che non sempre il valore della potenza veniva dato ogni 3 secondi ma ogni tanto era fornito ogni 4 o 5



secondi in maniera del tutto casuale. Se l'intervallo di campionamento fosse stato posto pari a 3 secondi vi sarebbe state delle misure non utilizzabili in quanto i dati di potenza sarebbero stati sfasati rispetto a quelli di campo. Per questo motivo si è preferito eseguire le misure ogni 10 secondi e poi andare a selezionare i valori istantanei nell'istante più prossimo a quello delle misure.

La potenza e il campo elettrico sono legati da una relazione quadratica:

$$E(r, \theta, \varphi) = \frac{\sqrt{30 P_{\text{alim}} G(\theta, \varphi)}}{r} \quad (8.1)$$

In ognuno dei casi esaminati il guadagno  $G$  e la distanza  $r$  dalla sorgente non variano durante l'esecuzione delle misure. Per questo motivo la relazione diventa:

$$E(r, \theta, \varphi) = k \sqrt{P_{\text{alim}}} \quad (8.2)$$

Dove  $k = \sqrt{30G}/r$  è una costante.

Per poterli mettere in relazione i dati di potenza sono stati trasformati da dBm a W. A questo punto si è calcolata la radice quadrata dei valori di potenza e sono stati confrontati tali valori con i dati di campo. L'elaborazione è stata eseguita calcolando la correlazione  $R$  tra campo e potenza. Sono state calcolate correlazioni tra i valori istantanei (ogni 10 secondi), tra le ore della notte e del giorno e tra varie medie: 1 minuto, 6 minuti, 10 minuti, 15 minuti, 30 minuti, 1 ora. Le elaborazioni sono state eseguite principalmente con il programma Microsoft Excel ma per la parte di statistica è stato utilizzato il software libero "R", in particolare la versione R studio (<http://www.R-project.org/>). Grazie a R è stato possibile disegnare la retta che mette in relazione campo elettrico e radice della potenza (legati da una relazione lineare) e calcolare, con il metodo del chi quadro ridotto, quanto tale retta interpola bene i punti.

Per poter confrontare i dati di potenza (forniti ogni 3 secondi) con i dati di campo (misurati ogni 10 secondi) sono state create delle macro con Excel. L'idea era di creare dei semplici cicli FOR considerando che ogni 10 secondi sono presenti tre valori di potenza e uno di campo. In realtà, come già accennato, i dati di traffico e di potenza sono stati forniti per la maggior parte ogni tre secondi, ma ogni tanto, in modo del tutto casuale, vengono forniti ogni quattro o cinque secondi anziché tre. Questo fatto ha creato qualche problema con l'implementazione delle macro, risolta però con i seguenti metodi. Per la macro che deve selezionare i valori

istantanei di potenza negli istanti di tempo più prossimi a quelli delle misure di campo, si fa un confronto fra i due valori di orario: se l'orario coincide perfettamente viene preso il valore di potenza, altrimenti si prendono i due istanti più vicini, uno minore e l'altro maggiore, e si fa la media dei due valori di potenza. Per quanto riguarda le macro che eseguono le medie sui valori, viene creato un vettore con gli orari sfasati di un minuto o di più, per esempio se le misure iniziano alle ore 14.15.00 e si vogliono fare le medie su un minuto si creerà un vettore che parte dalle 14.16.00 e prosegue con le 14.17.00, 14.18.00 fino all'ultimo orario delle misure. A questo punto si media su tutti i valori corrispondenti a orari intermedi tra il primo e il secondo orario, e così via. Stesso procedimento per le macro che calcolano le medie su 6, 10, 15, 30 minuti e 1 ora.

#### Sub Media\_1\_min()

```

With ActiveSheet
Range("D2") = "Riga da cui partire"
Range("D3") = "Ultima riga utile"
Range("E2") = InputBox(Prompt:="Riga da cui partire")
Range("E3") = InputBox(Prompt:="Prima riga da elscudere")

j = Range("E2")
q = 1
somma = 0
conta = 0

Range("G1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "14:52:10"
Range("G2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "14:53:10"
Range("G1:G2").Select
Selection.AutoFillDestination:=Range("G1:G1509"),
Type:=xlFillDefault
Range("G1:G1509").Select

For k = j To Range("E3")
f = Cells(q, 7).Value
h = Cells(j, 1).Value

If (h >= f) Then

Cells(q, 8) = Cells(j, 1).Value
Cells(q, 9).Value = somma / conta
conta = 1
somma = Cells(j, 2).Value

Cells(j, 1).Select
With Selection.Interior
.Pattern = xlSolid
.PatternColorIndex = xlAutomatic
.Color = 65535
.TintAndShade = 0
.PatternTintAndShade = 0
End With
q = q + 1

Else

```

```

somma = somma + Cells(j, 2).Value
conta = conta + 1

End If
j = j + 1
Next k

End With
End Sub

```

Si riporta di seguito un esempio della macro che calcola la media su 1 minuto.

<b>Orario:</b>	<b>Valore:</b>				
14.20.01	7,9615935	14.21.05	9,15587806	14.22.06	6,76705958
14.20.04	7,16638275	14.21.08	6,36942165	14.22.09	6,36942165
14.20.07	6,76705958	14.21.11	6,76705958	14.22.12	7,16638275
14.20.10	7,16638275	14.21.14	6,36942165	14.22.15	7,9615935
14.20.14	6,76705958	14.21.17	7,56484441	14.22.19	6,36942165
14.20.17	6,76705958	14.21.20	6,36942165	14.22.22	6,76705958
14.20.20	6,36942165	14.21.23	7,56484441	14.22.25	7,16638275
14.20.23	6,36942165	14.21.26	6,76705958	14.22.28	7,16638275
14.20.26	5,97172775	14.21.29	6,36942165	14.22.31	7,56484441
14.20.29	6,76705958	14.21.32	6,36942165	14.22.34	6,76705958
14.20.32	6,76705958	14.21.35	7,9615935	14.22.37	6,76705958
14.20.37	6,36942165	14.21.39	11,148078	14.22.40	7,9615935
14.20.40	6,36942165	14.21.42	15,527445	14.22.43	7,16638275
14.20.43	6,36942165	14.21.45	7,56484441	14.22.46	9,15587806
14.20.46	6,76705958	14.21.48	6,76705958	14.22.49	7,9615935
14.20.49	6,76705958	14.21.51	5,97172775	14.22.52	6,76705958
14.20.52	6,36942165	14.21.54	6,36942165	14.22.56	7,56484441
14.20.56	6,76705958	14.21.57	9,95176243	14.22.58	8,35987916
14.20.59	7,16638275	14.22.00	7,56484441	14.23.02	11,9426306
14.21.02	7,16638275	14.22.03	6,36942165		
<b>MEDIA</b>		<b>MEDIA</b>		<b>MEDIA</b>	
14.21.02	6,76748	14.22.00	7,623709	14.23.02	7,668633

I valori evidenziati in giallo sono stati selezionati perché sono i primi valori a partire dai quali vengono calcolate le medie. Vengono memorizzati accanto al valore medio come indicato in verde nell'esempio. La media 14.21.02 è la media dei valori che sono stati misurati dalle 14.20.00 alle 14.21.00.

Lo stesso ragionamento viene utilizzato per la costruzione delle altre macro per le medie su più minuti. Il codice relativo a tutte le altre macro è riportato nelle appendici.

Dopo aver eseguito le macro su tutti i dati di potenza, di campo e di traffico (dove possibile) sono state ottenute le relative serie di valori che sono state, poi, messe in relazione, trovando come risultato la correlazione che li lega. Da tali sequenze sono

ottenuto dei grafici, di cui se ne riportano solo alcuni esempi di seguito (Figure 8.4.1 a 8.4.17). Tutti i grafici sono riportati in appendice.

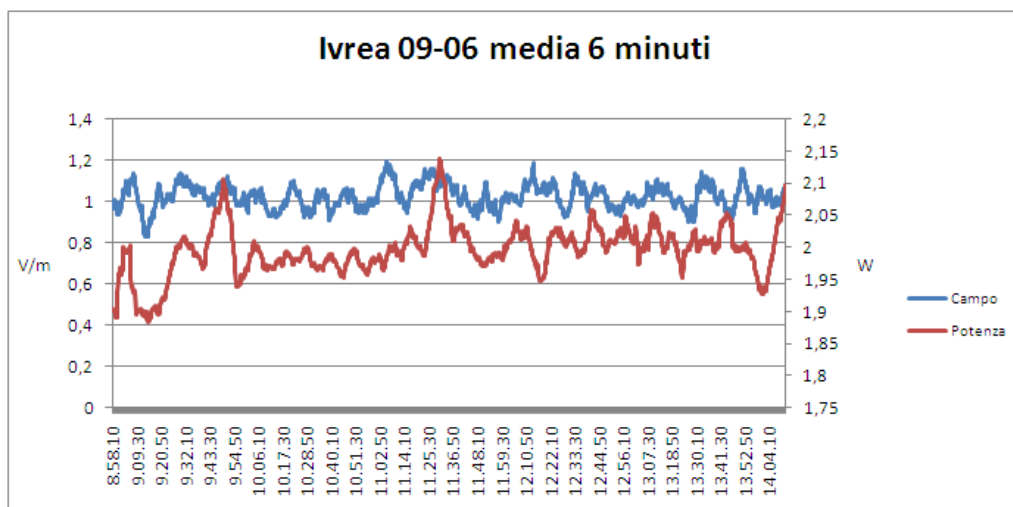


Figura 8.4.1 - Dati mediati su 6 minuti (Campo\_Potenza) - sito Ivrea - 09/06

Il grafico in Figura 8.4.1 riporta le due sequenze di campo elettrico e potenza mediate su 6 minuti per il sito di Ivrea, relative alle misure effettuate nella giornata del 09/06/2011.

La correlazione tra campo e potenza è pari a 0,319.

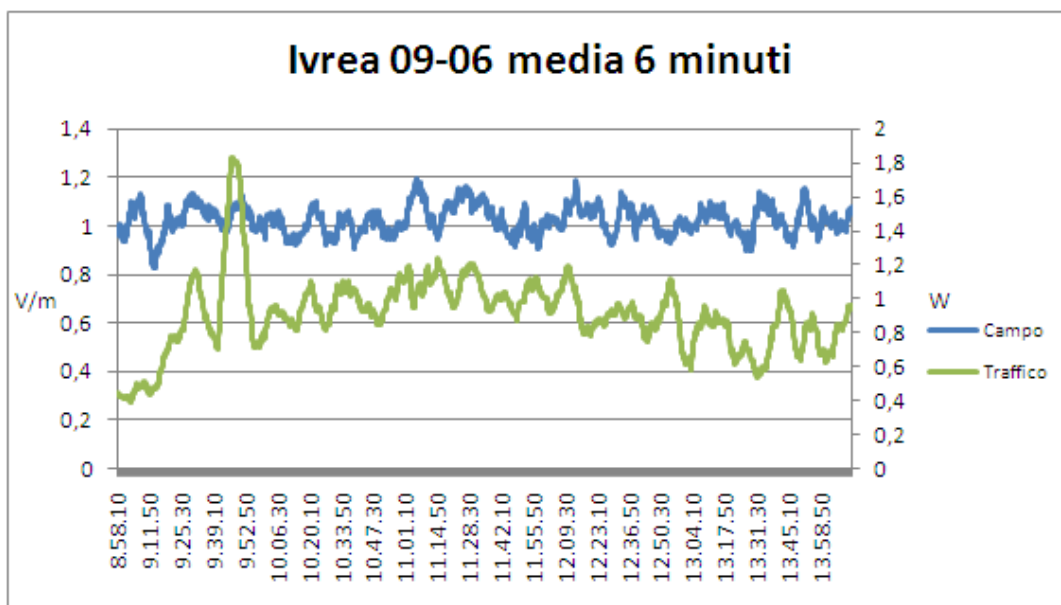


Figura 8.4.2 - Dati mediati su 6 minuti (Campo\_Traffico) - sito Ivrea - 09/06

Il grafico in Figura 8.4.2 riporta le due sequenze di campo elettrico e traffico mediate su 6 minuti per il sito di Ivrea, relative alle misure effettuate nella giornata del 09/06/2011.

La correlazione tra campo e traffico è pari a 0,238.

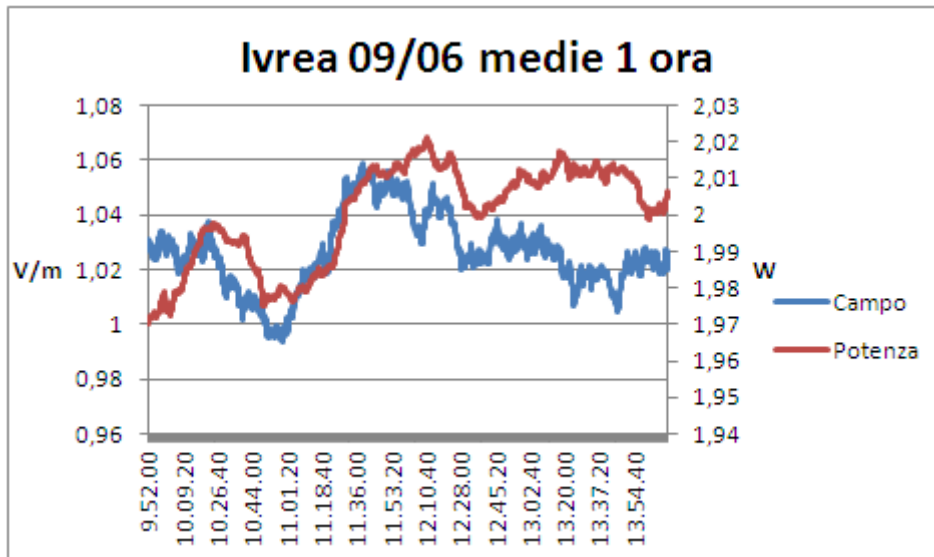


Figura 8.4.3 - Dati mediati su 60 minuti (Campo\_Potenza) - sito Ivrea - 09/06

Il grafico in Figura 8.4.3 riporta le due sequenze di campo elettrico e potenza mediate su 1 ora per il sito di Ivrea, relative alle misure effettuate nella giornata del 09/06/2011.

La correlazione tra campo e potenza è pari a 0,483.

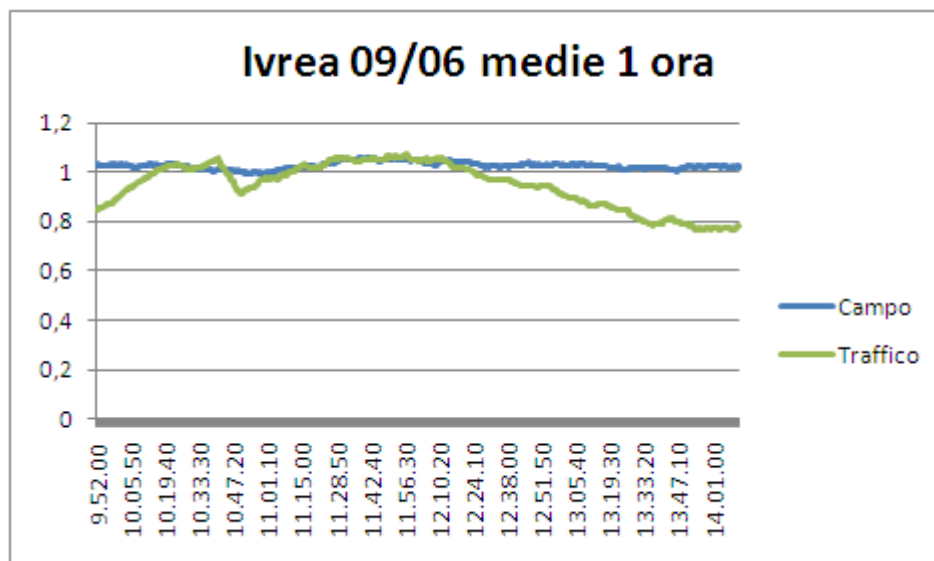


Figura 8.4.4 – Dati mediati su 60 minuti (Campo\_Trafico) - sito Ivrea - 09/06

Il grafico in Figura 8.4.4 riporta le due sequenze di campo elettrico e traffico mediate su 1 ora per il sito di Ivrea, relative alle misure effettuate nella giornata del 09/06/2011.

La correlazione tra campo e traffico è pari a 0,428.

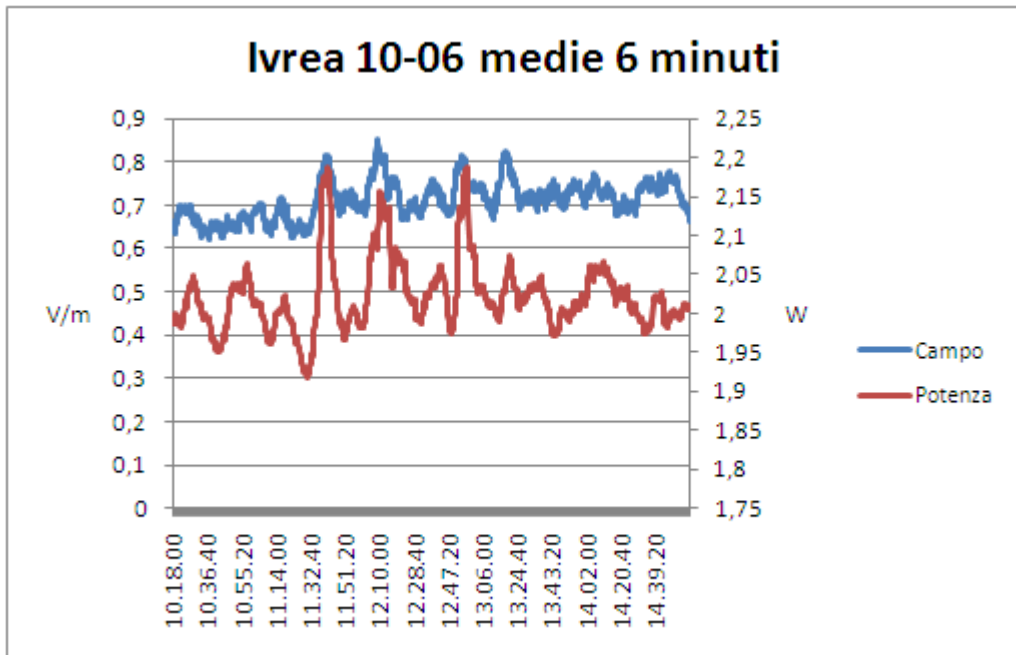


Figura 8.4.5 - Dati mediati su 6 minuti (Campo\_Potenza) - sito Ivrea - 10/06

Il grafico in Figura 8.4.5 riporta le due sequenze di campo elettrico e potenza mediate su 6 minuti per il sito di Ivrea, relative alle misure effettuate nella giornata del 10/06/2011.

La correlazione tra campo e potenza è pari a 0,617.

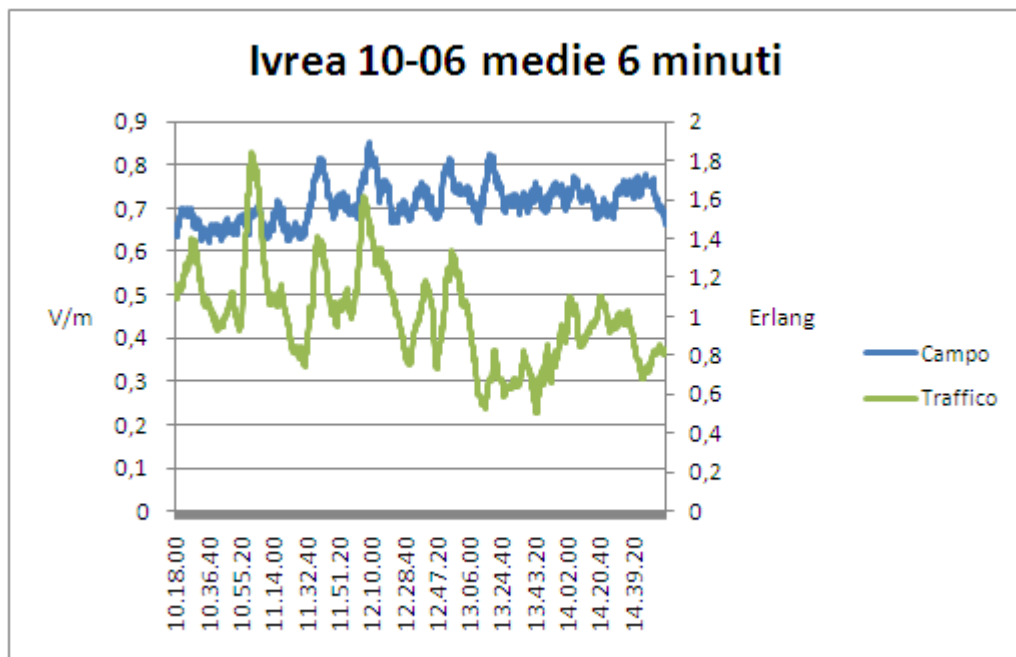


Figura 8.4.6 - Dati mediati su 6 minuti (Campo\_Traffico) - sito Ivrea - 10/06

Il grafico in Figura 8.4.6 riporta le due sequenze di campo elettrico e traffico mediate su 6 minuti per il sito di Ivrea, relative alle misure effettuate nella giornata del 10/06/2011.

La correlazione tra campo e traffico è pari a 0,021.

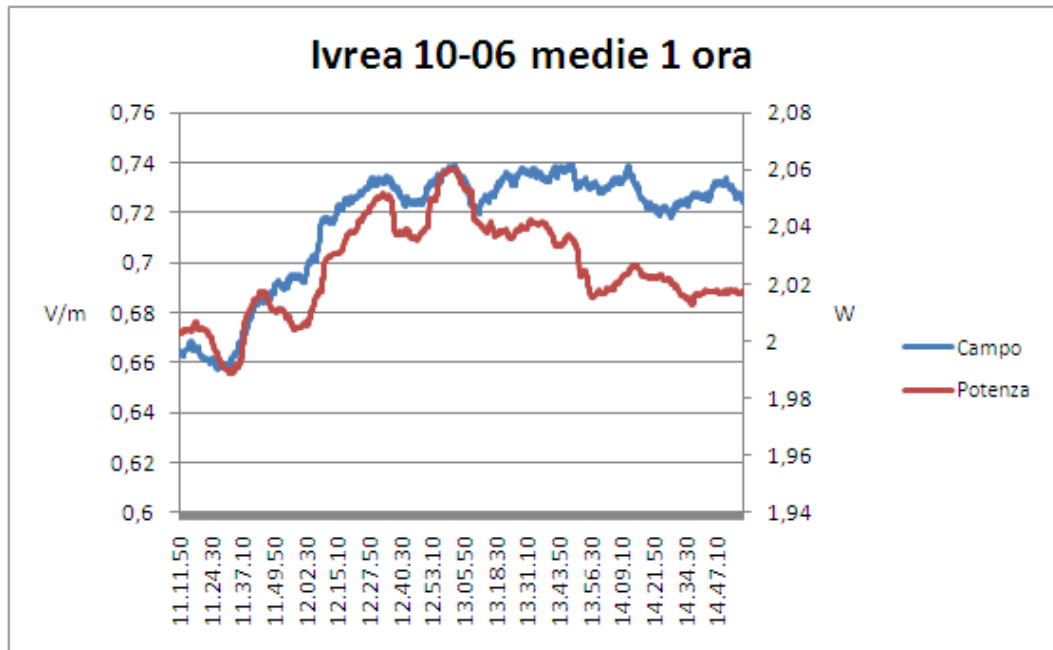


Figura 8.4.7 - Dati mediati su 60 minuti (Campo\_Potenza) - sito Ivrea - 10 /06

Il grafico in Figura 8.4.7 riporta le due sequenze di campo elettrico e potenza mediate su 60 minuti per il sito di Ivrea, relative alle misure effettuate nella giornata del 10/06/2011.

La correlazione tra campo e potenza è pari a 0,769.

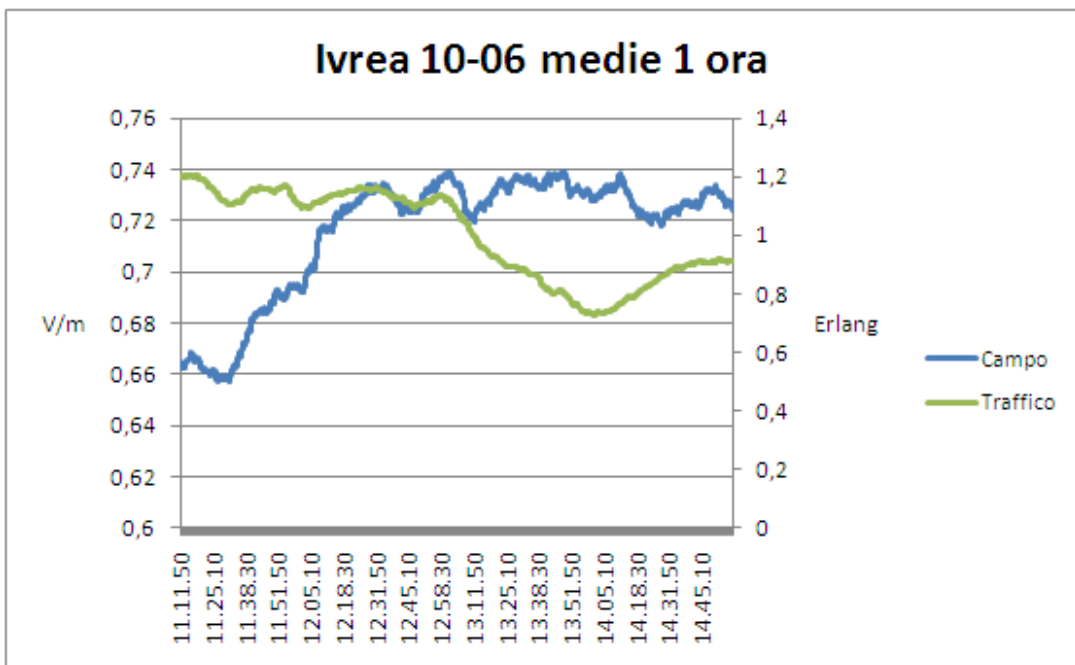


Figura 8.4.8 - Dati mediati su 60 minuti (Campo\_Traffico) - sito Ivrea - 10/06

Il grafico in Figura 8.4.8 riporta le due sequenze di campo elettrico e traffico mediate su 60 minuti per il sito di Ivrea, relative alle misure effettuate nella giornata del 10/06/2011.

La correlazione tra campo e traffico è pari a -0,563.

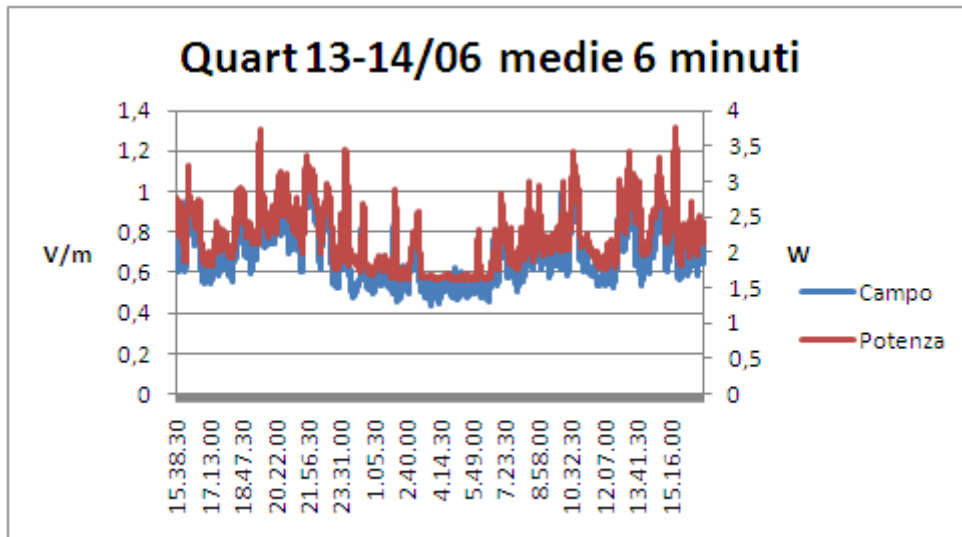


Figura 8.4.9 - Dati mediati su 6 minuti (Campo\_Potenza) - sito Quart - 13\_14/06

Il grafico in Figura 8.4.9 riporta le due sequenze di campo elettrico e potenza mediate su 6 minuti per il sito di Quart, relative alle misure effettuate nelle giornate del 13 -14/06/2011.

La correlazione tra campo e potenza è pari a 0,908.

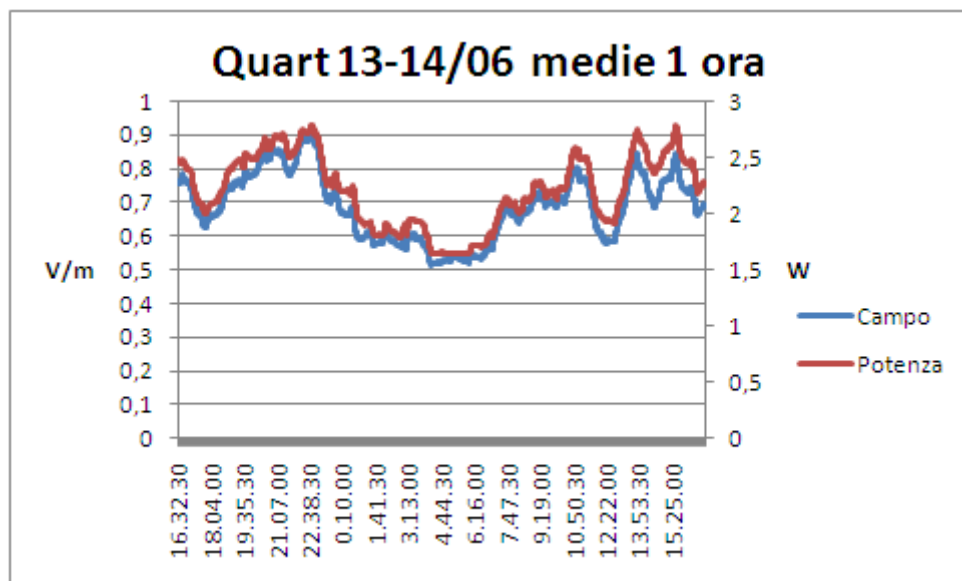


Figura 8.4.10 - Dati mediati su 60 minuti (Campo\_Potenza) - sito Quart - 13\_14/06

Il grafico in Figura 8.4.10 riporta le due sequenze di campo elettrico e potenza mediate su 60 minuti per il sito di Quart, relative alle misure effettuate nelle giornate del 13 -14/06/2011.

La correlazione tra campo e potenza è pari a 0,983.



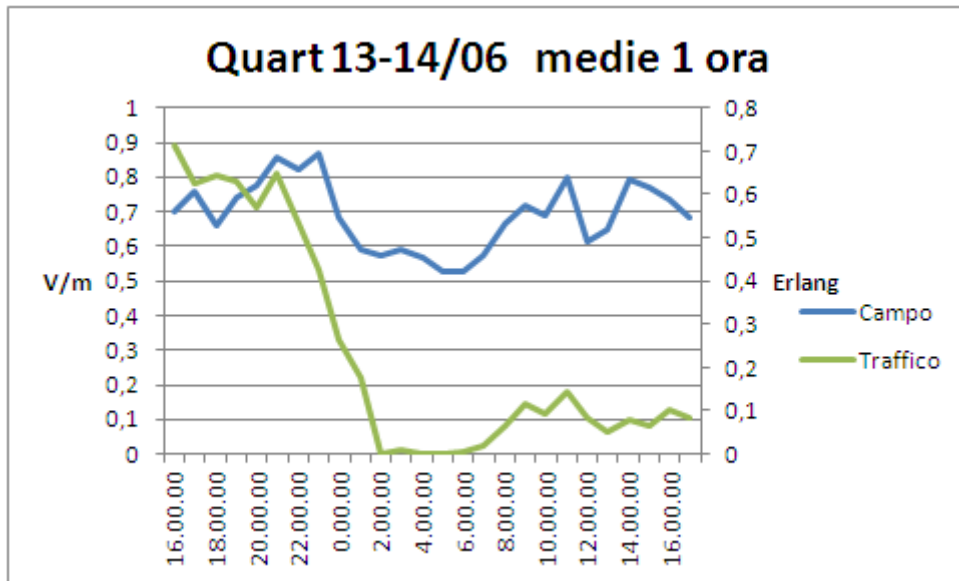


Figura 8.4.11 - Dati mediati su 60 minuti (Campo\_Traffico) - sito Quart - 13\_14/06

Il grafico in Figura 8.4.11 riporta le due sequenze di campo elettrico e traffico mediate su 60 minuti per il sito di Quart, relative alle misure effettuate nelle giornate del 13 -14/06/2011.

La correlazione tra campo e traffico è pari a 0,611.

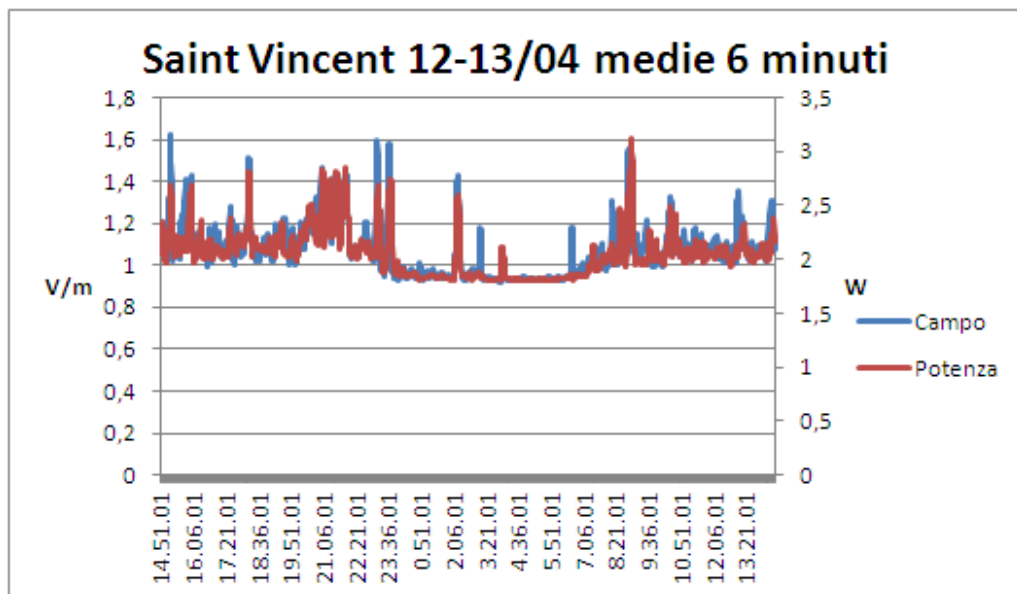


Figura 8.4.12 - Dati mediati su 6 minuti (Campo\_Potenza) - sito Saint Vincent - 11\_12/04

Il grafico in Figura 8.4.12 riporta le due sequenze di campo elettrico e potenza mediate su 6 minuti per il sito di Saint Vincent, relative alle misure effettuate nelle giornate del 11 - 12/04/2011.

La correlazione tra campo e potenza è pari a 0,855.

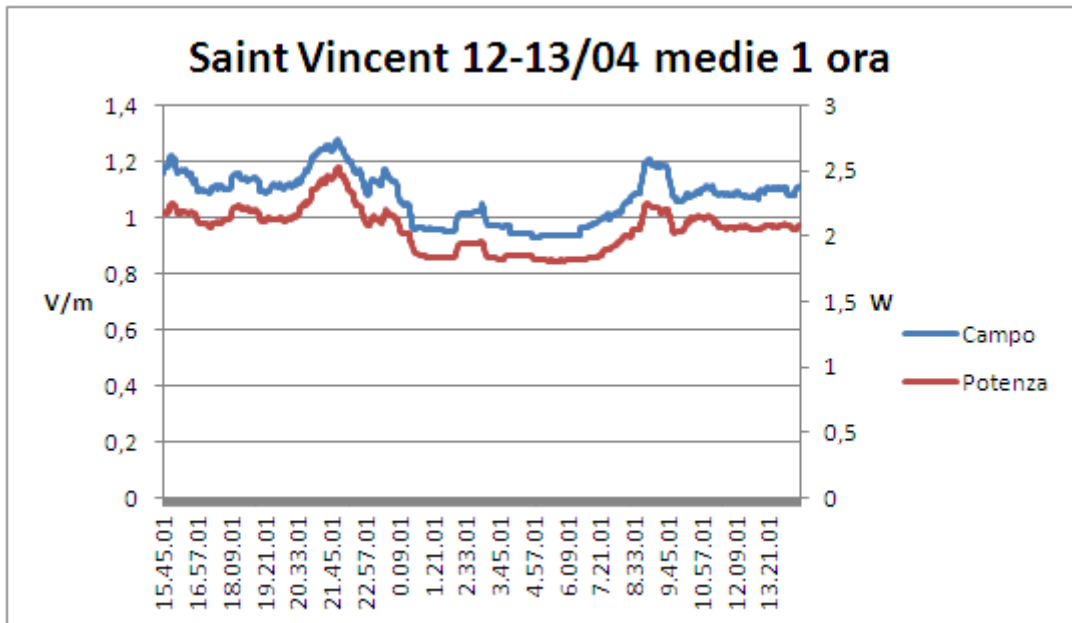


Figura 8.4.13 - Dati mediati su 60 minuti (Campo\_Potenza) - sito Saint Vincent - 11\_12/04

Il grafico in Figura 8.4.13 riporta le due sequenze di campo elettrico e potenza mediate su 1 ora per il sito di Saint Vincent, relative alle misure effettuate nelle giornate del 11 - 12/04/2011.

La correlazione tra campo e potenza è pari a 0,980.

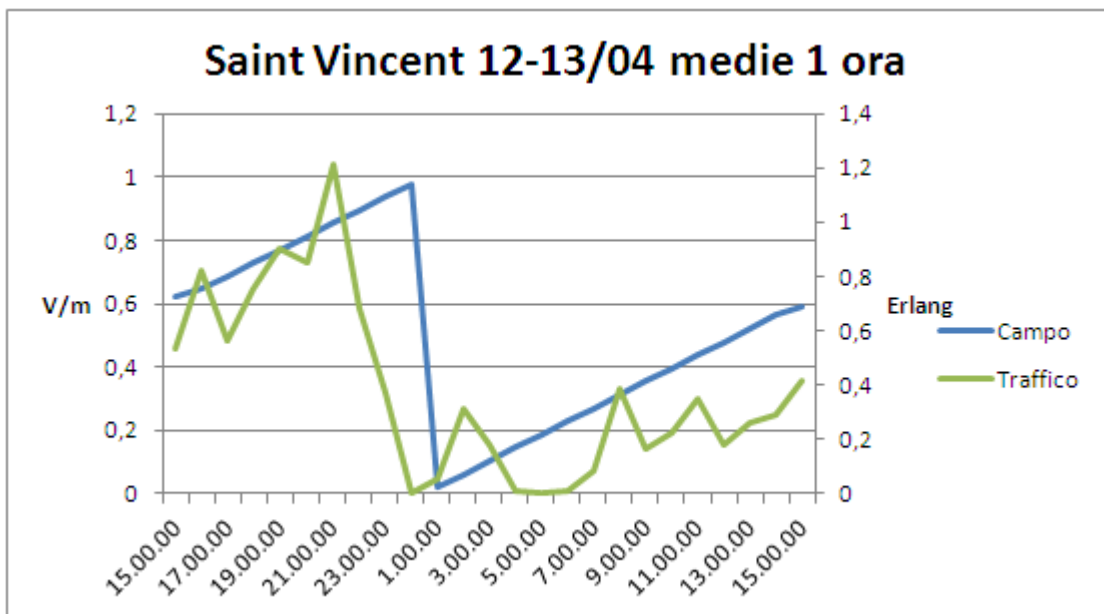


Figura 8.4.14 - Dati mediati su 60 minuti (Campo\_Traffico) - sito Saint Vincent - 11\_12/04

Il grafico in Figura 8.4.14 riporta le due sequenze di campo elettrico e traffico mediate su 60 minuti per il sito di Saint Vincent, relative alle misure effettuate nelle giornate del 11 - 12/04/2011.

La correlazione tra campo e traffico è pari a 0,633.

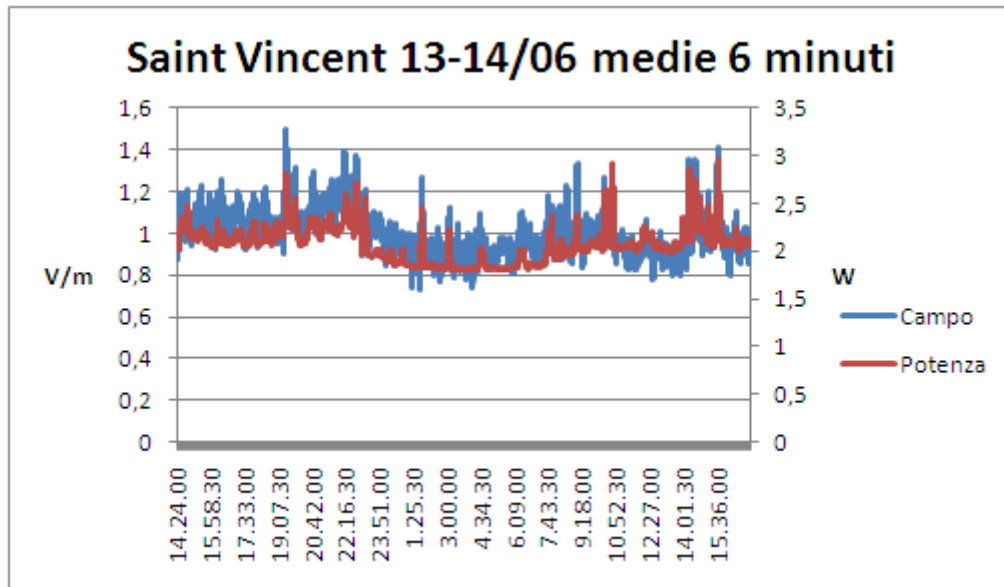


Figura 8.4.15 - Dati mediati su 6 minuti (Campo\_Potenza) - sito Saint Vincent - 13\_14/06

Il grafico in Figura 8.4.15 riporta le due sequenze di campo elettrico e potenza mediate su 6 minuti per il sito di Saint Vincent, relative alle misure effettuate nelle giornate del 13 - 14/06/2011.

La correlazione tra campo e potenza è pari a 0,740.

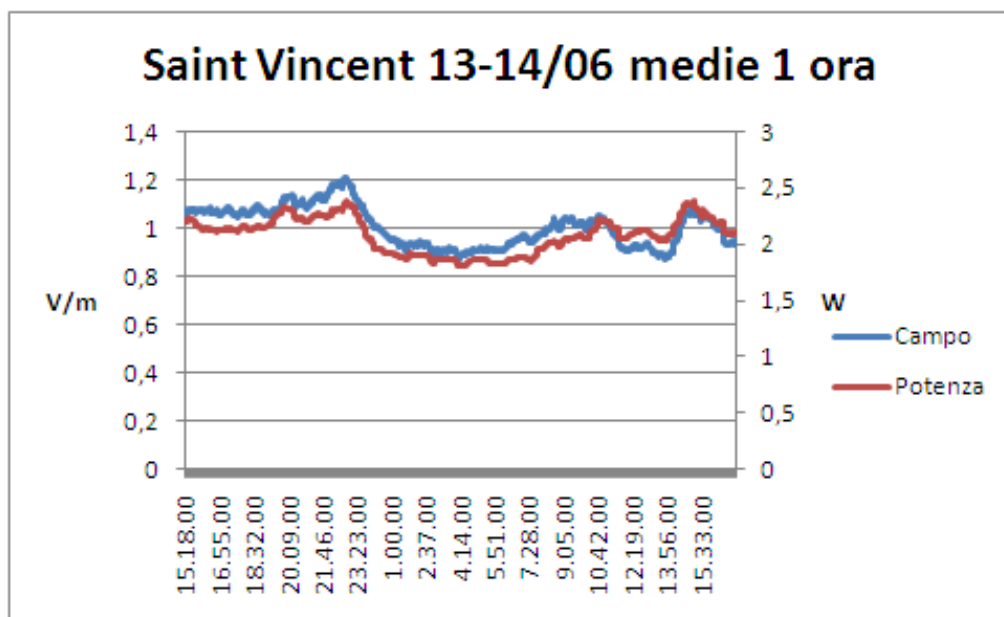


Figura 8.4.16 - Dati mediati su 60 minuti (Campo\_Potenza) - sito Saint Vincent - 13\_14/06

Il grafico in Figura 8.4.16 riporta le due sequenze di campo elettrico e potenza mediate su 60 minuti per il sito di Saint Vincent, relative alle misure effettuate nelle giornate del 13 - 14/06/2011.

La correlazione tra campo e potenza è pari a 0,810.

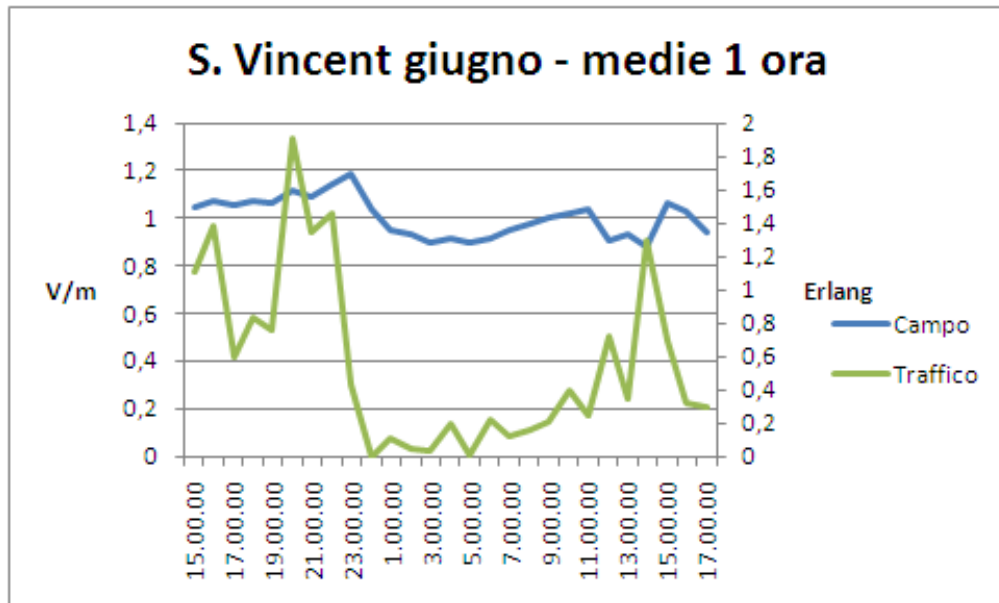


Figura 8.4.17 - Dati mediati su 60 minuti (Campo\_Traffico) - sito Saint Vincent - 13\_14/06

Il grafico in Figura 8.4.17 riporta le due sequenze di campo elettrico e traffico mediate su 60 minuti per il sito di Saint Vincent, relative alle misure effettuate nelle giornate del 13 - 14/06/2011.

La correlazione tra campo e traffico è pari a 0,789.

Sono state calcolate, inoltre, per ognuna delle situazioni presentate precedentemente, le correlazioni nelle ore diurne e notturne. E' stato preso come orario notturno l'orario che va dalle 22 alle 6. Tutti i valori già presentati più le correlazioni diurne/notturne sono riassunte nella tabella 8.1 sottostante. I dati denominati "S Vincent4\_" indicano le sequenze di dati relative alle misure eseguite presso il sito di Saint Vincent nelle giornate del 12-13/04/2011; le sequenze "S Vincent6\_" indicano invece le misure eseguite in data 13-14/06/2011.

DATI	CORRELAZIONE (R) Tra Campo e radice_Potenza	CORRELAZIONE (R) tra Campo e Traffico	CORRELAZIONE GIORNO(6-22)	CORRELAZIONE NOTTE(22-6)
Amerique istantanei	0,346	0,163*	0,287	0,385
Amerique 1 minuto	0,617	0,305*	0,576	0,663
Amerique 6 minuti	0,908	0,429*	0,890	0,919
Amerique 10 minuti	0,943	0,470*	0,930	0,950
Amerique 15 minuti	0,961	0,502*	0,948	0,969
Amerique 30 minuti	0,977	0,575*	0,966	0,982
Amerique 1 ora	0,983	0,584	0,973	0,990
S Vincent4_ 1 minuto	0,494	0,112*	0,441	0,622
S Vincent4_ 6 minuti	0,855	0,287*	0,787	0,897
S Vincent4_ 10 minuti	0,904	0,322*	0,851	0,937
S Vincent4_ 15 minuti	0,933	0,331*	0,891	0,961
S Vincent4_ 30 minuti	0,964	0,315*	0,940	0,976
S Vincent4_ 1 ora	0,980	0,633	0,968	0,985
S Vincent6_ istantanei	0,183	0,080*	0,149	0,219
S Vincent6_ 1 minuto	0,427	0,212*	0,371	0,483
S Vincent6_ 6 minuti	0,740	0,491*	0,669	0,861
S Vincent6_ 10 minuti	0,777	0,562*	0,690	0,920
S Vincent6_ 15 minuti	0,794	0,609*	0,694	0,949
S Vincent6_ 30 minuti	0,808	0,663*	0,687	0,973
S Vincent6_ 1 ora	0,810	0,526	0,661	0,990
Ivrea9 istantanei	0,012	0,008	-	-
Ivrea9 1 minuto	0,068	0,085	-	-
Ivrea9 6 minuti	0,319	0,238	-	-
Ivrea9 10 minuti	0,432	0,301	-	-
Ivrea9 15 minuti	0,494	0,390	-	-
Ivrea9 30 minuti	0,482	0,442	-	-
Ivrea9 1 ora	0,483	0,428	-	-
Ivrea10 istantanei	0,052	0,031	-	-
Ivrea10 1 minuto	0,167	0,024	-	-
Ivrea10 6 minuti	0,617	0,021	-	-
Ivrea10 10 minuti	0,649	-0,073	-	-
Ivrea10 15 minuti	0,647	-0,185	-	-
Ivrea10 30 minuti	0,692	-0,417	-	-
Ivrea10 1 ora	0,769	-0,563	-	-

**Tabella 8.1 – Valori di Correlazione tra Campo Elettrico e Potenza**

I valori indicati con un asterisco indicano che la media non è stata svolta su tutte le ore di misura ma solo sulle ore in cui erano disponibili i dati di traffico.

La prima considerazione che si può fare riguardo ai valori ottenuti è che all'aumentare del periodo su cui si esegue la media, aumenta anche il valore di correlazione. Per i valori istantanei, infatti, si vede che le correlazioni sono molto basse. I valori risultano essere già buoni con le medie su 6 minuti e diventano molto alte con i valori mediati su 30 minuti e 1 ora. Il sito di Ivrea costituisce un'eccezione

a tale andamento in quanto la correlazione risulta essere sempre inferiore ai 0.8. Ciò accade poiché per questo sito le misurazioni sono state possibili solo per un numero ridotto di ore consecutive e questo fa sì che i valori ottenuti mediando su mezz'ora o un'ora siano effettivamente ridotti (5 o 6 valori). In tal caso il valore ottenuto non è del tutto attendibile poiché solitamente vengono presi in considerazione molti più dati da analizzare.

Da notare che per il sito di Ivrea, in particolar modo per le misure eseguite nella giornata del 10 giugno, le correlazioni tra campo elettrico e traffico, per le sequenze mediate su 15 minuti e più, danno una correlazione negativa. Questo è possibile e sta a indicare che le due sequenze hanno un comportamento opposto: se una sequenza cresce, l'altra diminuisce e viceversa. Questo comportamento potrebbe essere dovuto al numero estremamente limitato di campioni, pari a 5 o 6 nelle medie orarie, e ciò spiegherebbe anche il fatto che anche le correlazioni tra campo elettrico e potenza sono basse rispetto agli altri siti. Inoltre, la correlazione negativa potrebbe essere spiegata nel modo seguente: se un'utente si collega alla rete per telefonare o per scaricare dati, esso genera una certa quantità di traffico. Questo avviene indipendentemente dalla posizione dell'utente che, al contrario, influenza l'emissione della potenza. Come già visto nei capitoli precedenti, una SRB copre una certa porzione di territorio denominata cella. Se un'utente si trova nelle prossimità dell'antenna, il meccanismo di Power Control fa sì che il dispositivo mobile e la rete comunichino utilizzando la minima potenza possibile. Se, al contrario, l'utente è posizionato ai confini della cella, la sua comunicazione con la rete richiederà un valore di potenza nettamente superiore. Per questo motivo è possibile che il valore del traffico sia elevato e che al contempo il campo elettrico sia basso. In questo modo le due sequenze hanno effettivamente un comportamento opposto, anche se c'è da notare che tale fenomeno può capitare in modo del tutto casuale.

Una seconda considerazione è che le correlazioni sui valori notturni sono quasi sempre maggiori delle correlazioni totali, mentre le correlazioni diurne sono sempre inferiori. Ciò è dovuto al fatto che durante la notte non c'è un grande numero di telefonate o di scaricamento dati, per cui il valore di potenza emesso dall'antenna è pressoché pari al valore minimo che viene emesso sempre dalla portante. Per questo motivo, anche i valori di campo sono nella quasi totalità dei casi pari al valore minimo e questo andamento "piatto" fa sì che la correlazione risulti buona.

Per quanto riguarda le correlazioni diurne, sono più basse delle correlazioni totali in quanto durante la giornata sono presenti molte telefonate o molte connessioni a pacchetto che fanno sì che la potenza erogata vari molto nel tempo; il campo elettrico, essendo misurato su 10 secondi, non rileva la presenza di tutte queste variazioni e pertanto la correlazione risulta leggermente inferiore. Riporto di seguito alcuni grafici relativi alle correlazioni diurne e notturne in modo da visualizzarne l'andamento (Figure da 8.4.18 a 8.4.23).

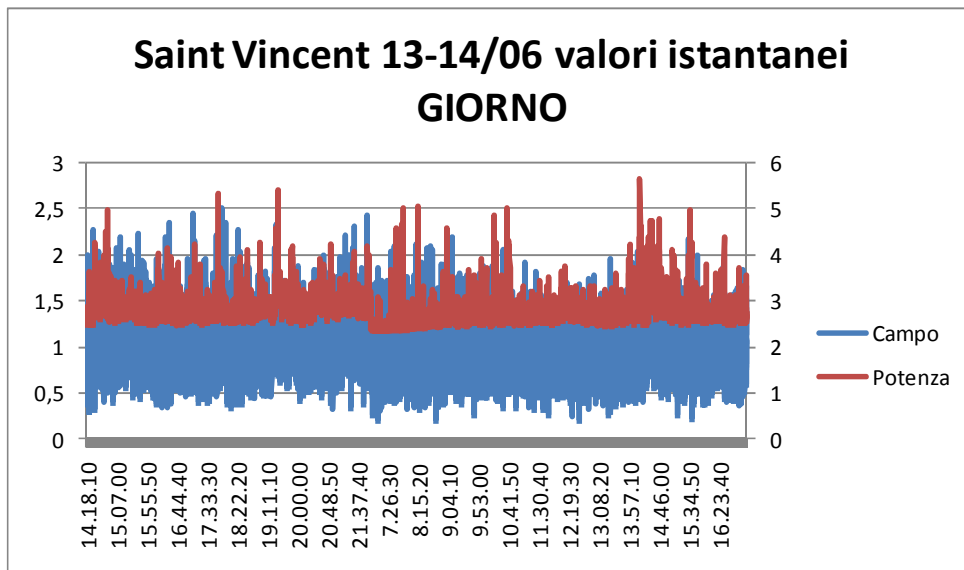


Figura 8.4.18 - Valori istantanei DIURNI - Saint Vincent 13-14/06

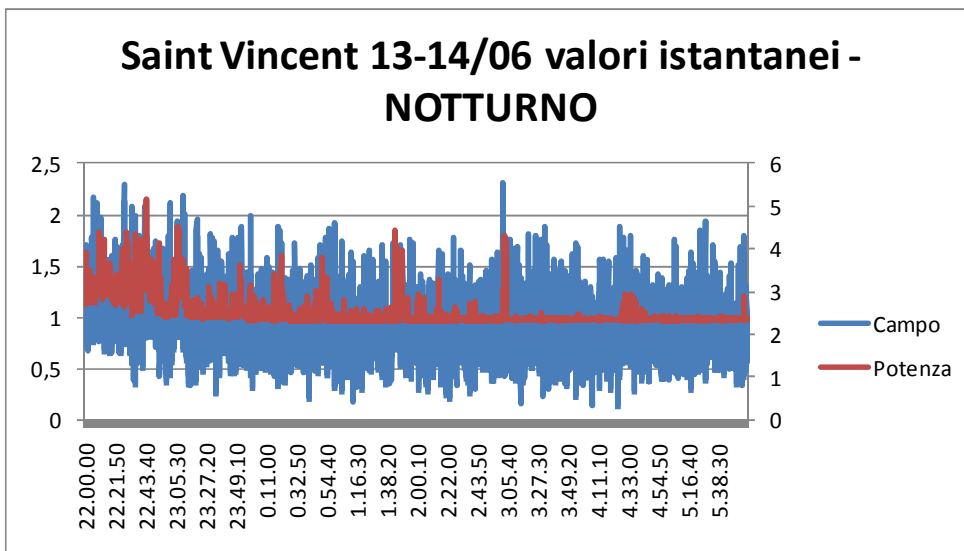


Figura 8.4.19 - Valori istantanei NOTTURNI - Saint Vincent 13-14/06

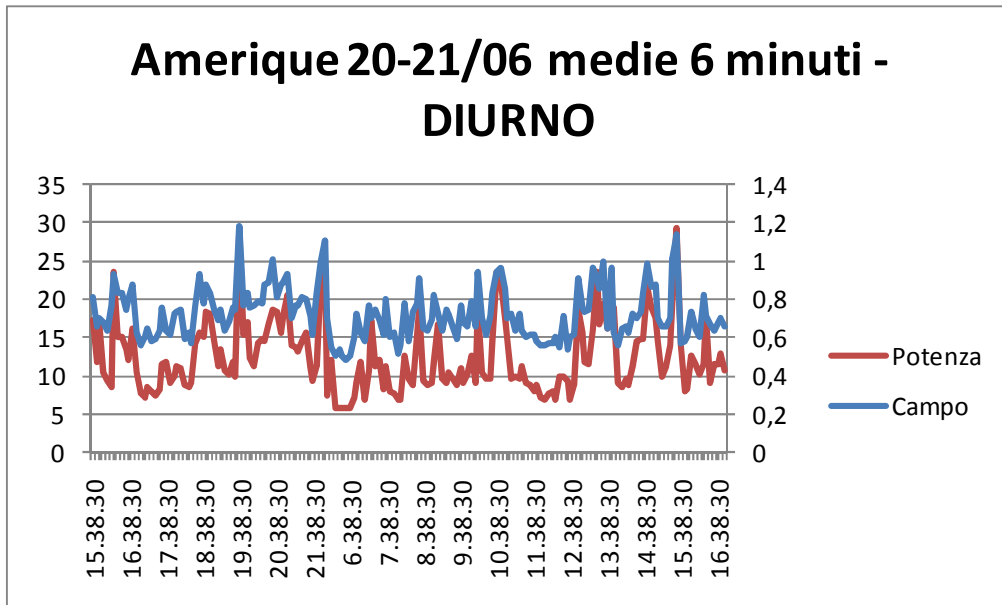


Figura 8.4.20 - Valori mediati su 6 minuti DIURNI – Amerique

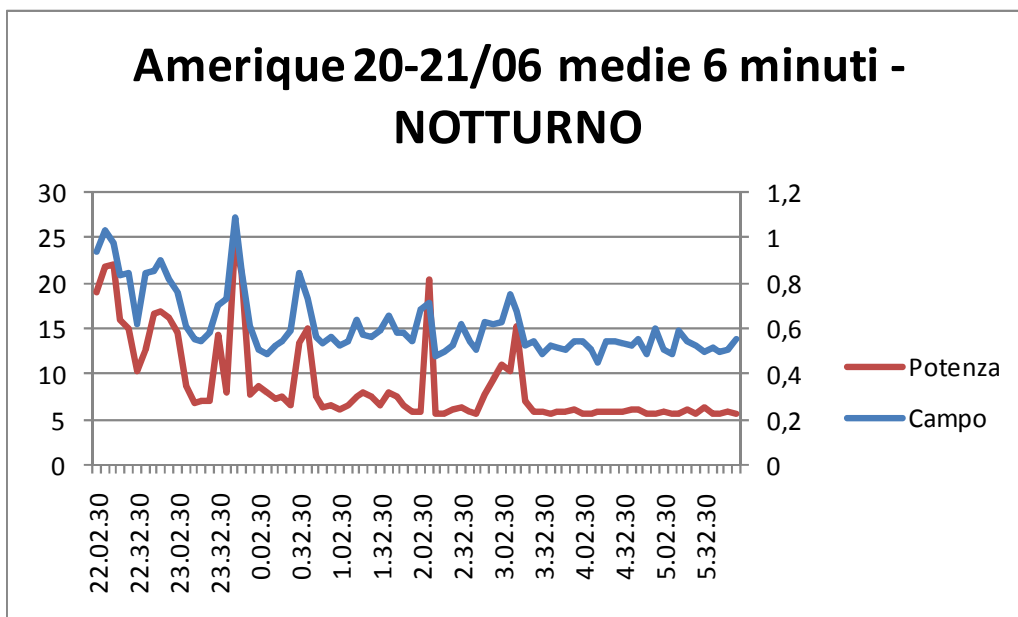


Figura 8.4.21 - Valori mediati su 6 minuti NOTTURNI – Amerique



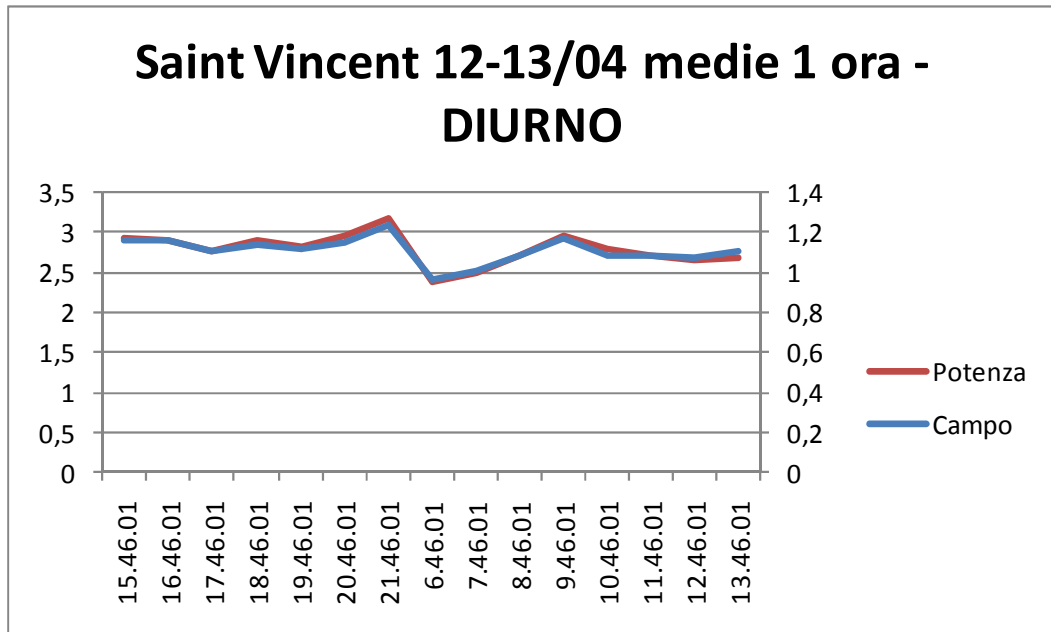


Figura 8.4.22 - Valori media oraria DIURNI - Saint Vincent 12-13/04

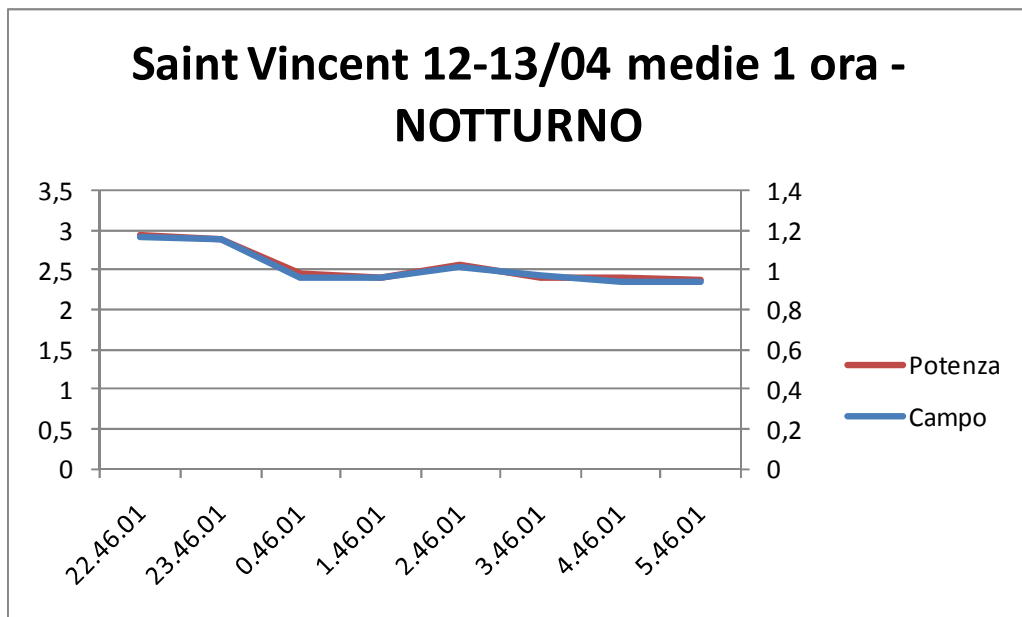


Figura 8.4.23 - Valori media oraria DIURNI - Saint Vincent 12-13/04

Dopo aver calcolato le correlazioni, si è voluto verificare che la relazione tra campo elettrico e radice della potenza fosse effettivamente lineare. Per fare questo si è utilizzato il programma libero R Studio, in cui sono state inserite le due sequenze di dati e disegnato l'andamento del campo rispetto alla radice della potenza. Per quanto riguarda il sito di Ivrea sono state eseguite le stesse operazioni anche per la sequenza del traffico nonostante non sia dimostrato che le due sequenze sono legate da una relazione lineare. Successivamente sono stati sovrapposti ai grafici ottenuti le rette che indicano l'andamento lineare. In ultimo si è calcolato, grazie al

metodo del *chi quadro ridotto*, quanto la distribuzione osservata fosse consistente con la distribuzione teorica lineare attesa.

I risultati di qualunque misura ripetuta possono essere raggruppati in intervalli,  $k=1, \dots, n$ . Sia  $O_k$  il numero di risultati osservati nell'intervallo  $k$ . Sia  $E_k$  il numero di risultati attesi nell'intervallo  $k$ , sull'ipotesi di qualche distribuzione assunta (Gauss, binomiale, Poisson, ecc). Il chi quadro è definito nel seguente modo:

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^n \frac{(O_k - E_k)^2}{E_k} \quad (8.3)$$

e il chi quadro ridotto è pari al  $\chi^2$  diviso per il numero di gradi di libertà (degree of freedom d.o.f.):

$$\frac{\chi^2}{d.o.f.} = \frac{\sum \frac{(y - \bar{y})^2}{\sigma^2}}{d.o.f.} \quad (8.4)$$

Se  $\chi^2 \gg 1$ , l'accordo tra  $O_k$  e  $E_k$  è cattivo e si deve rigettare la distribuzione assunta. Se  $\chi^2 \leq 1$ , l'accordo è soddisfacente e la distribuzione osservata è compatibile con quella attesa.

Nel nostro esempio, è stata utilizzata come sequenza indipendente  $y$  e la sequenza dei dati di campo elettrico e come sequenza dipendente quella della potenza; la sequenza  $\bar{y}$  è la sequenza delle misure di campo elettrico. Per quanto riguarda  $y$ , essa è stata calcolata nel modo seguente:

$$y = E = \alpha \sqrt{P} + \beta \quad (8.5)$$

dove i due coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  sono stati calcolati grazie al programma R e al posto di  $P$  è stata utilizzata la sequenza contenente i valori della potenza. A questo punto si è potuti calcolare  $y - \bar{y}$  sottraendo all'equazione appena descritta la sequenza di dati del campo elettrico ( $\bar{y}$ ).

Per quanto riguarda  $\sigma$ , essa è stata posta pari all'incertezza sulle misure di campo elettrico con la strumentazione usata, che è pari a 0.2445 ( $\pm 2.10$  dBi o 24.45%), per la media del vettore campo elettrico.

Il numero di gradi di libertà è stato posto pari al numero di misure meno i vincoli. In questo caso  $\alpha$  e  $\beta$  sono già decisi a priori e pertanto sono i vincoli della nostra relazione: il numero di gradi di libertà è stato posto, quindi, pari al numero di misurazioni meno 2.

Infine si è calcolata la probabilità che il chi quadro fosse maggiore del  $\chi_0$  trovato:  $P(\chi^2 \geq \tilde{\chi}_0^2)$ , ovvero la probabilità, in percentuale, di ottenere  $\chi^2$  grande quanto

l'osservato  $\chi_0^2$  se le misure hanno seguito realmente la distribuzione assunta. Se tale probabilità è grande, la distribuzione osservata e attesa sono consistenti; se è piccola sono probabilmente in disaccordo. In particolare se è inferiore al 5% si dice che il disaccordo è significativo e se è inferiore all'1% il disaccordo è chiamato altamente significativo.

Per ottenere i grafici e i calcoli descritti sono stati utilizzati alcuni script; di seguito viene riportato quello utilizzato per ottenere il grafico, relativo al sito dell'Amerique, dei dati mediati su un minuto:

```

tabella<-read.csv2("Amerique_1min.csv")
fit=lm(tabella$Campo~tabella$Potenza)
summary(fit)
plot(tabella$Potenza, tabella$Campo,xlab="Potenza",ylab="Campo",
main="Amerique_1min")
y=coefficients(fit)[2]*tabella$Potenza + coefficients(fit)[1]
lines(tabella$Potenza,y,col="red")
chi=sum((y-
tabella$Campo)^2)/((0.2445*mean(tabella$Campo))^2)/((length(tabella$
Campo))-2)
prob=(1-pchisq(chi*((length(tabella$Campo))-2),
((length(tabella$Campo))-2))) * 100

```

La funzione fit consente di calcolare la relazione lineare tra campo e radice della potenza: tramite la funzione summary(fit) è possibile conoscere alcuni parametri relativi alla relazione lineare, tra cui i coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  e la correlazione tra le due sequenze. Di seguito viene riportato un'esempio:

```

Summary(fit)

Call:
lm(formula = tabella$Campo ~ tabella$Potenza)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.59218 -0.08790 -0.01804  0.07770  0.66405

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    0.21862     0.01576   13.87  <2e-16 ***
tabella$Potenza 0.14392     0.00468   30.75  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1436 on 1519 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.3837,    Adjusted R-squared:  0.3833
F-statistic: 945.8 on 1 and 1519 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Il valore evidenziato in giallo rappresenta l'intercetta della funzione che lega campo e potenza (equazione 8.5), ovvero  $\beta$ , mentre il valore evidenziato in verde è l'  $\alpha$  di questo caso particolare. Nello script  $\alpha$  e  $\beta$  sono indicati come

`coefficients(fit)[2]` e `coefficients(fit)[1]` rispettivamente. Il valore evidenziato in azzurro è  $R^2$ , ovvero il quadrato della correlazione. Il valore coincide con quanto trovato con il programma Excel in quanto la radice quadrata di 0.3883 è pari a 0.62, che coincide con la correlazione trovata sulle sequenze `Amerique_1min`.

Le ultime due formule presenti nello script sono quelle utilizzate per calcolare il chi quadro ridotto e la probabilità  $P(\chi^2 \geq \widetilde{\chi}_0^2)$ .

Di seguito sono riportati alcuni tra i grafici ottenuti con R e i valori del chi quadro ridotto.

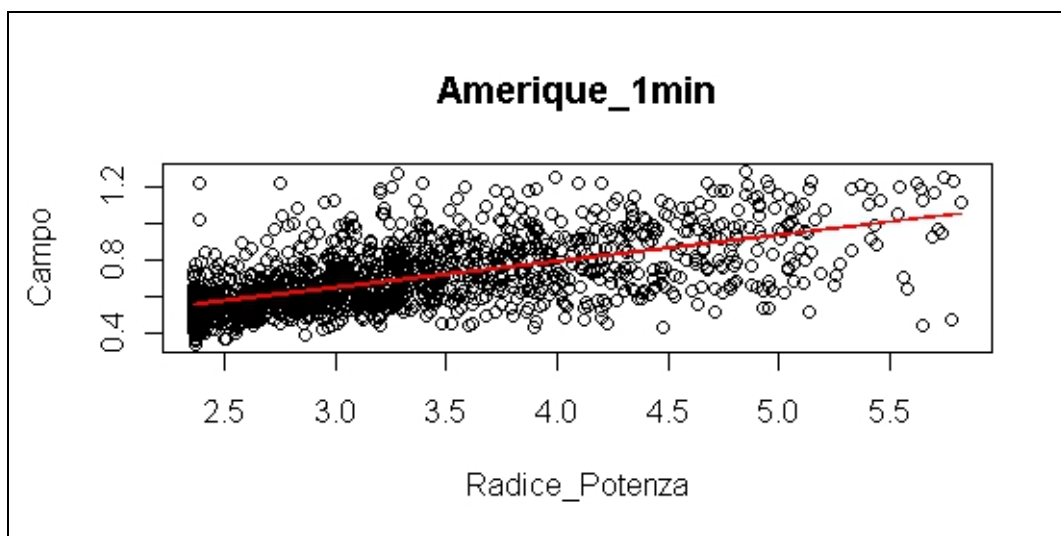


Figura 8.4.24 - Plot R - media 1 minuto – Amerique

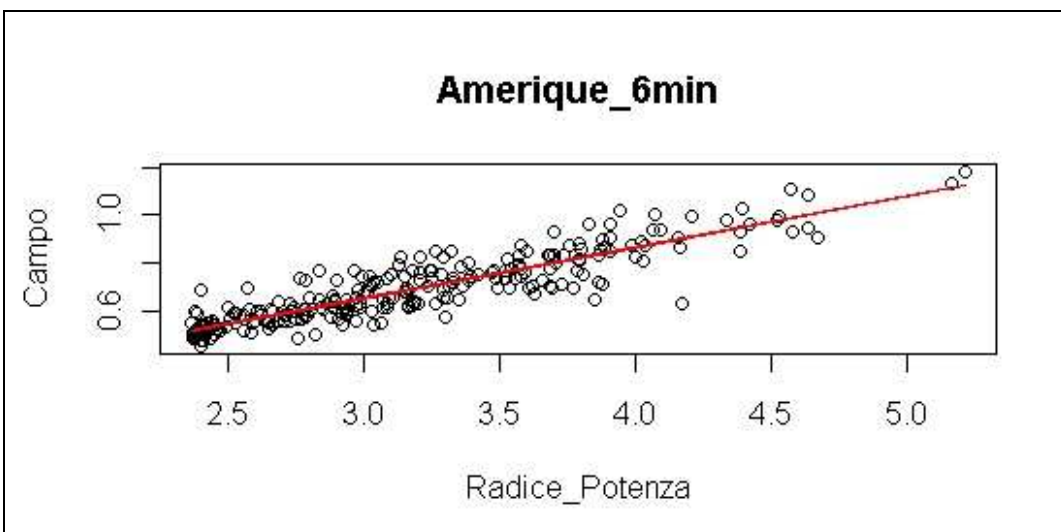


Figura 8.4.25 - Plot R - media 6 minuti - Amerique

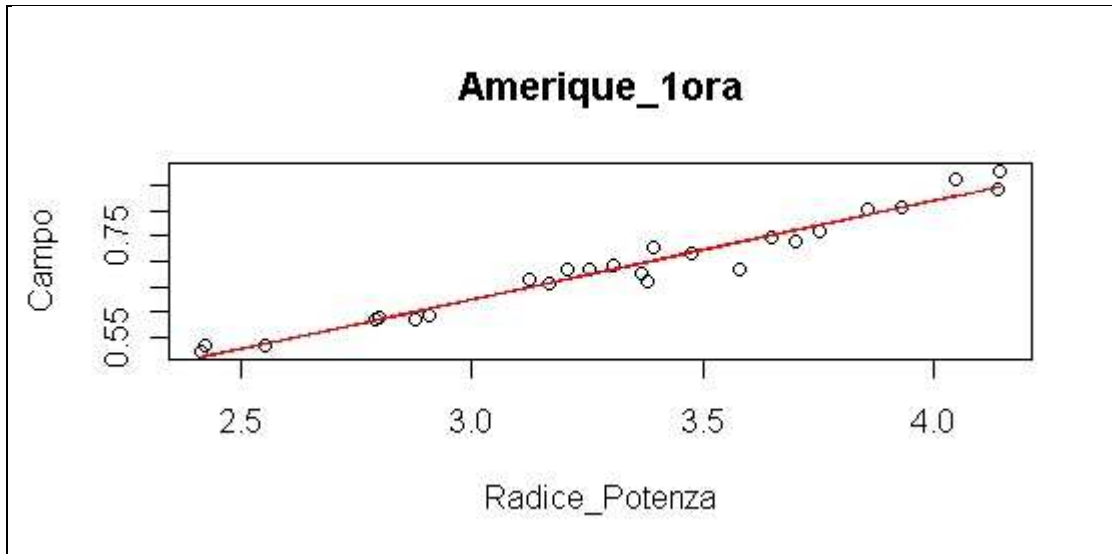


Figura 8.4.26 - Plot R - media oraria - Amerique

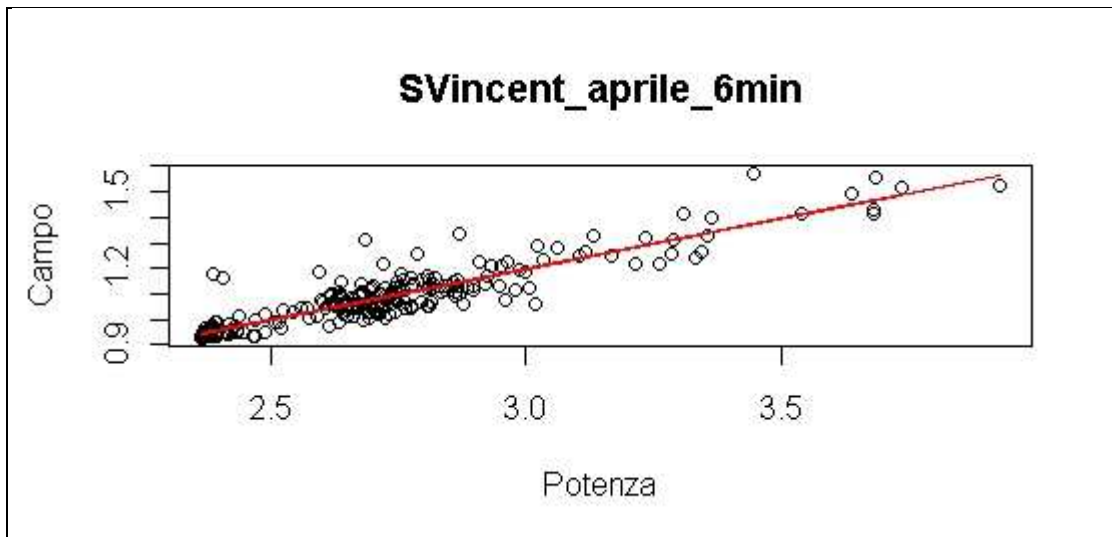


Figura 8.4.27 - Plot R - media 6 minuti - Saint Vincent\_12-13/04

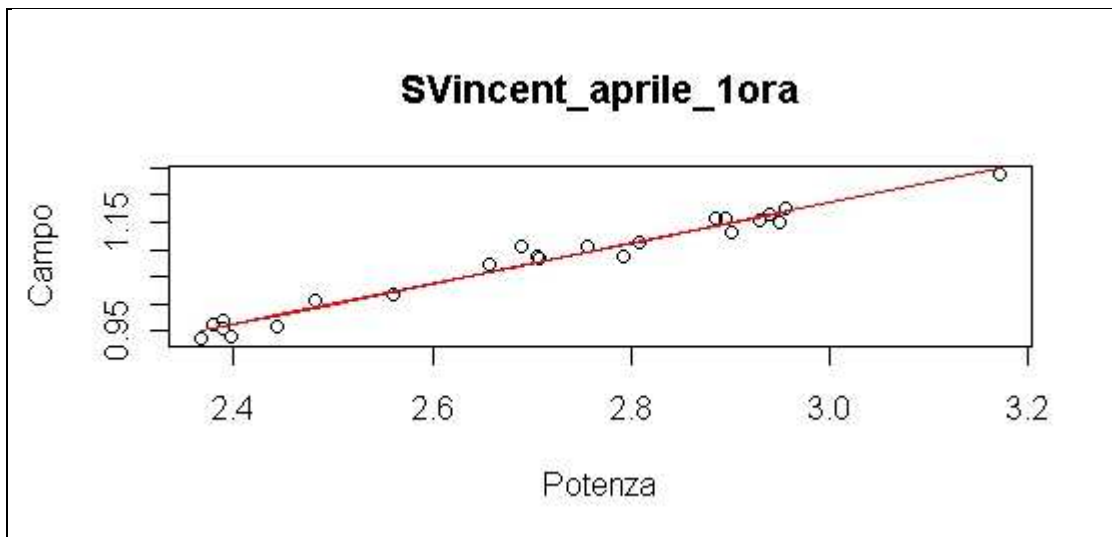


Figura 8.4.28 - Plot R - media oraria - Saint Vincent\_12-13/04

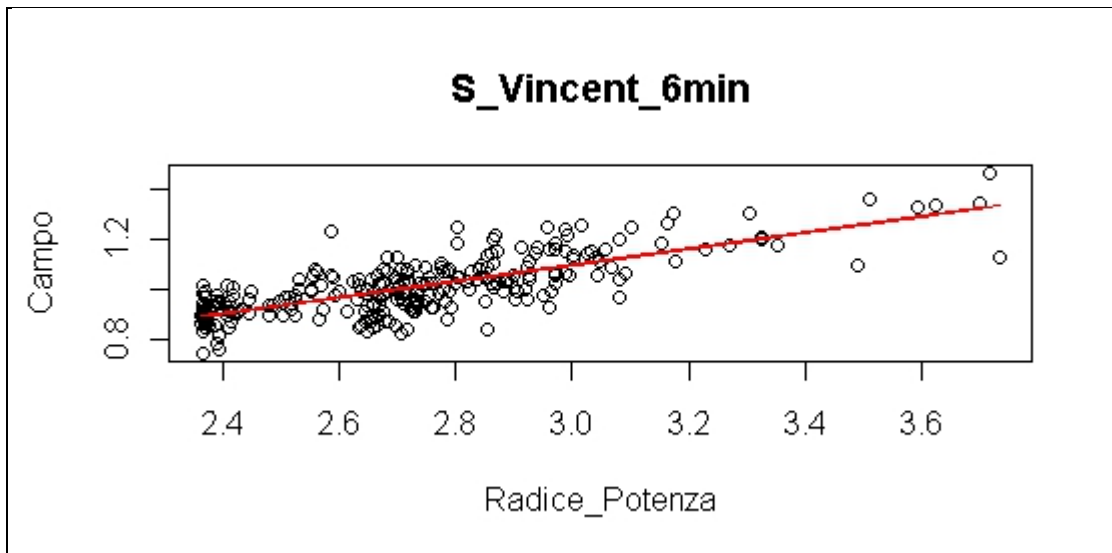


Figura 8.4.29 - Plot R – media 6 minuti - Saint Vincent\_13-14/06

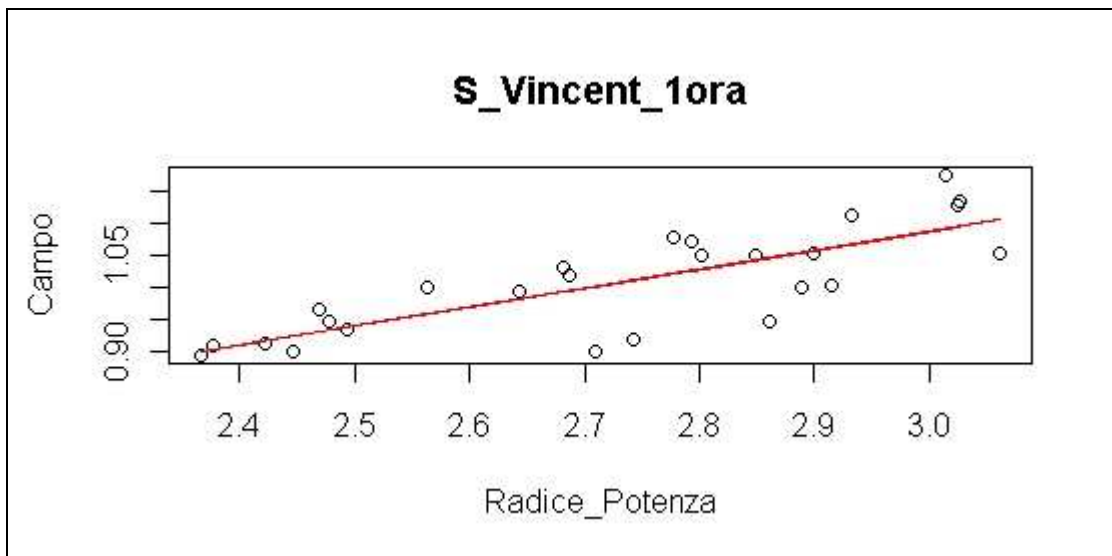


Figura 8.4.30 - Plot R – media oraria - Saint Vincent\_13-14/06

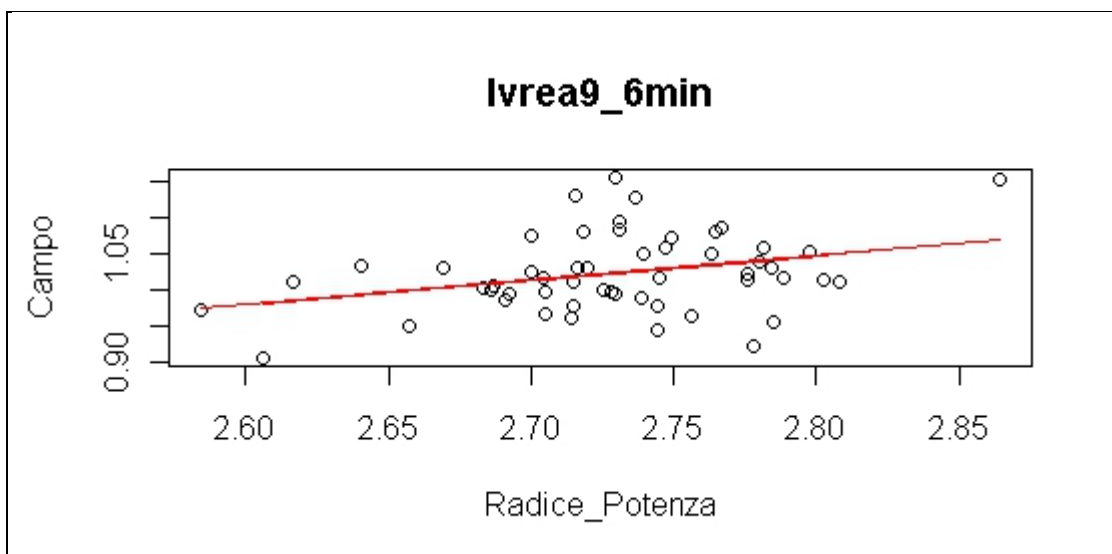


Figura 8.4.31 - Plot R - media 6 minuti - Ivrea\_09/06

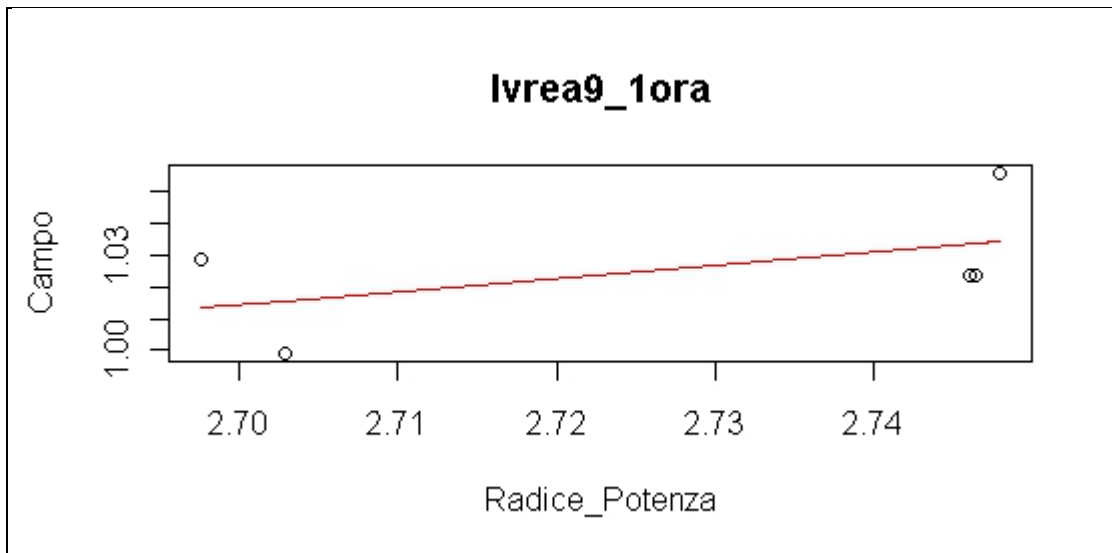


Figura 8.4.32 - Plot R - media oraria - Ivrea\_09/06

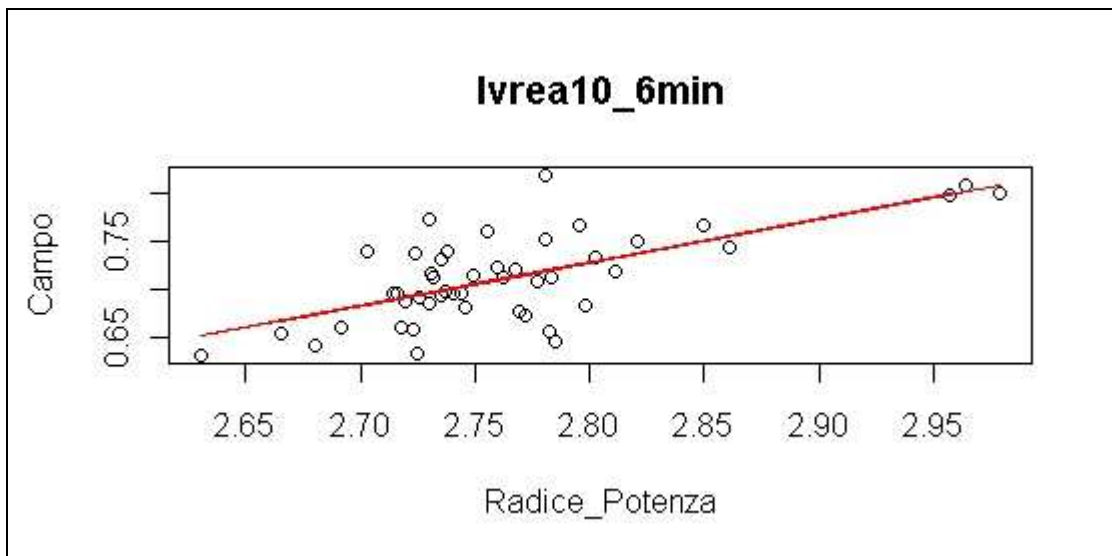


Figura 8.4.33 - Plot R - media 6 minuti - Ivrea\_10/06

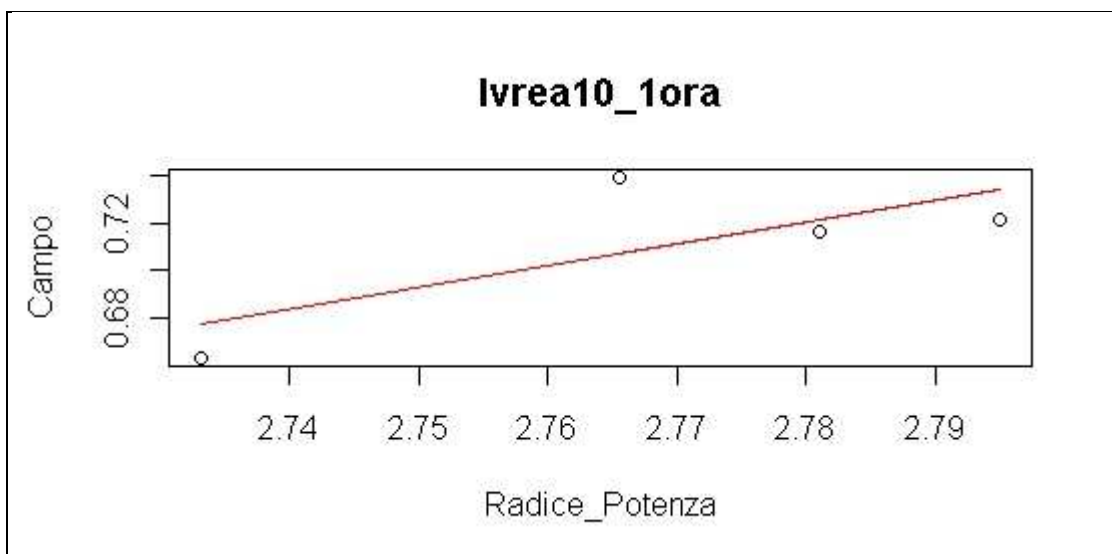


Figura 8.4.34 - Plot R - media oraria - Ivrea\_10/06

I valori del chi quadro ridotto relativo ai grafici presentati è riportato nella tabella sottostante (Tabella 8.2). Accanto ad ogni valore è stata inserita anche la probabilità di trovare, con due sequenze simili, un chi quadro superiore al valore calcolato  $P(\chi^2 \geq \tilde{\chi}_0^2)$ .

DATI	CHI QUADRO RIDOTTO	$P(\chi^2 \geq \tilde{\chi}_0^2)$
Amerique istantanei	2.398898	0%
Amerique 1 minuto	0.71492	100%
Amerique 6 minuti	0.1238106	100%
Amerique 10 minuti	0.06733816	100%
Amerique 15 minuti	0.04103271	100%
Amerique 30 minuti	0.01993377	100%
Amerique 1 ora	0.01202138	100%
Saint Vincent istantanei	1.847668	0%
Saint Vincent 1 minuto	0.4121695	100%
Saint Vincent 6 minuti	0.09880395	100%
Saint Vincent 10 minuti	0.06926564	100%
Saint Vincent 15 minuti	0.05532703	100%
Saint Vincent 30 minuti	0.04369998	100%
Saint Vincent 1 ora	0.03811725	100%
Ivrea9 istantanei	1.997096	0%
Ivrea9 1 minuto	0.3511884	100%
Ivrea9 6 minuti	0.04784323	100%
Ivrea9 10 minuti	0.02372115	100%
Ivrea9 15 minuti	0.01420199	100%
Ivrea9 30 minuti	0.006866803	100%
Ivrea9 1 ora	0.002372817	100%
Ivrea10 istantanei	1.11327	0.06665669%
Ivrea10 1 minuto	0.2105715	100%
Ivrea10 6 minuti	0.03986131	100%
Ivrea10 10 minuti	0.02901328	100%
Ivrea10 15 minuti	0.02373859	100%
Ivrea10 30 minuti	0.0148194	100%
Ivrea10 1 ora	0.007762879	100%
S Vincent12 1 minuto	0.3891817	100%
S Vincent12 6 minuti	0.06324416	100%
S Vincent12 10 minuti	0.03574569	100%
S Vincent12 15 minuti	0.02162257	100%
S Vincent12 30 minuti	0.009220206	100%
S Vincent12 1 ora	0.004527619	100%

**Tabella 8.2 – Valori chi quadro ridotto Campo Elettrico - Potenza**

Come si vede dalla tabella 8.2, per quanto riguarda i valori istantanei di tutti i siti presi in considerazione, tranne le prime misure eseguite a Saint Vincent, il valore del chi quadro è superiore a 1. Come detto precedentemente questo sta a significare che le due sequenze di valori non sono del tutto linearmente proporzionali come invece dovrebbero essere teoricamente. Se andiamo a calcolare la probabilità di



trovare un chi quadro superiore al valore indicato, tale probabilità è pari a 0, in quanto il valore è già nettamente superiore a 1 e pertanto non vi è probabilità di trovare un valore peggiore. Per i dati istantanei questo è un risultato congruo con quanto ci si aspettava poiché le variazioni di potenza non vengono tutte rilevate dal campo, soprattutto quelle minime, e pertanto le due sequenze non sono del tutto correlate, come dimostrato anche dalla tabella che riporta i valori di correlazione. Per quanto riguarda tutte le altre sequenze prese in considerazione, ovvero relative a tutte le medie effettuate, esse hanno un valore del chi quadro inferiore a 1. Ciò è positivo, in quanto significa che le due sequenze implementano bene una relazione lineare. Inoltre, la probabilità P è sempre molto alta, nella maggior parte dei casi pari al 100%. Questo indica che non si poteva ottenere un valore migliore in quanto vi è la probabilità del 100% di trovare, con due sequenze simili a quelle utilizzate, un valore del chi quadro superiore, ovvero peggiore.

Per quanto riguarda il sito di Ivrea si è provato a verificare la relazione tra campo elettrico e traffico; si riportano alcuni grafici. Nella tabella 8.3 vengono riportati i valori del chi quadro e della probabilità P.

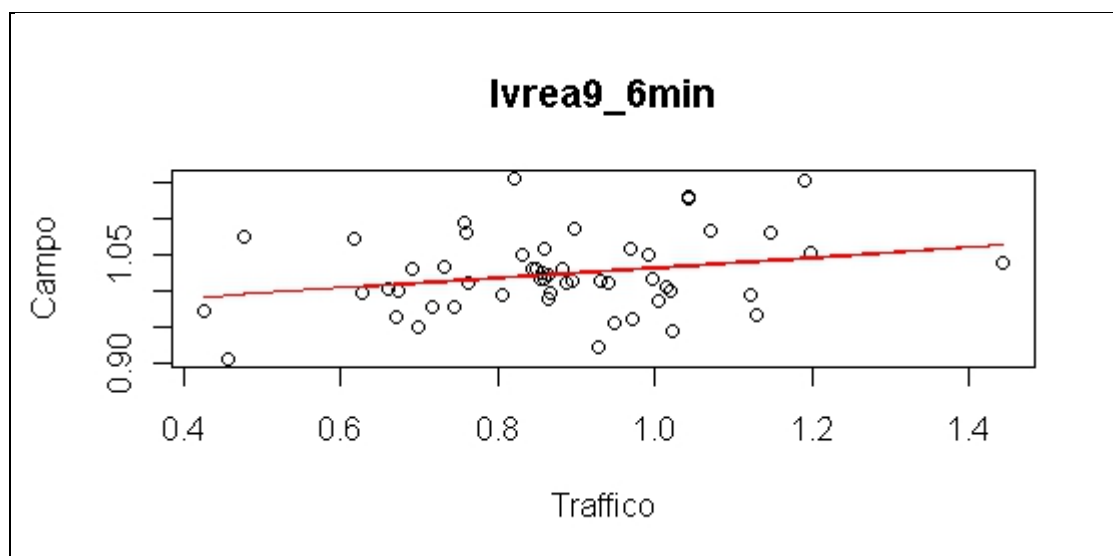


Figura 8.4.35 - Plot R - Campo\_Traffico- media 6 minuti - Ivrea\_09/06

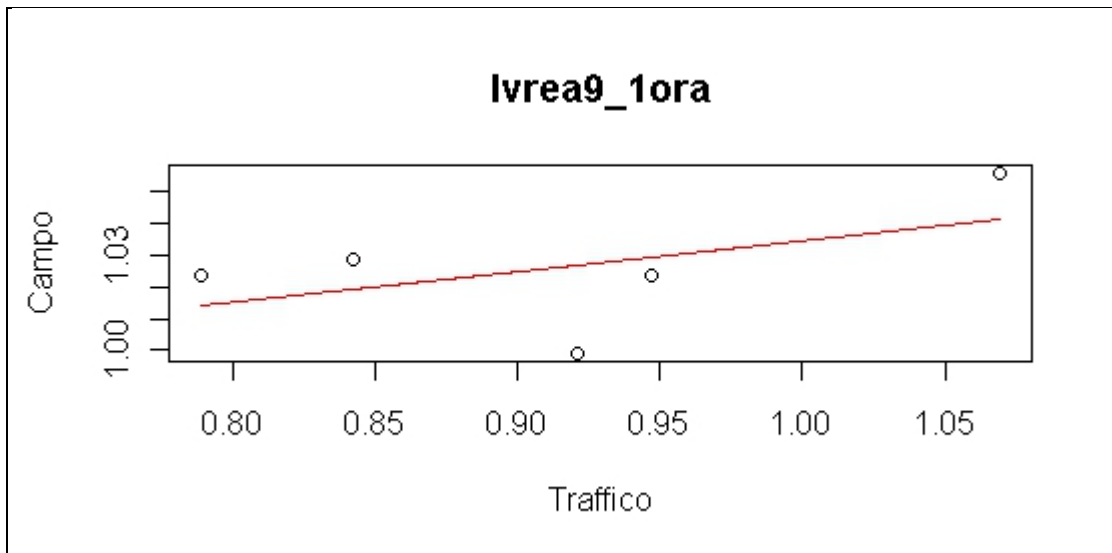


Figura 8.4.36 - Plot R - Campo\_Traffico- media oraria - Ivrea\_09/06

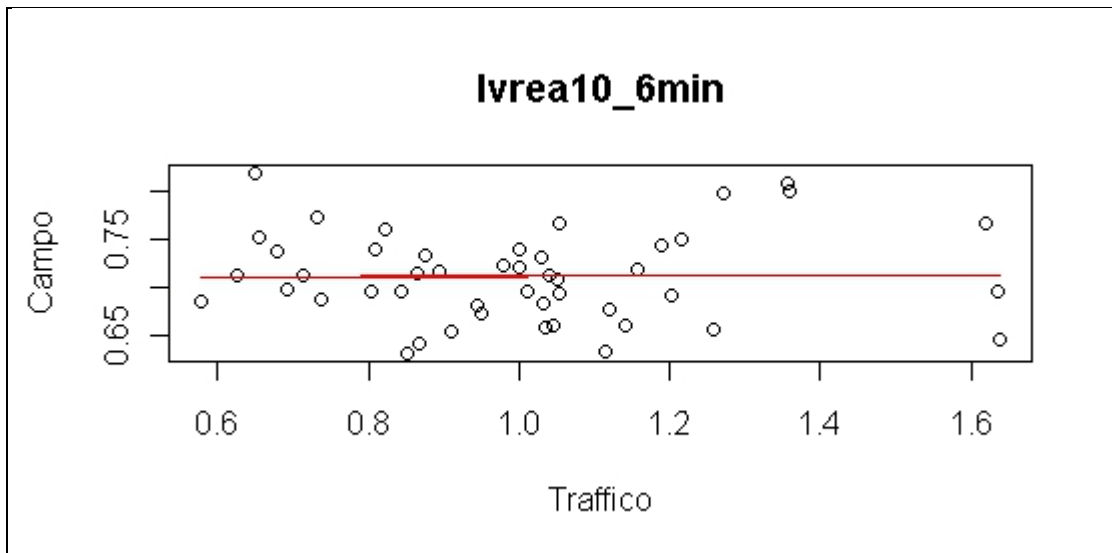


Figura 8.4.37 - Plot R - Campo\_Traffico- media 6 minuti - Ivrea\_10/06

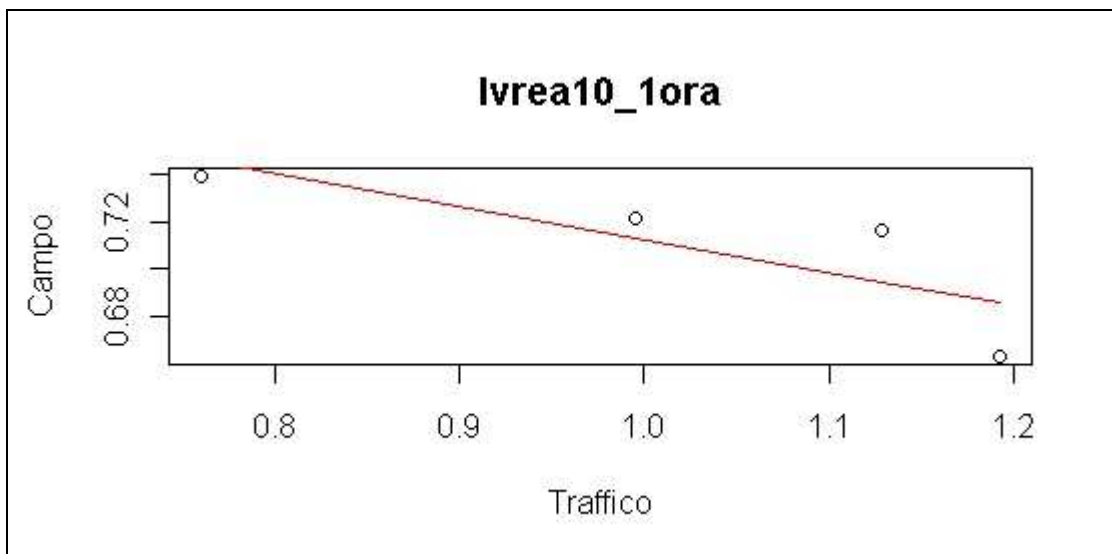


Figura 8.4.38 - Plot R - Campo\_Traffico- media oraria - Ivrea\_10/06

DATI	CHI QUADRO RIDOTTO	$P(\chi^2 \geq \bar{\chi}_0^2)$
Ivrea9 istantanei	1.997228	0%
Ivrea9 1 minuto	0.3502529	100%
Ivrea9 6 minuti	0.05025019	100%
Ivrea9 10 minuti	0.02650691	100%
Ivrea9 15 minuti	0.01593067	100%
Ivrea9 30 minuti	0.007197618	100%
Ivrea9 1 ora	0.002526867	100%
Ivrea10 istantanei	1.115231	0.05527964%
Ivrea10 1 minuto	0.216507	100%
Ivrea10 6 minuti	0.06429116	100%
Ivrea10 10 minuti	0.04980947	100%
Ivrea10 15 minuti	0.03944024	100%
Ivrea10 30 minuti	0.02346565	100%
Ivrea10 1 ora	0.01295181	100%

**Tabella 8.3 Valori chi quadro ridotto Campo Elettrico - Traffico**

Negli ultimi tre grafici (Figure 8.4.36 – 8.4.37 – 8.4.38) è evidente che la retta è direzionata dalla parte opposta rispetto a tutte le altre: questo è dovuto al fatto che le due sequenze hanno comportamenti opposti, proprio come si vede tramite la correlazione che risulta negativa. Anche in questo caso i valori del chi quadro sono molto buoni per le sequenze mediate mentre sono maggiori di 1 per le sequenze di valori istantanei.

Un secondo tipo di elaborazione è stato eseguito prendendo in considerazione il fatto che a 6 minuti le correlazioni tra campo elettrico e traffico sono già buone. Con questa seconda elaborazione, si voleva provare a trovare dei coefficienti da applicare alle simulazioni per ottenere dei risultati più realistici. Tutto ciò è stato fatto utilizzando nelle simulazioni, al posto della potenza massima dichiarata, la massima tra le potenze mediate su 6 minuti e andando a verificare se il valore di campo elettrico in uscita dal simulatore avesse un valore maggiore delle misure eseguite. In caso positivo si potrebbe affermare che è sufficiente utilizzare la massima tra le potenze mediate su 6 minuti per eseguire una simulazione comunque cautelativa. Purtroppo il numero esiguo di misure effettuate e la diversità tecnica tra i vari siti ha fatto sì che i risultati siano stati differenti per ogni sito preso in esame.

Per il sito di Quart che utilizza una sola portante e la cui massima media su 6 minuti si è rivelata essere circa il 75% della potenza massima dichiarata, il valore di campo

elettrico ottenuto dalla simulazione era effettivamente superiore a tutte le misure eseguite durante la sessione di misura. La Figura 8.4.39 sottostante riporta il grafico per tale sito contenente le misure eseguite (la curva in blu), il valore di portante (linea rossa), il valore di campo ottenuto utilizzando nella simulazione il valore massimo di potenza dichiarato in fase di progetto (linea verde), il valore di campo elettrico ottenuto utilizzando il valore massimo tra le potenze mediate su 6 minuti (linea azzurra) e il valore medio tra le potenze mediate su 6 minuti (linea viola).

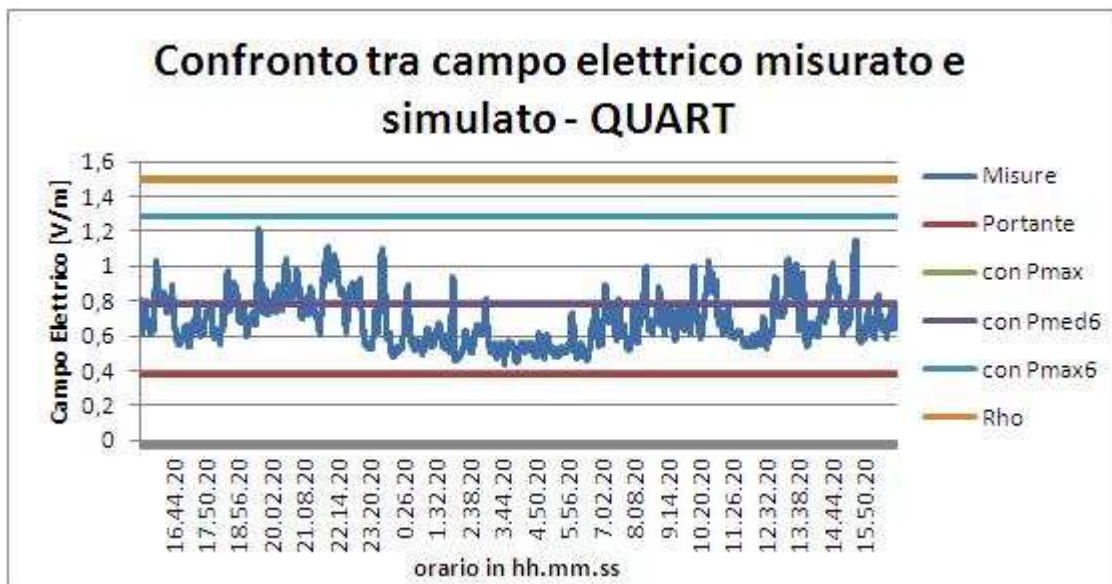


Figura 8.4.39 - Confronto tra campo elettrico misurato e simulato - sito QUART

E' stato inoltre calcolato il valore di campo massimo utilizzando la formula del  $\rho$ , riportata sulla norma CEI 211-10, che lega la potenza della portante alla potenza massima emessa. L'operatore ha fornito il valore del  $\rho$  corretto ed è stato possibile ricavare la linea arancione.

$$\rho = \frac{E_{portante}}{E_{massimo}} = \frac{\sqrt{P_{portante}}}{\sqrt{P_{massima}}} \quad (8.6)$$

In tal caso, quindi,

$$P_{massima} = \frac{P_{portante}}{\sqrt{\rho}} \quad (8.7)$$

Per il sito di Saint Vincent, dove le portanti sono due e gestiscono separatamente traffico voce e traffico dati, il risultato è stato differente, in quanto il valore di campo ottenuto dalle simulazioni con la massima tra le potenze mediate su 6 minuti è inferiore ad alcuni valori misurati. La potenza massima tra le medie su 6 minuti è risultata essere intorno al 40% del valore massimo dichiarato. Tale comportamento si ripete analogo per entrambe le misure effettuate.

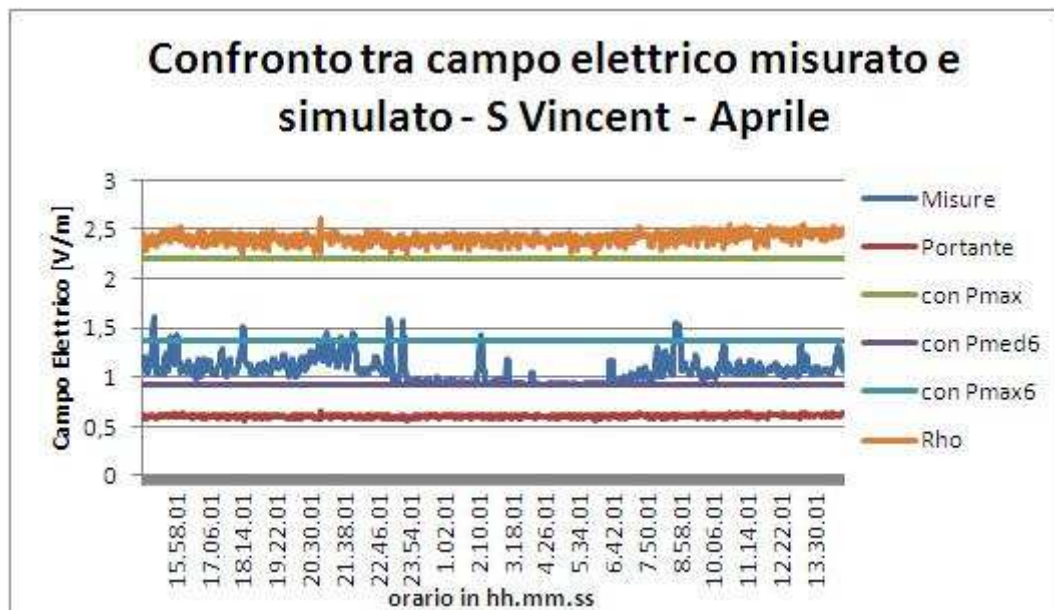


Figura 8.4.40 - Confronto tra Campo Elettrico misurato e simulato - sito SAINT VINCENT - misure APRILE

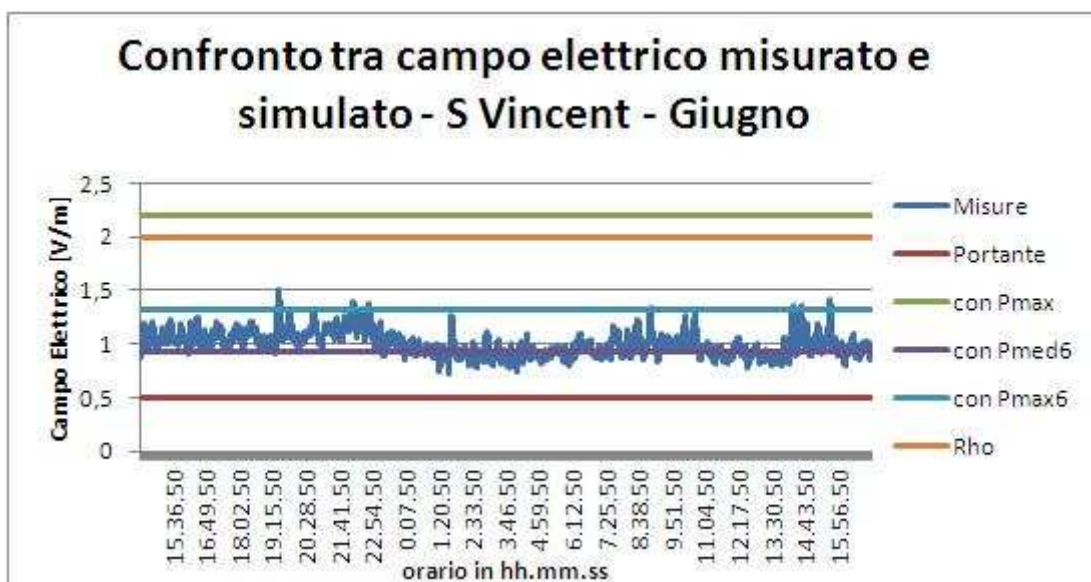


Figura 8.4.41 - Confronto tra Campo Elettrico misurato e simulato - sito SAINT VINCENT - misure GIUGNO

Si nota che, per entrambi i grafici (Figure 8.4.40 e 8.4.41), la linea azzurra interseca la curva delle misure e pertanto il valore ottenuto dalle simulazioni è inferiore ai massimi valori misurati.

Infine, per quanto riguarda il sito di Ivrea, esso ha un comportamento differente rispetto ai primi due; la massima tra le potenze mediate sui 6 minuti risulta essere solo il 20 % della potenza massima dichiarata e le due sessioni di misura danno due risultati discostanti.



Figura 8.4.42 - Confronto tra Campo Elettrico misurato e simulato - sito IVREA - primo giorno



Figura 8.4.43 - Confronto tra Campo Elettrico misurato e simulato - sito IVREA - secondo giorno

Come si nota dalle due Figure 8.4.42 e 8.4.43, elaborando i dati del primo giorno di misura si è ottenuto un risultato analogo a quello del sito di Quart, con la linea azzurra totalmente al di sopra delle misure, mentre il risultato non è più così per i dati relativi alla sessione di misura del secondo giorno. Tale discordanza tra i due giorni di misura di Ivrea erano già state notate per quanto riguarda le correlazioni, che erano differenti tra i due giorni. Inoltre il numero di valori utilizzati è estremamente ridotto rispetto a quello degli altri siti. Notiamo anche che all'aumentare del rapporto tra il massimo tra le potenze mediate su 6 minuti e la potenza massima dichiarata i risultati peggiorano, mentre risultano molto buoni per

il sito di Quart in cui la massima tra le potenze mediate su 6 minuti è addirittura il 75% della potenza massima dichiarata in fase di progetto.

Se il sito in esame è particolarmente utilizzato, in quanto la massima tra le potenze misurate e mediate su 6 minuti si avvicina molto alla potenza massima, il nostro intento di poter utilizzare tale potenza mediata su 6 minuti al posto della potenza massima nelle simulazioni sembra poter essere possibile. Nei casi in cui, invece, tale potenza massima tra le medie risulti particolarmente distante dalla potenza massima dichiarata, sembra non essere possibile l'esecuzione di tale procedura.

## 9. Conclusioni

---

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è stato verificare la possibilità di trovare un fattore di riduzione da applicare alla potenza utilizzata nelle simulazioni teoriche eseguite per una Stazione Radio Base (SRB) funzionante con la tecnologia UMTS, per avere una visione più realistica dell'impatto elettromagnetico che tale impianto può provocare sull'ambiente circostante. Il lavoro è stato effettuato in collaborazione con l'operatore Vodafone.

L'ipotesi di lavoro era quella di trovare tali fattori di riduzione andando a esaminare il legame presente tra traffico, potenza irradiata e campo misurato in siti di tipologia differente. Si pensava di poter categorizzare vari siti in base a caratteristiche geografiche comuni (sito rurale, commerciale, residenziale, ecc). Sono state eseguite diverse misure di campo elettrico in ambiente per periodi di tempo piuttosto lunghi. Il fattore meteorologico ha influito sulla scelta delle date di misura in quanto lo strumento non può effettuare misurazioni corrette se piove e pertanto, dovendo lasciare lo strumento a monitorare in continuo anche durante la notte, bisognava essere sicuri che lo strumento non si bagnasse. Inoltre, è stato necessario, per l'esecuzione di più sessioni di misura, posizionare lo strumento presso un appartamento; la possibilità di eseguire misurazioni in abitazioni private non è sempre scontata, ma è necessaria una forte collaborazione con la popolazione. Durante l'allestimento del banco di misura e l'esecuzione delle misure di campo elettrico bisogna prestare massima attenzione in quanto, come descritto nel capitolo 6, vi è tutta una serie di regole da seguire per non rischiare di invalidare i dati trovati.

La scelta dei siti di misura non è stata facile in quanto il sito ottimale doveva possedere diverse caratteristiche, tra le quali la presenza di una SRB dell'operatore Vodafone utilizzante la tecnologia UMTS, la possibilità di raggiungere il lobo principale dell'antenna con la sonda dello strumento, la possibilità di avere accesso alla rete elettrica, e altro ancora. Dopo aver preso in considerazione tutti i siti presenti sul territorio valdostano, la scelta è ricaduta su due siti, Saint Vincent e Quart, cui si è aggiunto un ulteriore sito, presso la sede Vodafone di Ivrea.



Tutti e tre i siti hanno caratteristiche tecniche e urbanistiche diverse tra loro: il sito di Quart è posizionato in una zona prevalentemente commerciale e di uffici, è presente una SRB composta da tre settori e ogni settore lavora su una sola portante in grado di gestire sia il traffico voce sia il traffico dati. Il sito di Saint Vincent è posto al centro della cittadina, pertanto rappresenta un sito residenziale, in cui è presente una SRB composta da tre settori ognuno dei quali lavora su due portanti, una dedicata al traffico voce e una dedicata al traffico dati. Infine, il sito di Ivrea è posto in una zona industriale – commerciale ed è costituito da una SRB composta da due settori che utilizzano ciascuno due portanti entrambe in grado di gestire sia il traffico voce che il traffico dati. Prima dell'esecuzione delle misure vere e proprie sono state effettuate misure e simulazioni preventive per poter meglio comprendere l'andamento del campo nell'intorno del sito considerato e per poter scegliere il punto migliore di misura.

Le misure sono state effettuate con lo strumento NARDA SRM3000, un analizzatore di spettro messo a disposizione da ARPA Valle d'Aosta. Al fine di acquisire i dati su un periodo lungo è stato necessario predisporre un programma di controllo dello strumento via PC. Il software, sviluppato in linguaggio Microsoft Visual Basic, consente di comunicare con lo strumento tramite seriale, andando a selezionare il metodo di misura voluto, la frequenza centrale e l'ampiezza di banda sul quale effettuare le misure, selezionare i principali parametri che possono servire per un'accurata esecuzione della rilevazione e resta in dotazione dell'ARPA per eventuali altre misure.

Basandosi su quanto viene richiesto dalla normativa nazionale e sull'esperienza acquisita da ARPA Valle d'Aosta, sono state eseguite le prime misure sulla portante radio del segnale, selezionata mediante la misura dello scrambling code. Tale misura, registrando l'andamento temporale della sola portante sempre attiva, fornisce in uscita dei valori quasi stabili, poco correlabili con l'andamento del traffico ma immagazzina comunque anche l'integrale del segnale totale. Grazie a tale metodologia si è potuto verificare che la portante è sempre accesa e che l'antenna eroga al minimo sempre una potenza pari a 35 dBm, utilizzata per le varie esigenze di controllo della rete. Nelle misure successive è stata variata la metodologia, andando a misurare direttamente l'integrazione sull'intera banda del segnale. L'intervallo di misura è stato posto pari a 10 secondi, così scelto poiché

l'operatore è in grado di fornire i dati di potenza e di traffico a intervalli compresi tra 3 e 5 secondi, in maniera del tutto casuale. I dati di traffico vengono forniti in Erlang mentre i dati di potenza in dBm, successivamente trasformati in W per l'esecuzione delle elaborazioni.

Campo elettrico e potenza sono legati da una relazione quadratica; nelle elaborazioni sono state messe in relazione il campo elettrico e la radice quadrata della potenza. La verifica della presenza delle correlazioni è stata eseguita sui dati istantanei e su sequenze mediate su 1, 6, 10, 15, 30 e 60 minuti. Per effettuare tali elaborazioni sono state create diverse macro in Excel.

Nella tabella 9.1 sottostante sono riportate le correlazioni trovate per ogni sequenza di dati.

<b>CORR E - P</b>	<b>ISTANTAN EI</b>	<b>1 MIN</b>	<b>6 MIN</b>	<b>10 MIN</b>	<b>15 MIN</b>	<b>30 MIN</b>	<b>1 ORA</b>
Ivrea 09/06	0,012	0,068	0,319	0,432	0,494	0,482	0,483
Ivrea 10/06	0,052	0,167	0,617	0,649	0,647	0,692	0,769
S. Vincent Aprile	0,494	--	0,855	0,904	0,933	0,964	0,980
S. Vincent Giugno	0,183	0,427	0,740	0,777	0,794	0,808	0,810
Quart 13-14/06	0,346	0,617	0,908	0,943	0,961	0,977	0,983

**Tabella 9.1: Correlazioni tra dati di Potenza e Campo Elettrico**

Le correlazioni aumentano all'aumentare del tempo sul quale si media. I tre siti, come già detto, hanno tutti caratteristiche tecniche differenti: si notano comportamenti differenti anche per quanto riguarda l'andamento delle correlazioni. Il sito di Ivrea, inoltre, non ha misure prolungate superiori a 5-6 ore, pertanto la correlazione è eseguita su un minor numero di dati e questo fa sì che tali risultati non siano direttamente confrontabili con i risultati degli altri siti. Il sito di Quart è il sito che fornisce le correlazioni migliori; questo si presume sia dovuto al fatto che il sito utilizza una sola portante che gestisce tutto il traffico. In questo modo tutta la potenza è sicuramente gestita da tale portante.

L'osservazione dei risultati ottenuti porta ad alcune considerazioni:

- Misure effettuate nello stesso sito in giorni diversi portano a risultati differenti e le motivazioni di tali differenze possono essere varie: il tipo di traffico gestito dall'antenna, il giorno della settimana in cui si esegue la misura, le condizioni atmosferiche di temperatura ed umidità, ecc.
- Per ottenere correlazioni accettabili tra campo elettrico e potenza, le misure devono essere eseguite per un numero di ore elevato, almeno 24 ore, ed è importante includere nel periodo di misura le ore notturne in cui il segnale rimane più costante.
- Le correlazioni, per tutti i siti, cominciano ad essere significative quando si media su un periodo di 6 minuti; questo risultato è significativo in quanto 6 minuti è il periodo di tempo imposto dalla normativa italiana per l'esecuzione delle misure a RF.

<b>CORR E - T</b>	<b>IST</b>	<b>1 MIN</b>	<b>6 MIN</b>	<b>10 MIN</b>	<b>15 MIN</b>	<b>30 MIN</b>	<b>1 ORA</b>
Ivrea 09/06	0,008	0,085	0,238	0,301	0,390	0,442	0,428
Ivrea 10/06	0,031	0,024	0,021	- 0,073	- 0,185	- 0,417	- 0,563
S. Vincent Aprile	0,112	--	0,287	0,322	0,331	0,315	0,633
S. Vincent Giugno	0,080	0,212	0,491	0,562	0,609	0,663	0,526
Quart 13- 14/06	0,163	0,305	0,429	0,470	0,502	0,575	0,584

**Tabella 9.2: Correlazioni tra dati di Traffico e Campo Elettrico**

Sono state eseguite le stesse elaborazioni anche sui dati di traffico. I valori sono riportati nella tabella 9.2. Purtroppo, a causa di problemi dell'operatore nell'acquisizione di questo tipo di dati, non è stato possibile avere a disposizione tutti i valori istantanei di traffico per i vari siti, ma sono stati forniti solo per alcune ore. Il sito di Ivrea è l'unico ad avere il set di dati completo. Pertanto, solo le due

righe riferite alle misure effettuate presso il sito di Ivrea rappresentano risultati di correlazione tra traffico e campo elettrico sull'intero periodo di misura. I risultati delle elaborazioni non hanno evidenziato correlazione tra campo elettrico e traffico, sicuramente per lo scarso numero di dati a disposizione. Inoltre, non esiste una definita relazione che lega il campo elettrico al traffico, nonostante la potenza emessa dall'antenna sia generata per gestire tale traffico. Infatti, può accadere che un utente molto vicino alla SRB generi molto traffico ma richieda poca potenza e che un altro utente che si trova ai confini della cella richieda molta più potenza per generare lo stesso quantitativo di traffico. Inoltre, è importante anche il tipo di traffico, in quanto il traffico voce è sicuramente diverso dal traffico dati, di tipo spot e con ampiezze decisamente inferiori.

Avendo a disposizione più siti di misura e i dati di traffico in modo completo, contenenti anche i dati relativi alle ore notturne, sicuramente sarebbe possibile eseguire una elaborazione più corretta e valutare in quali casi potrebbe sussistere una eventuale correlazione tra le due grandezze.

Considerando che a 6 minuti le correlazioni tra campo elettrico e potenza sono già buone, si è provato a vedere se, utilizzando come potenza di simulazione la massima ricavata dalle medie ogni 6 minuti, il risultato dell'elaborazione teorica forniva un valore sempre maggiore rispetto ai valori ricavati dalle singole medie ogni 6 minuti dei dati di campo elettrico misurato. Inoltre, si sono simulati i valori di campo elettrico anche utilizzando la media tra valori di potenza mediati su 6 minuti e la massima potenza dichiarata dall'operatore in fase di progetto, per metterli tutti a confronto. Per ogni sessione di misura si riportano i risultati ottenuti da tutte queste elaborazioni in un grafico unico.

Nei grafici sottostanti (Figure da 9.1 a 9.5), per ogni sito di misura, sono riportate le seguenti grandezze, tutte espresse in V/m:

- La curva delle misure di campo elettrico eseguite ogni 10 secondi è indicata in blu;

- La curva (per il caso di Saint Vincent, in quanto è stata misurata) o la retta (se ricavata come il minimo dei valori misurati) indicante la portante sempre accesa è indicata con il colore rosso;
- Il valore di campo elettrico ottenuto dalla simulazione teorica utilizzando come potenza il massimo valore tra le potenze mediate ogni 6 minuti è indicato in colore azzurro;
- Il valore di campo elettrico ottenuto utilizzando nella simulazione il valore massimo di potenza dichiarato dall'operatore in fase di progetto è indicato con una linea di colore verde;
- Il valore di campo elettrico ottenuto dalla simulazione teorica utilizzando come potenza la media tra i valori di potenza mediati su 6 minuti è indicata nei grafici con la linea di colore viola;
- Il valore massimo di campo elettrico raggiungibile dalla SRB, calcolato come indicato nella formula 9.2, è presente nei grafici con una linea di colore arancione. Se il calcolo è eseguito nel modo corretto, tale linea dovrebbe sovrapporsi alla linea di colore verde.

Il valore di campo elettrico massimo raggiungibile è stato calcolato utilizzando la formula del  $\rho$ , riportata sulla norma CEI 211-10, che lega la potenza della portante alla potenza massima emessa. L'operatore ha fornito il valore del  $\rho$  corretto ed è stato possibile ricavare la linea arancione.

$$\rho = \frac{P_{portante}}{P_{massima}} = \frac{E_{portante}^2}{E_{massimo}^2} \quad (9.1)$$

In tal caso, quindi,

$$E_{massimo} = \frac{E_{portante}}{\sqrt{\rho}} \quad (9.2)$$

Per il sito di Quart (vedi Figura 9.1), che utilizza una sola portante, il valore di campo elettrico ottenuto dalla simulazione è superiore a tutte le misure eseguite durante la sessione di misura.

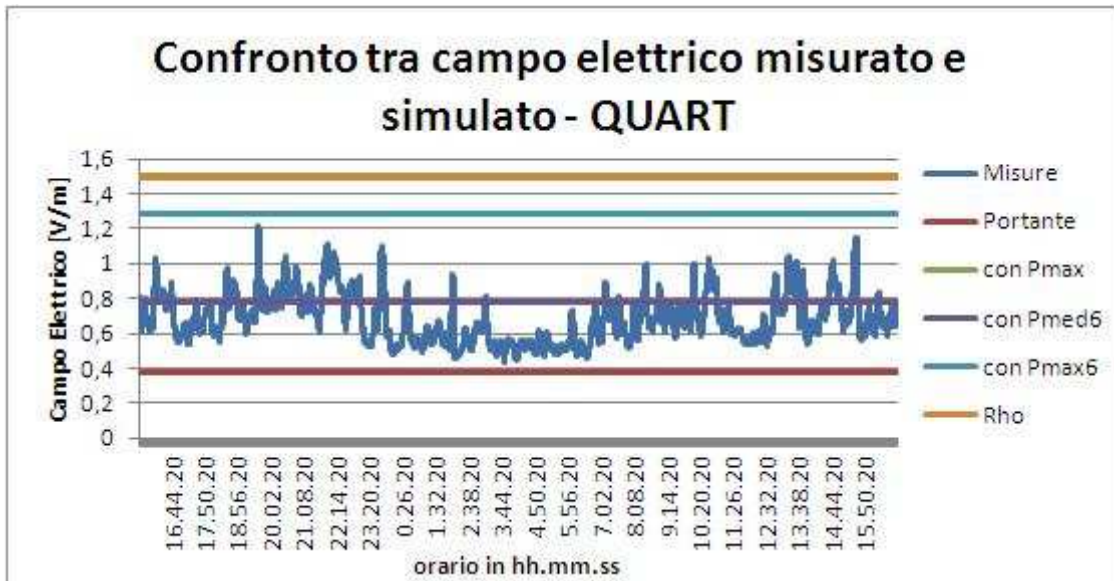


Figura 9.1 - Confronto campo misurato e simulato – sito QUART – 20\_21/06

Per il sito di Saint Vincent, dove le portanti sono due e gestiscono ognuna o traffico voce o traffico dati, il valore di campo ottenuto dalle simulazioni con la massima tra le potenze mediate su 6 minuti è inferiore al massimo valore misurato. Tale comportamento si ripete analogo per entrambe le misure, vedere Figure 9.2 e 9.3.

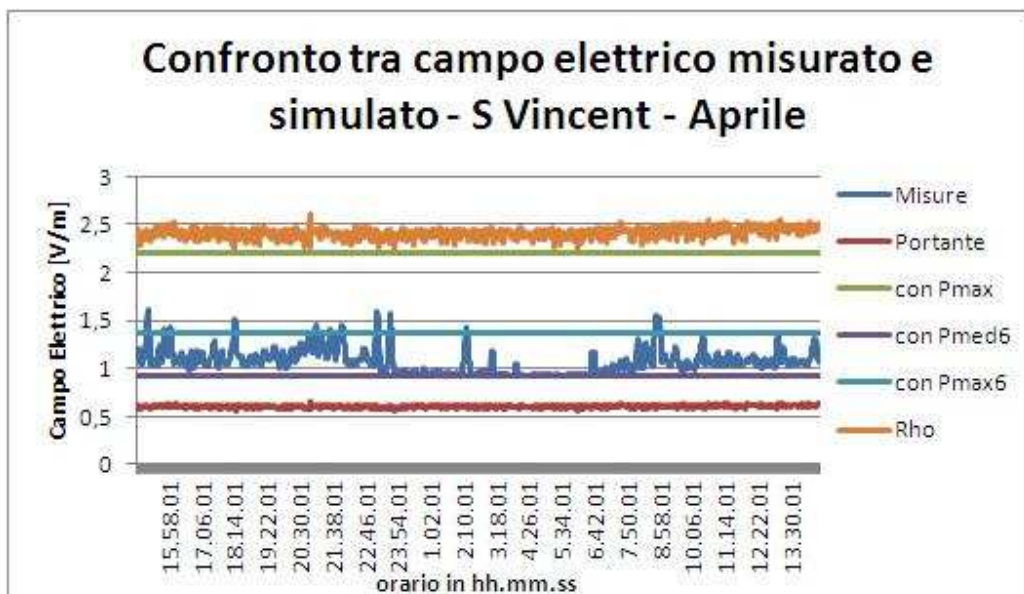


Figura 9.2 - Confronto campo misurato e simulato - sito SAINT VINCENT – 11\_12/04

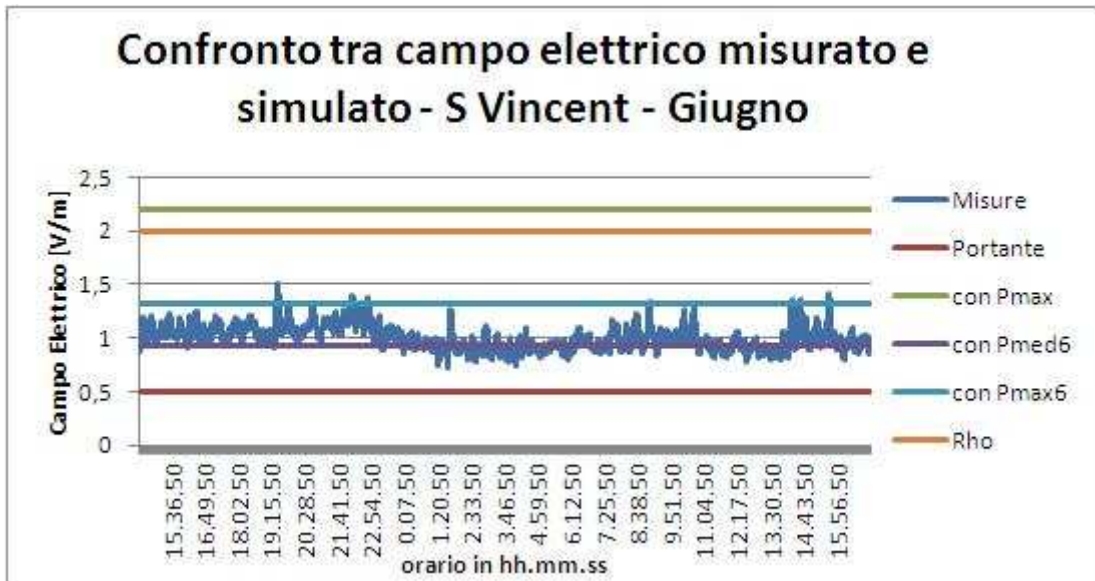


Figura 9.3 - Confronto campo misurato e simulato - sito SAINT VINCENT – 13\_14/06

Si nota che, per entrambi i grafici, la linea azzurra interseca la curva delle misure e pertanto il valore ottenuto dalle simulazioni è inferiore ad alcuni valori misurati.

Per quanto riguarda il sito di Ivrea, le due sessioni di misura danno due risultati discostanti, vedere figure 9.4 e 9.5.

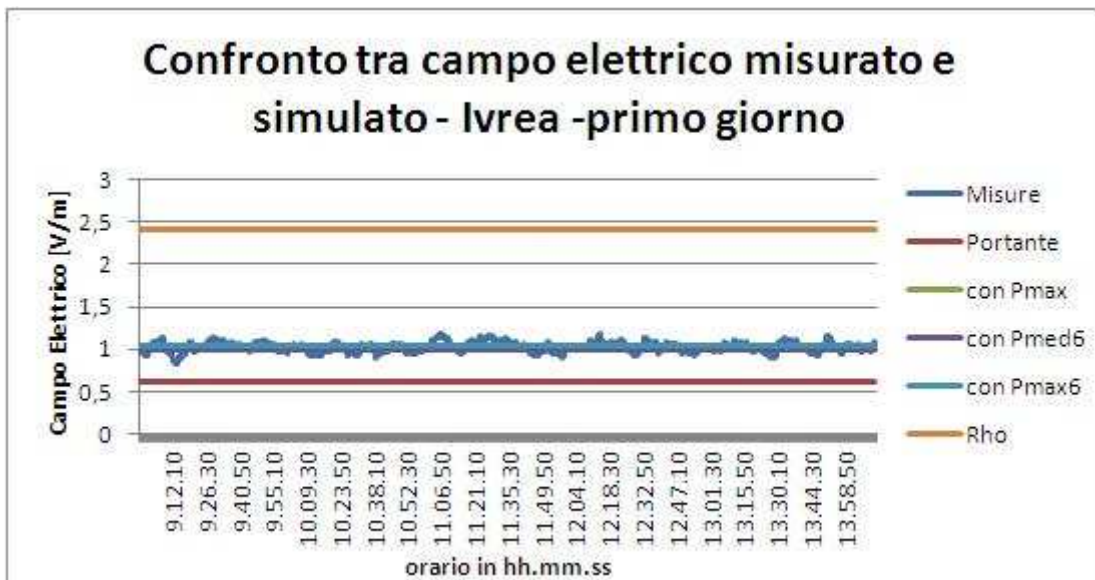


Figura 9.4 - Confronto campo misurato e simulato - sito IVREA – 09/06

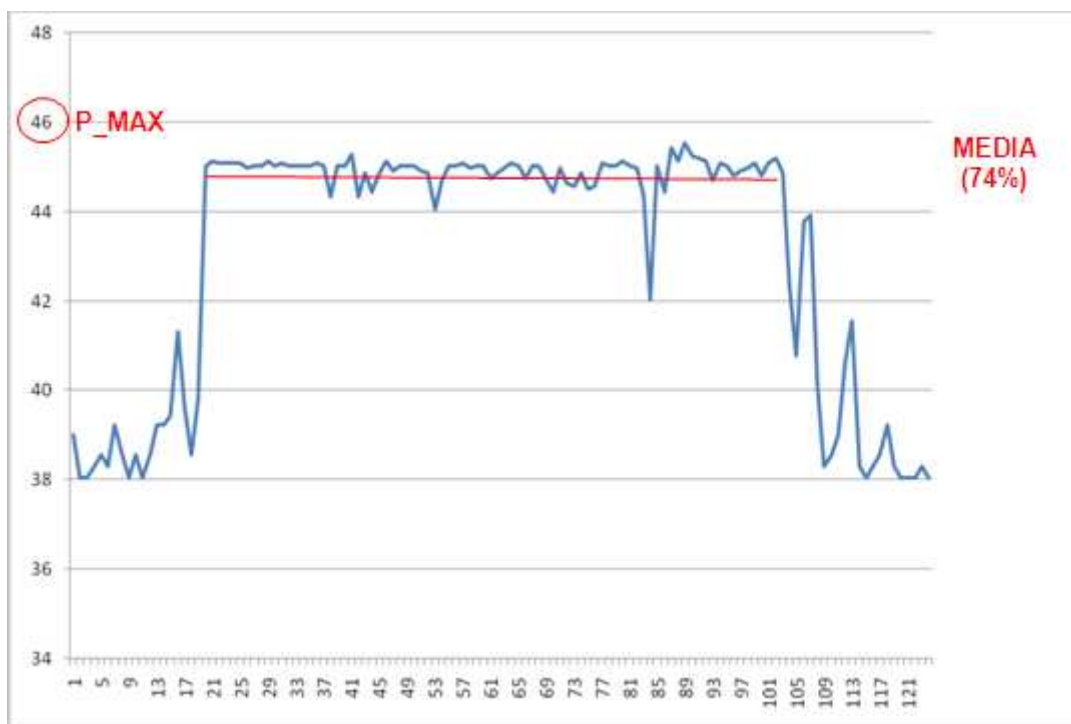


Figura 9.5 - Confronto campo misurato e simulato - sito IVREA – 10/06

Tale discordanza tra i due giorni di misura di Ivrea era già stata notata per quanto riguarda le correlazioni. Il numero di valori utilizzati è estremamente ridotto e questo può comportare un problema nelle valutazioni.

Sono state prese in considerazione, per ogni sito, le massime potenze tra le medie su 6 minuti e confrontate con le potenze massime dichiarate dall'operatore, per comprendere quanta potenza fosse realmente utilizzata nei siti considerati. Per quanto riguarda il sito di Quart, ovvero dove si è riscontrato il risultato migliore, si è appurato che la massima tra le potenze mediate sui 6 minuti risulta essere il 75% della potenza massima dichiarata. Per quanto riguarda il sito di Saint Vincent, tale potenza si attesta attorno al 40% della potenza massima e infine, per il sito di Ivrea, la massima potenza tra le medie su 6 minuti risulta essere il 20% della potenza massima dichiarata dall'operatore. Nel caso in cui la potenza sia pari al 75% della potenza massima si ottengono dei buoni risultati, cosa che non è verificata nel caso in cui la potenza utilizzata sia percentualmente inferiore rispetto alla potenza massima dichiarata. Il costruttore delle antenne utilizzate dall'operatore Vodafone dichiara che 75% è la percentuale di potenza, rispetto alla massima possibile, che una SRB non dovrebbe mai superare per evitare una congestione della rete. Andando a verificare cosa succede quando nel sito di Quart si raggiunge tale livello di potenza (Figura 9.6), si rende chiaro il meccanismo di azione.





**Figura 9.6 - Campionamento su 3 secondi \_ zoom su intervallo di 6 minuti dove c'è massimo traffico**

Come vediamo dalla Figura 9.6, dove la linea rossa indica il valore del 75%, la potenza supera appena di poco questo livello nel peggiore dei casi, nonostante vi sia ancora il 25% di potenza disponibile. Il sistema cerca di mantenere sempre la potenza utilizzata sotto a tale limite in quanto potrebbe succedere in ogni momento che arrivi una nuova richiesta di connessione e la rete non vuole dover rifiutare tale richiesta né interrompere le connessioni già attive. Nel caso in esame, per tutto l'intervallo di 6 minuti il sistema utilizza circa il 75% della potenza massima dichiarata, e si vede che se è costretto a superare tale limite lo fa solo per istanti di tempo molto brevi e subito dopo toglie un po' di risorsa agli altri servizi.

Si può, pertanto, concludere che, quando la potenza utilizzata è pari al 75% della potenza massima dichiarata, le correlazioni e le simulazioni su 6 minuti sono ottime. Andando a effettuare più prove e più misure, anche in siti diversi, si può arrivare a verificare se effettivamente è possibile utilizzare un fattore di correzione pari al 20-25% nelle esecuzioni delle simulazioni per ottenere un risultato più realistico.

Il lavoro svolto è stato un lavoro di tipo pionieristico, sia dal punto di vista ARPA che dal punto di vista dell'operatore. In entrambi i casi, il lavoro svolto ha prodotto dei risultati inaspettati e ha aperto nuove porte per future collaborazioni. La verifica

della correlazione tra campo elettrico e potenza è stata una novità per la tecnologia UMTS e sarà importante che diverse ARPA di varie regioni eseguano misurazioni analoghe prendendo in considerazione più tipi di sorgenti, diverse sia dal punto di vista tecnico che geografico, per poter avvalorare i risultati ottenuti. Sarebbe significativo un coinvolgimento di altri operatori, anche per poter allargare la scelta del sito di misura. Avendo a disposizione un numero maggiore di misure eseguite e l'intero set di valori di traffico, sarà possibile andare a verificare l'esistenza o meno della correlazione tra campo elettrico e traffico, partendo dai risultati ottenuti in questo lavoro di tesi.

Sia dal punto di vista delle Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente che dal punto di vista dell'operatore, sarebbe significativo poter identificare i coefficienti di riduzione da applicare alle simulazioni, per poter meglio comprendere dove e come agire quando risulta necessario verificare il reale impatto elettromagnetico delle Stazioni Radio Base.

# APPENDICE A – Codice Completo Software

---

Si riporta di seguito l'intero codice, in linguaggio Microsoft Visual Basic, del software di misura sviluppato per il controllo via PC dello strumento.

```
Imports System.IO

Public Class Form1
    Dim BaudRate As Integer = -1
    'Dim StartBit As Integer = -1
    Dim DataBit As Integer = -1
    Dim StopBit As Integer = -1
    Dim S As IO.Ports.StopBits = IO.Ports.StopBits.None
    Dim Parity As Integer = -1
    Dim P As IO.Ports.Parity
    Dim Handshake As Integer = -1
    Dim H As IO.Ports.Handshake
    Dim portaCOM As String
    Dim succes As Integer          'variabile che legge il valore
    della funzione Verifica_scrittura(). È = 1 se la scrittura sulla COM
    ha successo
    Dim d As Integer = 0
    Dim stringa As String
    Dim fs As FileStream
    Dim sw As StreamWriter
    Dim primavolta As Boolean = True    'serve per creare la prima
    volta il file della misura singola
    Dim primavolta2 As Boolean = True    'serve per creare la prima
    volta il file delle misure multiple
    Dim a As Integer = 0
    Dim temp As Integer = 0            'è il contatore del numero
    di misure effettuate nelle misure multiple
    Dim comando_pubblico As String
    Dim StartTime As Date
    Dim nomefile As String = "File_misura_SRM3000"
    'file txt della misura singola
    Dim nomefile2 As String = "File_misure_SRM3000"
    'file txt delle misure multiple
    Dim nomefileXLS As String = "c:\File_misura_SRM3000.xls"
    'file xls della misura singola
    Dim nomefileXLS2 As String = "c:\File_misure_SRM3000.xls"
    'file xls delle misure multiple
    'Dim buffer_write As New System.IO.StreamWriter(nomefileXLS)
    'Dim buffer2_write As New System.IO.StreamWriter(nomefileXLS2)
    Dim BandInt_On As Boolean = False

    Public Function Verifica_scrittura()          'invia il comando
    ERROR?
        Dim e As Integer
        'Dim leggi_int As Integer
        'Wait 1000 ms:
        StartTime = Now
        Do
            Application.DoEvents()
        
```

```

Loop Until (Now - StartTime).TotalMilliseconds > 1000
'1000ms
.....
SerialPort1.Write("ERROR?;")
'Wait 1000 ms:
StartTime = Now
Do
    Application.DoEvents()
Loop Until (Now - StartTime).TotalMilliseconds > 1000
'1000ms
.....
e = 0

'SCRIVE NELLA LISTA COMANDI L'ERRORE RISCONTRATO
Select Case e
    Case 0
        Return 0
    Case 401
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "REMOTE COMMAND
IS NOT IMPLEMENTED IN THE REMOTE MODULE!")
        Return 1
    Case 402
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "INVALID
PARAMETER!")
        Return 1
    Case 403
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "INVALID COUNT
OF PARAMETERS!")
        Return 1
    Case 404
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "INVALID
PARAMETER RANGE!")
        Return 1
    Case 405
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "LAST COMMAND
IS NOT COMPLETED!")
        Return 1
    Case 406
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "ANSWER TIME
BETWEEN REMOTE MODULE AND APPLICATION MODULE IS TOO HIGH!")
        Return 1
    Case 407
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "WRONG QUIT
MESSAGE FROM APPLICATION MODULE!")
        Return 1
    Case 408
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "INVALID OR
CORRUPT DATA!")
        Return 1
    Case 409
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "ERROR WHILE
ACCESSING THE EEPROM!")
        Return 1
    Case 410
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "ERROR WHILE
ACCESSING HARDWARE RESOURCES!")
        Return 1
    Case 411
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "COMMAND IS NOT
SUPPORTED IN THIS VERSION OF THE APPLICATION MODULE!")
        Return 1
    Case 412

```

```

        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "REMOTE IS NOT
ACTIVATED (please send REMOTE ON; first)!!")
        Return 1
    Case 413
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "COMMAND IS NOT
SUPPORTED IN THE SELECTED MODE!")
        Return 1
    Case 414
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "MEMORY OF DATA
LOGGER IS FULL!")
        Return 1
    Case 415
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf &
"DEFRAGMENTATION OF FLASH FILE SYSTEM IS REQUIRED!")
        Return 1
    Case 416
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "OPTION CODE IS
INVALID!")
        Return 1
    Case 417
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "INCOMPATIBLE
VERSION!")
        Return 1
    Case 418
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "SUBINDEX
FULL!")
        Return 1
    Case 419
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "FILECOUNTER
FULL!")
        Return 1
    Case 420
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "DATA LOST!")
        Return 1
    Case 421
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "CMD NOT
ACCEPTED (DURING MR_SEARCH_AUTO NOT ALL CMDS ARE ACCEPTED!")
        Return 1
    Case Else
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "NOT DEFINED
ERROR!!")
        Return 1
    End Select

End Function

Private Sub Form1_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles MyBase.Load
    Dim i As Integer

    'individua il nome delle porte COM in uso sul PC
    For i = 0 To My.Computer.Ports.SerialPortNames.Count - 1

        ComboBox6.Items.Add(My.Computer.Ports.SerialPortNames(i))
    Next

    'disabilita ogni comando finche non connetto la porta COM
    GroupBox2.Enabled = False
    GroupBox3.Enabled = False
    GroupBox4.Enabled = False
    Button7.Enabled = False
    Button16.Enabled = False
    Button17.Enabled = False
    Button18.Enabled = False

```

```

End Sub

Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles Button1.Click
    If ComboBox6.Text = "Porta COM" Then
        MsgBox("Selezionare la porta COM da utilizzare",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Porta COM sconosciuta!")
        GoTo errore
    End If
    'controllo se ho impostato la seriale
    If BaudRate < 0 Then
        MsgBox("Impostare il Baud Rate!",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Parametri della seriale non corretti!")
        GoTo errore
    ElseIf Parity < 0 Then
        MsgBox("Impostare il bit di parità!",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Parametri della seriale non corretti!")
        GoTo errore
    ElseIf DataBit < 0 Then
        MsgBox("Impostare il parametro data bits!",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Parametri della seriale non corretti!")
        GoTo errore
    ElseIf StopBit < 0 Then
        MsgBox("Impostare il valore dello stop bit!",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Parametri della seriale non corretti!")
        GoTo errore
    ElseIf Handshake < 0 Then
        MsgBox("Impostare il parametro Handshake!",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Parametri della seriale non corretti!")
        GoTo errore
    End If

    portaCOM = ComboBox6.Text
    If SerialPort1.IsOpen Then
        SerialPort1.Close()
    End If

    Try
        With SerialPort1
            .PortName = portaCOM
            .BaudRate = BaudRate
            .Parity = P
            .DataBits = DataBit
            .StopBits = S
            .Handshake = H
        End With

        SerialPort1.Open()
        Stato_Connessione_LBL.Text =
SerialPort1.PortName & " Connesso!"
        Button1.Enabled = False
        Button3.Enabled = True
        GroupBox2.Enabled = True
        GroupBox3.Enabled = True
        GroupBox4.Enabled = True
        Button7.Enabled = True
        Button16.Enabled = True
        Button17.Enabled = True
        Button18.Enabled = True
    
```

```

        Catch ex As Exception
            Stato_Connessione_LBL.Text =
                SerialPort1.PortName & " Errore di connessione!"
            MsgBox(ex.ToString)
            Button1.Enabled = True
            Button3.Enabled = False
            GroupBox2.Enabled = False
            GroupBox3.Enabled = False
            GroupBox4.Enabled = False
        End Try

errore:

        End Sub

        Private Sub ComboBox1_SelectedIndexChanged(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ComboBox1.SelectedIndexChanged
            BaudRate = ComboBox1.Text
        End Sub

        Private Sub ComboBox5_SelectedIndexChanged(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ComboBox5.SelectedIndexChanged
            DataBit = ComboBox5.Text
        End Sub

        Private Sub ComboBox4_SelectedIndexChanged(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ComboBox4.SelectedIndexChanged
            StopBit = ComboBox4.SelectedIndex
            If StopBit = 0 Then
                S = IO.Ports.StopBits.One
            ElseIf StopBit = 1 Then
                S = IO.Ports.StopBits.OnePointFive
            ElseIf StopBit = 2 Then
                S = IO.Ports.StopBits.Two
            End If
        End Sub

        Private Sub ComboBox3_SelectedIndexChanged(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ComboBox3.SelectedIndexChanged
            Parity = ComboBox3.SelectedIndex
            If Parity = 0 Then
                P = IO.Ports.Parity.Even
            ElseIf Parity = 1 Then
                P = IO.Ports.Parity.Odd
            ElseIf Parity = 2 Then
                P = IO.Ports.Parity.None
            ElseIf Parity = 3 Then
                P = IO.Ports.Parity.Mark
            ElseIf Parity = 4 Then
                P = IO.Ports.Parity.Space
            End If
        End Sub

        Private Sub ComboBox2_SelectedIndexChanged(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ComboBox2.SelectedIndexChanged
            Handshake = ComboBox2.SelectedIndex
            If Handshake = 0 Then

```

```

        H = IO.Ports.Handshake.None
    ElseIf Handshake = 1 Then
        H = IO.Ports.Handshake.RequestToSend
    End If
End Sub

Private Sub Button3_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles Button3.Click
    Try
        SerialPort1.Close()
        Stato_Connessione_LBL.Text =
        SerialPort1.PortName & " Disconnesso!"
        Button1.Enabled = True
        Button3.Enabled = False
        GroupBox2.Enabled = False
        GroupBox3.Enabled = False
        GroupBox4.Visible = False

    Catch ex As Exception
        Stato_Connessione_LBL.Text =
        SerialPort1.PortName & " Errore!"
        MsgBox(ex.ToString)
        Button1.Enabled = False
        Button3.Enabled = True
        GroupBox2.Enabled = True
        GroupBox3.Enabled = True
        GroupBox4.Visible = True
    End Try
End Sub

Private Sub Button2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles Button2.Click
    Dim d As Integer = 0

    Try
        SerialPort1.Write("Remote ON;")
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try

    If (d = 0) Then
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "REMOTE ON;")
        Button15.Enabled = True
        Button2.Enabled = False
    End If
End Sub

Private Sub Button4_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles Button4.Click

    Dim mode As String

    mode = ComboBox7.Text

    If mode = "Mode" Then
        MsgBox("Selezionare il modo",
        MsgBoxStyle.Exclamation, "Mode")
        GoTo errore1
    End If

    Try
        SerialPort1.Write("MODE " & mode & ";")
    End Try

```



```

Catch ex As Exception
    MsgBox(ex.ToString)
    d = 1
End Try
succes = Verifica_scrittura()
If succes = 1 Then
    MsgBox("ERRORE! Comando non ricevuto dallo strumento!
Per maggiori dettagli leggere la lista dei comandi." _
, MsgBoxStyle.Critical, "ERRORE!")
    d = 1
End If

If (d = 0) Then
    Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "MODE " & mode &
";")
End If

errore1:

End Sub

Private Sub Button6_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles Button6.Click
    Dim moltiplicatore As Integer
    Dim temp As Double

    If RadioButton1.Checked = True Then
        moltiplicatore = 1
    ElseIf RadioButton2.Checked = True Then
        moltiplicatore = 10 ^ 3
    ElseIf RadioButton3.Checked = True Then
        moltiplicatore = 10 ^ 6
    ElseIf RadioButton4.Checked = True Then
        moltiplicatore = 10 ^ 9
    End If

    temp = NumericUpDown1.Value * moltiplicatore
    temp = CLng(temp)

    Try
        SerialPort1.Write("F_CENT " & temp & ";")
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try
    succes = Verifica_scrittura()
    If succes = 1 Then
        MsgBox("ERRORE! Comando non ricevuto dallo strumento!
Per maggiori dettagli leggere la lista dei comandi." _
, MsgBoxStyle.Critical, "ERRORE!")
        d = 1
    End If

    If (d = 0) Then
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "F_CENT " & temp &
";")
    End If

End Sub

Private Sub Button8_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles Button8.Click

```

```

    Try
        SerialPort1.Write("MR " & NumericUpDown2.Value & ";")
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try
    succes = Verifica_scrittura()
    If succes = 1 Then
        MsgBox("ERRORE! Comando non ricevuto dallo strumento!
Per maggiori dettagli leggere la lista dei comandi." _
, MsgBoxStyle.Critical, "ERRORE!")
        d = 1
    End If

    If (d = 0) Then
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "MR " &
NumericUpDown2.Value & ";")
    End If
End Sub

Private Sub Button9_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles Button9.Click
    Dim result As String

    result = ComboBox8.Text

    If result = "Result Type" Then
        MsgBox("Selezionare la modalità di acquisizione",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Result Type")
        GoTo errore2
    End If

    Try
        SerialPort1.Write("TRACE " & result & ";")
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try
    succes = Verifica_scrittura()
    If succes = 1 Then
        MsgBox("ERRORE! Comando non ricevuto dallo strumento!
Per maggiori dettagli leggere la lista dei comandi." _
, MsgBoxStyle.Critical, "ERRORE!")
        d = 1
    End If

    If (d = 0) Then
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "TRACE " & result &
";")
    End If

errore2:

    End Sub

Private Sub AboutToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
AboutToolStripMenuItem.Click
    AboutBox1.Show()
End Sub

```

```

Private Sub Button10_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal
e As System.EventArgs) Handles Button10.Click
    Dim moltiplicatore As Integer
    Dim temp As Double

    If RadioButton8.Checked = True Then
        moltiplicatore = 1
    ElseIf RadioButton7.Checked = True Then
        moltiplicatore = 10 ^ 3
    ElseIf RadioButton6.Checked = True Then
        moltiplicatore = 10 ^ 6
    ElseIf RadioButton5.Checked = True Then
        moltiplicatore = 10 ^ 9
    End If

    temp = NumericUpDown3.Value * moltiplicatore
    temp = CLng(temp)

    Try
        SerialPort1.Write("F_SPAN " & temp & ";")
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try
    succes = Verifica_scrittura()
    If succes = 1 Then
        MsgBox("ERRORE! Comando non ricevuto dallo strumento!
Per maggiori dettagli leggere la lista dei comandi." _
, MsgBoxStyle.Critical, "ERRORE!")
        d = 1
    End If

    If (d = 0) Then
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "F_SPAN " & temp &
";")
    End If

End Sub

```

```

Private Sub Button11_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal
e As System.EventArgs) Handles Button11.Click
    Dim moltiplicatore As Integer
    Dim temp As Double

    If RadioButton12.Checked = True Then
        moltiplicatore = 1
    ElseIf RadioButton11.Checked = True Then
        moltiplicatore = 10 ^ 3
    ElseIf RadioButton10.Checked = True Then
        moltiplicatore = 10 ^ 6
    ElseIf RadioButton9.Checked = True Then
        moltiplicatore = 10 ^ 9
    End If

    temp = NumericUpDown4.Value * moltiplicatore
    temp = CLng(temp)

    Try
        SerialPort1.Write("RBW " & temp & ";")
    Catch ex As Exception

```

```

        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try
    succes = Verifica_scrittura()
    If succes = 1 Then
        MsgBox("ERRORE! Comando non ricevuto dallo strumento!
Per maggiori dettagli leggere la lista dei comandi." _
, MsgBoxStyle.Critical, "ERRORE!")
        d = 1
    End If

    If (d = 0) Then
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "RBW " & temp &
";")
    End If

End Sub

Private Sub ComboBox7_SelectedIndexChanged(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ComboBox7.SelectedIndexChanged
    If ComboBox7.Text = "SPECTRUM" Then
        Button12.Text = "Spectrum Analysis"
        Button6.Enabled = True
        Button8.Enabled = True
        Button9.Enabled = True
        Button10.Enabled = True
        Button11.Enabled = True
        ComboBox8.Enabled = True
        NumericUpDown1.Enabled = True
        NumericUpDown2.Enabled = True
        NumericUpDown3.Enabled = True
        NumericUpDown4.Enabled = True
        RadioButton1.Enabled = True
        RadioButton2.Enabled = True
        RadioButton3.Enabled = True
        RadioButton4.Enabled = True
        RadioButton5.Enabled = True
        RadioButton6.Enabled = True
        RadioButton7.Enabled = True
        RadioButton8.Enabled = True
        RadioButton9.Enabled = True
        RadioButton10.Enabled = True
        RadioButton11.Enabled = True
        RadioButton12.Enabled = True
        Label10.Enabled = True
        Panel3.Enabled = True
        Button19.Enabled = True
        GroupBox4.Enabled = True
    ElseIf ComboBox7.Text = "SAFETY" Then
        Button12.Text = "Safety Evaluation"
        Button6.Enabled = True
        Button8.Enabled = True
        Button9.Enabled = True
        Button10.Enabled = True
        Button11.Enabled = True
        ComboBox8.Enabled = True
        NumericUpDown1.Enabled = True
        NumericUpDown2.Enabled = True
        NumericUpDown3.Enabled = True
        NumericUpDown4.Enabled = True
        RadioButton1.Enabled = True
        RadioButton2.Enabled = True

```

```

RadioButton3.Enabled = True
RadioButton4.Enabled = True
RadioButton5.Enabled = True
RadioButton6.Enabled = True
RadioButton7.Enabled = True
RadioButton8.Enabled = True
RadioButton9.Enabled = True
RadioButton10.Enabled = True
RadioButton11.Enabled = True
RadioButton12.Enabled = True
Label10.Enabled = False      'Band Integration
Panel3.Enabled = False      'Band Integration
Button19.Enabled = False    'Band Integration
ElseIf ComboBox7.Text = "UMTS" Then
    Button12.Text = "UMTS P-CPICH Demodulation"
    Button6.Enabled = True
    Button8.Enabled = True
    Button9.Enabled = True
    Button10.Enabled = False 'F_Span
    Button11.Enabled = False 'RBW
    ComboBox8.Enabled = True
    NumericUpDown1.Enabled = True
    NumericUpDown2.Enabled = True
    NumericUpDown3.Enabled = False 'F_Span
    NumericUpDown4.Enabled = False 'RBW
    RadioButton1.Enabled = True
    RadioButton2.Enabled = True
    RadioButton3.Enabled = True
    RadioButton4.Enabled = True
    RadioButton5.Enabled = False 'F_Span
    RadioButton6.Enabled = False 'F_Span
    RadioButton7.Enabled = False 'F_Span
    RadioButton8.Enabled = False 'F_Span
    RadioButton9.Enabled = False 'RBW
    RadioButton10.Enabled = False 'RBW
    RadioButton11.Enabled = False 'RBW
    RadioButton12.Enabled = False 'RBW
    Label10.Enabled = False    'Band Integration
    Panel3.Enabled = False    'Band Integration
    Button19.Enabled = False   'Band Integration
ElseIf ComboBox7.Text = "TIME" Then
    Button12.Text = "Time Analysis"
    Button6.Enabled = False 'Fcent
    Button8.Enabled = True
    Button9.Enabled = True
    Button10.Enabled = False 'F_Span
    Button11.Enabled = False 'RBW
    ComboBox8.Enabled = True
    NumericUpDown1.Enabled = False 'Fcent
    NumericUpDown2.Enabled = True
    NumericUpDown3.Enabled = False 'F_Span
    NumericUpDown4.Enabled = False 'RBW
    RadioButton1.Enabled = False 'Fcent
    RadioButton2.Enabled = False 'Fcent
    RadioButton3.Enabled = False 'Fcent
    RadioButton4.Enabled = False 'Fcent
    RadioButton5.Enabled = False 'F_Span
    RadioButton6.Enabled = False 'F_Span
    RadioButton7.Enabled = False 'F_Span
    RadioButton8.Enabled = False 'F_Span
    RadioButton9.Enabled = False 'RBW
    RadioButton10.Enabled = False 'RBW
    RadioButton11.Enabled = False 'RBW

```

```

        RadioButton12.Enabled = False 'RBW
        Label10.Enabled = False      'Band Integration
        Panel3.Enabled = False      'Band Integration
        Button19.Enabled = False    'Band Integration
    End If
End Sub

Private Sub Button5_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles Button5.Click

    Try
        SerialPort1.Write("MODE?;")
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try

    If (d = 0) Then
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "MODE?;")
    End If

    ..... Wait 1000 ms:
    StartTime = Now
    Do
        Application.DoEvents()
    Loop Until (Now - StartTime).TotalMilliseconds > 1000
    .....

    stringa = SerialPort1.ReadExisting()
    Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & vbCrLf & stringa)

End Sub

Private Sub Button12_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal
e As System.EventArgs) Handles Button12.Click
    Dim comando As String = ComboBox7.Text

    If ComboBox7.Text = "SPECTRUM" Then
        If BandInt_On = True Then
            comando = "BI_VALUE?;"
        Else
            comando = "SPEC?;"
        End If
    ElseIf ComboBox7.Text = "SAFETY" Then
        comando = "TAB?;"
    ElseIf ComboBox7.Text = "UMTS" Then
        comando = "UTAB?;"
    ElseIf ComboBox7.Text = "TIME" Then
        comando = "VAL?;"
    End If

    If comando = "Mode" Then
        MsgBox("Selezionare il modo",
        MsgBoxStyle.Exclamation, "Mode")
        GoTo errore5
    End If
    Try
        SerialPort1.Write(comando)
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)

```

```

        d = 1
    End Try

    If (d = 0) Then
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & comando)
    End If

    stringa = SerialPort1.ReadExisting()
    Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & vbCrLf & stringa)

    If primavolta = True Then
        If TextBox1.Text = Nothing Then
            nomefile = "c:\File_misura_singola_SRM3000.txt"
            nomefileXLS = "c:\File_misura_singola_SRM3000.xls"
        Else
            nomefile = "c:\" & TextBox1.Text & ".txt"
            nomefileXLS = "c:\" & TextBox1.Text & ".xls"
        End If
    End If

    If primavolta = True Then
        WriteFile(nomefile, stringa, False) 'crea il
        file .txt e scrive il dato
        WriteFile(nomefileXLS, "Data e Ora di misurazione: " &
        System.DateTime.Now & vbCrLf & stringa & vbCrLf & vbCrLf & vbTab,
        False)
        primavolta = False
    Else
        WriteFile(nomefile, stringa, True) 'appende
        in coda il dato
        WriteFile(nomefileXLS, "Data e Ora di misurazione: " &
        System.DateTime.Now & vbCrLf & stringa & vbCrLf & vbCrLf & vbTab,
        True)
    End If

errore5:
    End Sub

    Private Sub WriteFile(ByVal FileName, ByVal MemoryData, ByVal
    isAppend)
        If isAppend Then
            fs = New FileStream(FileName, FileMode.Append,
            FileAccess.Write)
        Else
            fs = New FileStream(FileName, FileMode.Create,
            FileAccess.Write)
        End If
        sw = New StreamWriter(fs)
        sw.Write(MemoryData)
        sw.Close()
        sw.Dispose()
        fs.Dispose()
        sw = Nothing
        fs = Nothing

    End Sub

    Private Sub TextBox1_TextChanged(ByVal sender As System.Object,
    ByVal e As System.EventArgs) Handles TextBox1.TextChanged
        primavolta = True
    End Sub

```

```

Private Sub Button13_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal
e As System.EventArgs) Handles Button13.Click
    Dim intervallo As Integer = TextBox2.Text * 1000
    Dim durata As Integer

    If RadioButton13.Checked = True Then
        durata = TextBox3.Text * 1000 * 60 + 1000
    ElseIf RadioButton14.Checked = True Then
        durata = TextBox3.Text * 1000 * 3600 + 1000
    End If
    Dim comando As String = ComboBox7.Text
    temp = 0

    If ComboBox7.Text = "SPECTRUM" Then
        If BandInt_On = True Then
            comando = "BI_VALUE?;"
        Else
            comando = "SPEC?;"
        End If

    ElseIf ComboBox7.Text = "SAFETY" Then
        comando = "TAB?;"
    ElseIf ComboBox7.Text = "UMTS" Then
        comando = "UTAB?;"
    ElseIf ComboBox7.Text = "TIME" Then
        comando = "VAL?;"
    End If

    If comando = "Mode" Then
        MsgBox("Selezionare il modo", MsgBoxStyle.Exclamation,
"Mode")
        GoTo errore6
    End If

    Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "Inizio misurazioni...")
    comando_pubblico = comando 'comando pubblico sarà così
visibile anche all'interno del timer1

    If intervallo = Nothing <> durata = Nothing Then
        MsgBox("Intervallo o Durata di misura non impostati!",
MsgBoxStyle.Critical, "ERRORE!")
        GoTo errore6
    End If

    Button13.Enabled = False
    TextBox4.Enabled = False 'disabilita textbox dove
inserisco il nome file per evitare modifiche accidentali al nome
file mentre è in uso
    Button14.Enabled = True

    Timer1.Enabled = True
    Timer2.Enabled = True

    GroupBox2.Enabled = False 'disabilita il pannello dei
comandi per non far modificare all'utente il tipo di misura
desiderata mentre sono già iniziate le misurazioni automatiche

    Timer1.Interval = intervallo
    Timer2.Interval = durata
    Timer1.Start() 'intervallo

```



```

Timer2.Start() 'durata delle misure
temp = 0 'resetto il contatore del numero di misure

If primavolta2 = True Then
    If TextBox4.Text = Nothing Then
        nomefile2 = "c:\Misure_SRM3000.txt"
        nomefileXLS2 = "c:\Misure_SRM3000.xls"
    Else
        nomefile2 = "c:\" & TextBox4.Text & ".txt"
        nomefileXLS2 = "c:\" & TextBox4.Text & ".xls"
    End If
End If

errore6:
    End Sub

    Private Sub TextBox4_TextChanged(ByVal sender As System.Object,
ByVal e As System.EventArgs) Handles TextBox4.TextChanged
        primavolta2 = True
        TextBox4.ForeColor = Color.Black
    End Sub

    Private Sub Timer1_Tick(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles Timer1.Tick
        'esegue la misura ogni "tick" secondi (tick = intervallo)

        d = 0

        Try
            SerialPort1.Write(comando_pubblico)
        Catch ex As Exception
            MsgBox(ex.ToString)
            d = 1
        End Try

        temp = temp + 1 'indica il numero dell'attuale misura

        If (d = 0) Then 'comando eseguito con successo
            Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "Misura n° " & temp
& " eseguita.")
        End If
        stringa = SerialPort1.ReadExisting() 'stringa contiene la
lettura dello strumento

        If primavolta2 = True Then
            WriteFile(nomefile2, vbCrLf & "Misura n° " & temp & ":"
& vbCrLf & stringa & vbCrLf & vbCrLf, False) 'la prima volta crea il
file
            WriteFile(nomefileXLS2, "Misura n° " & temp & ":" &
vbCrLf & "Data e Ora di misurazione: " & System.DateTime.Now &
vbCrLf & vbCrLf & stringa & vbCrLf & vbCrLf & vbTab, False)
            primavolta2 = False
        Else
            WriteFile(nomefile2, vbCrLf & "Misura n° " & temp & ":"
& vbCrLf & stringa & vbCrLf & vbCrLf, True) 'le altre volte appendo
il testo in fondo
            WriteFile(nomefileXLS2, "Misura n° " & temp & ":" &
vbCrLf & "Data e Ora di misurazione: " & System.DateTime.Now &
vbCrLf & vbCrLf & stringa & vbCrLf & vbCrLf & vbTab, True)
        End If

        'scrive su file excel "nomefileXLS" il dato

```

```

End Sub

Private Sub Timer2_Tick(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles Timer2.Tick
    Timer1.Stop()
    Timer1.Enabled = False
    Timer2.Stop()
    Timer2.Enabled = False
    Button14.Enabled = False 'disabilita pulsante stop
    Button13.Enabled = True 'abilita pulsante start
    TextBox4.Enabled = True 'abilita textbox dove inserisco
il nome file
    GroupBox2.Enabled = True
    Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "...Misurazioni
conclude.")
    temp = 0 'resetto il contatore del numero
di misure
    TextBox4.ForeColor = Color.Red
End Sub

Private Sub Button14_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal
e As System.EventArgs) Handles Button14.Click
    Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "...Misurazioni
stoppage!!!")
    Timer1.Stop()
    Timer1.Enabled = False
    Timer2.Stop()
    Timer2.Enabled = False
    Button14.Enabled = False 'disabilita pulsante stop
    Button13.Enabled = True 'abilita pulsante start
    TextBox4.Enabled = True 'abilita textbox dove inserisco
il nome file
    GroupBox2.Enabled = True 'abilita il pannello comandi
    temp = 0 'resetto il contatore del numero
di misure
    TextBox4.ForeColor = Color.Red
End Sub

Private Sub Button15_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal
e As System.EventArgs) Handles Button15.Click
    Dim d As Integer = 0

    Try
        SerialPort1.Write("Remote OFF;")
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try

    If (d = 0) Then
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "REMOTE OFF;")
        Button15.Enabled = False
        Button2.Enabled = True
    End If
End Sub

Private Sub ToolStripStatusLabel2_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ToolStripStatusLabel2.Click
    System.Diagnostics.Process.Start("www.arpa.vda.it") '
process.start apre il browser di default
End Sub

```

```

Private Sub Button16_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal
e As System.EventArgs) Handles Button16.Click
    Dim d As Integer = 0

    Try
        SerialPort1.Write("POWER_OFF;")
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try

    If (d = 0) Then
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "POWER_OFF;")
    End If
End Sub

Private Sub Button7_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles Button7.Click
    Dim d As Integer = 0

    Try
        SerialPort1.Write("BATTERY?;")
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try
    succes = Verifica_scrittura()
    If succes = 1 Then
        MsgBox("ERRORE! Comando non ricevuto dallo strumento!
Per maggiori dettagli leggere la lista dei comandi." _
, MsgBoxStyle.Critical, "ERRORE!")
        d = 1
    End If
    If (d = 0) Then
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "BATTERY?;")
    End If

    stringa = SerialPort1.ReadExisting()
    Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "Batteria Residua: " &
stringa & "%.")

End Sub

Private Sub Button17_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal
e As System.EventArgs) Handles Button17.Click
    Dim d As Integer = 0

    Try
        SerialPort1.Write("LIGHT ON;")
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try

    If (d = 0) Then
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "LIGHT ON;")
    End If
End Sub

Private Sub Button18_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal
e As System.EventArgs) Handles Button18.Click
    Dim d As Integer = 0

```

```

Try
    SerialPort1.Write("LIGHT OFF;")
Catch ex As Exception
    MsgBox(ex.ToString)
    d = 1
End Try

If (d = 0) Then
    Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "LIGHT OFF;")
End If
End Sub

Private Sub Lista_Comandi_TX_TextChanged(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
Lista_Comandi_TX.TextChanged
    Lista_Comandi_TX.ScrollToCaret()
End Sub

Private Sub ExitToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ConnettiToolStripMenuItem.Click
    If ComboBox6.Text = "Porta COM" Then
        MsgBox("Selezionare la porta COM da utilizzare",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Porta COM sconosciuta!")
        GoTo errore
    End If
    'controllo se ho impostato la seriale
    If BaudRate < 0 Then
        MsgBox("Impostare il Baud Rate!",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Parametri della seriale non corretti!")
        GoTo errore
    ElseIf Parity < 0 Then
        MsgBox("Impostare il bit di parità!",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Parametri della seriale non corretti!")
        GoTo errore
    ElseIf DataBit < 0 Then
        MsgBox("Impostare il parametro data bits!",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Parametri della seriale non corretti!")
        GoTo errore
    ElseIf StopBit < 0 Then
        MsgBox("Impostare il valore dello stop bit!",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Parametri della seriale non corretti!")
        GoTo errore
    ElseIf Handshake < 0 Then
        MsgBox("Impostare il parametro Handshake!",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Parametri della seriale non corretti!")
        GoTo errore
    End If

    portaCOM = ComboBox6.Text
    If SerialPort1.IsOpen Then
        SerialPort1.Close()
    End If

Try
    With SerialPort1
        .PortName = portaCOM
        .BaudRate = BaudRate
        .Parity = P
        .DataBits = DataBit
        .StopBits = S
    End With
End Try

```

```

        .Handshake = H
    End With

    SerialPort1.Open()
    Stato_Connessione_LBL.Text = SerialPort1.PortName & "
Connesso!"

    Button1.Enabled = False
    Button3.Enabled = True
    GroupBox2.Enabled = True
    GroupBox3.Enabled = True
    GroupBox4.Enabled = True
    ConnettiToolStripMenuItem.Enabled = False
    DisconnettiToolStripMenuItem.Enabled = True
    Button7.Enabled = True
    Button16.Enabled = True
    Button17.Enabled = True
    Button18.Enabled = True

    Catch ex As Exception
        Stato_Connessione_LBL.Text = SerialPort1.PortName & "
Errore di connessione!"
        MsgBox(ex.ToString)
        Button1.Enabled = True
        Button3.Enabled = False
        GroupBox2.Enabled = False
        GroupBox3.Enabled = False
        GroupBox4.Enabled = False
        ConnettiToolStripMenuItem.Enabled = True
        DisconnettiToolStripMenuItem.Enabled = False
        Button7.Enabled = False
        Button16.Enabled = False
        Button17.Enabled = False
        Button18.Enabled = False

    End Try
errore:
    End Sub

    Private Sub DisconnettiToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
DisconnettiToolStripMenuItem.Click
        Try
            SerialPort1.Close()
            Stato_Connessione_LBL.Text = SerialPort1.PortName & "
Disconnesso!"
            Button1.Enabled = True
            Button3.Enabled = False
            GroupBox2.Enabled = False
            GroupBox3.Enabled = False
            GroupBox4.Visible = False
            ConnettiToolStripMenuItem.Enabled = True
            DisconnettiToolStripMenuItem.Enabled = False
            Button7.Enabled = False
            Button16.Enabled = False
            Button17.Enabled = False
            Button18.Enabled = False
        Catch ex As Exception
            Stato_Connessione_LBL.Text = SerialPort1.PortName & "
Errore!"
            MsgBox(ex.ToString)
            Button1.Enabled = False
            Button3.Enabled = True

```

```

        GroupBox2.Enabled = True
        GroupBox3.Enabled = True
        GroupBox4.Visible = True
        ConnettiToolStripMenuItem.Enabled = False
        DisconnettiToolStripMenuItem.Enabled = True
        Button7.Enabled = True
        Button16.Enabled = True
        Button17.Enabled = True
        Button18.Enabled = True

    End Try
End Sub

Private Sub EsciToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
EsciToolStripMenuItem.Click
    AboutBox1.Close()
    SerialPort1.Close()
    Me.Close()
End Sub

Private Sub clock_Tick(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles clock.Tick
    clock_label.Text = System.DateTime.Now
End Sub

Private Sub Form1_FormClosed(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.FormClosedEventArgs) Handles Me.FormClosed
End Sub

Private Sub Button19_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal
e As System.EventArgs) Handles Button19.Click
    Dim t As String = "OFF"

    If RadioButton18.Checked = True Then
        t = "ON"
        BandInt_On = True
    ElseIf RadioButton17.Checked = True Then
        t = "OFF"
        BandInt_On = False
    End If
    Try
        SerialPort1.Write("BI_MODE " & t & ";")
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.ToString)
        d = 1
    End Try
    succes = Verifica_scrittura()
    If succes = 1 Then
        MsgBox("ERRORE! Comando non ricevuto dallo strumento!
Per maggiori dettagli leggere la lista dei comandi." _
, MsgBoxStyle.Critical, "ERRORE!")
        d = 1
    End If

    If (d = 0) Then
        Lista_Comandi_TX.AppendText(vbCrLf & "BI_MODE " & t &
";")
    End If
End Sub

End Class

```

# APPENDICE B – Macro Microsoft Excel

---

Si riportano di seguito i codici delle macro scritte in Excel utilizzate per le elaborazioni.

- ESEMPIO DI CODICE DI UNA MACRO UTILIZZATA PER SELEZIONARE I DATI DI POTENZA E DI TRAFFICO OGNI 10 sec PER POTERLI CONFRONTARE CON LE MISURE DI CAMPO ELETTRICO:

```
Sub Dati_ist()
```

```
With ActiveSheet
```

```
Range("G2") = "Riga da cui partire"
```

```
Range("G3") = "Ultima riga utile"
```

```
Range("H2") = InputBox(Prompt:="Riga da cui partire")
```

```
Range("H3") = InputBox(Prompt:="Prima riga da elscudere")
```

```
k = Range("H2").Value
```

```
j = Range("H2").Value
```

```
i = 1
```

```
Dim c
```

```
g = 0
```

```
For i = 1 To 1717
```

```
c = Round(Worksheets("Campo_Elettrico").Cells(k, 1).Value, 6)
```

```
VAI:
```

```
f = Cells(j, 1).Value
```

```
If (f > c) Then
```

```
j = j - 1
```

```
g = 1
```

```
GoTo VAI
```

```
Elseif (f < c) Then
```

```
Cells(i, 10).Value = c
```

```
Cells(i, 11).Value = (Cells(j, 2).Value + Cells(j + 1, 2).Value) / 2
```

```
Elseif (f = c) Then
```

```
Cells(i, 10).Value = c
```

```
Cells(i, 11).Value = Cells(j, 2).Value
```

```
End If
```

```
Cells(j, 1).Select
```

```
With Selection.Interior
```

```

        .Pattern = xlSolid
        .PatternColorIndex = xlAutomatic
        .Color = 65535
        .TintAndShade = 0
        .PatternTintAndShade = 0
    End With

    If (g = 1) Then
        g = 0
        j = j + 1
    End If

    j = j + 20
    k = k + 1
    Next i

End With

End Sub

```

- ESEMPIO DI CODICE DI UNA MACRO UTILIZZATA PER ESEGUIRE LE MEDIE OGNI 1 MINUTO

```

Sub Media_1_min()

With ActiveSheet

Range("F2") = "Riga da cui partire"
Range("F3") = "Ultima riga utile"
Range("G2") = InputBox(Prompt:="Riga da cui partire")
Range("G3") = InputBox(Prompt:="Prima riga da elscudere")

j = Range("G2")
q = 1
somma = 0
conta = 0

Range(G11).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "09:52:10"
Range("G2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "09:53:10"
Range("G1:G2").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("G1:G238"), Type:=xlFillDefault
Range("G1:G238").Select

For k = j To Range("G3")

f = Cells(q, 9).Value

```



```

h = Cells(j, 1).Value

If (h >= f) Then
Cells(q, 11) = Cells(j, 1).Value
Cells(q, 12).Value = somma / conta
conta = 1
somma = Cells(j, 2).Value

Cells(j, 1).Select
  With Selection.Interior
    .Pattern = xlSolid
    .PatternColorIndex = xlAutomatic
    .Color = 65535
    .TintAndShade = 0
    .PatternTintAndShade = 0
  End With

q = q + 1

Else
somma = somma + Cells(j, 2).Value
conta = conta + 1
End If

j = j + 1
Next k
End With
End Sub

```

Per tutte le altre macro utilizzate per calcolare le medie ogni 6,10,15,30 e 60 minuti, il codice è analogo, cambia solamente il vettore iniziale degli orari, mentre il resto del codice rimane analogo in quanto deve andare a ricercare il valore più vicino al valore indicato nel vettore iniziale e fare la media su tutti i valori precedenti.

# APPENDICE C – Grafici Campo Elettrico/Potenza - Campo Elettrico/Traffico

Si riportano di seguito tutti i grafici relativi alle correlazioni tra campo elettrico e potenza e campo elettrico e traffico. I grafici sono suddivisi per sito di misura.

a) QUART 20/21 - 06 - 2011

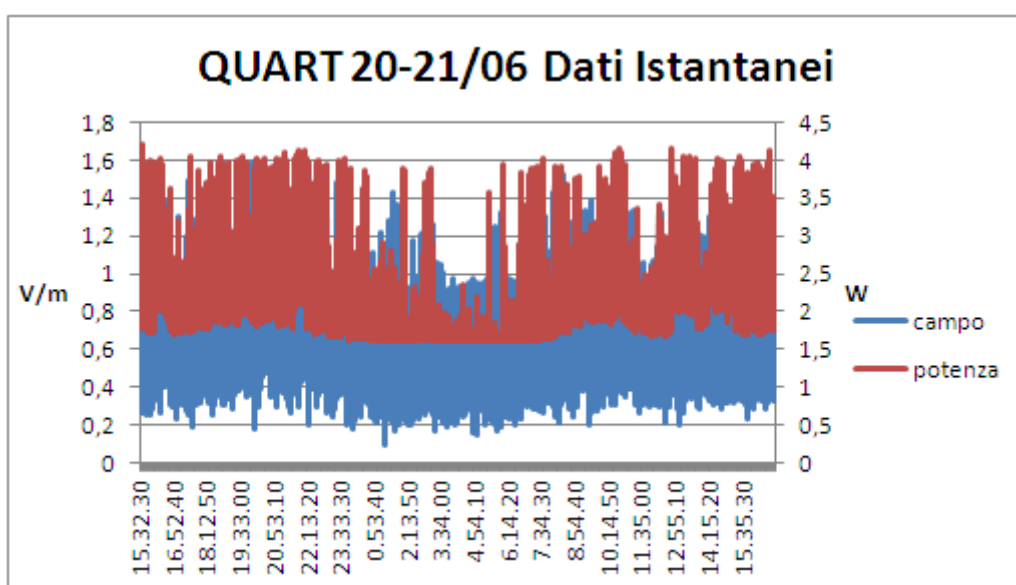


Figura I: Dati istantanei Campo Elettrico e Potenza – sito QUART – 20\_21/06

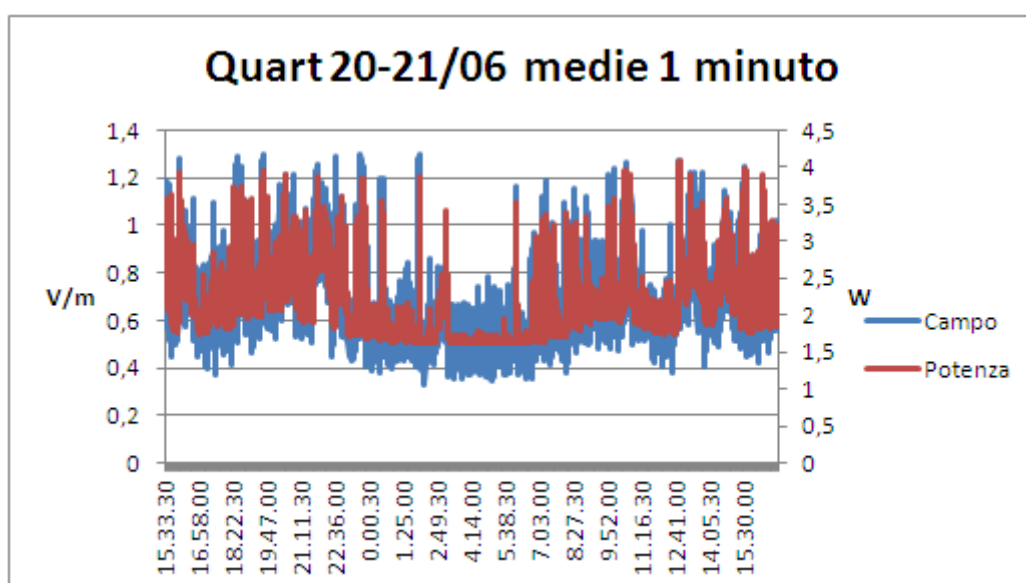


Figura II: Medie su 1 minuto Campo Elettrico e Potenza – sito QUART – 20\_21/06

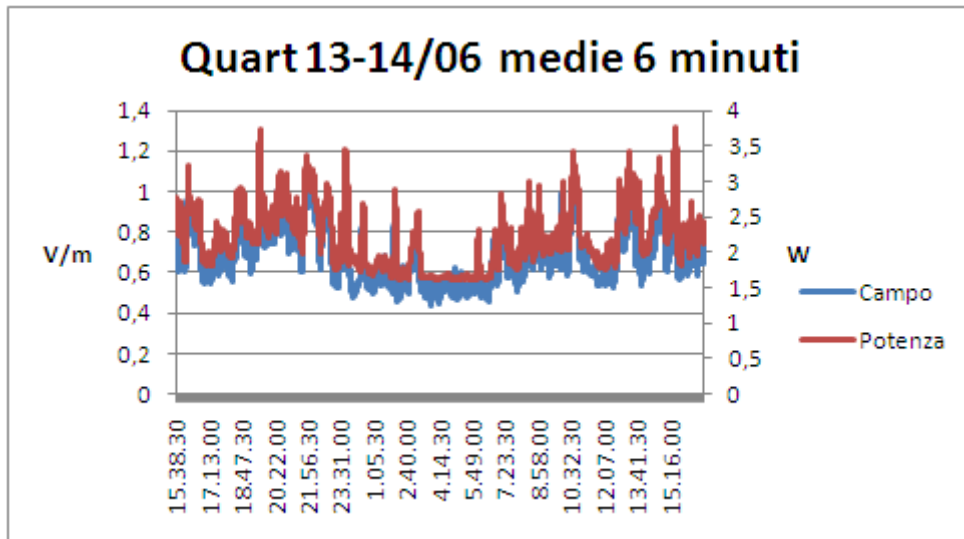


Figura III: Medie su 6 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito QUART – 20\_21/06

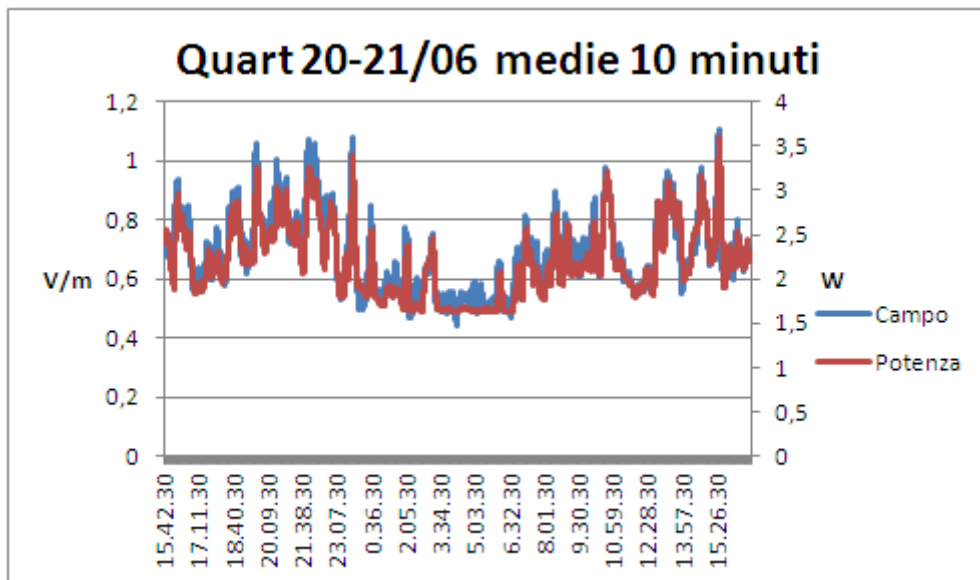


Figura IV: Medie su 10 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito QUART – 20\_21/06

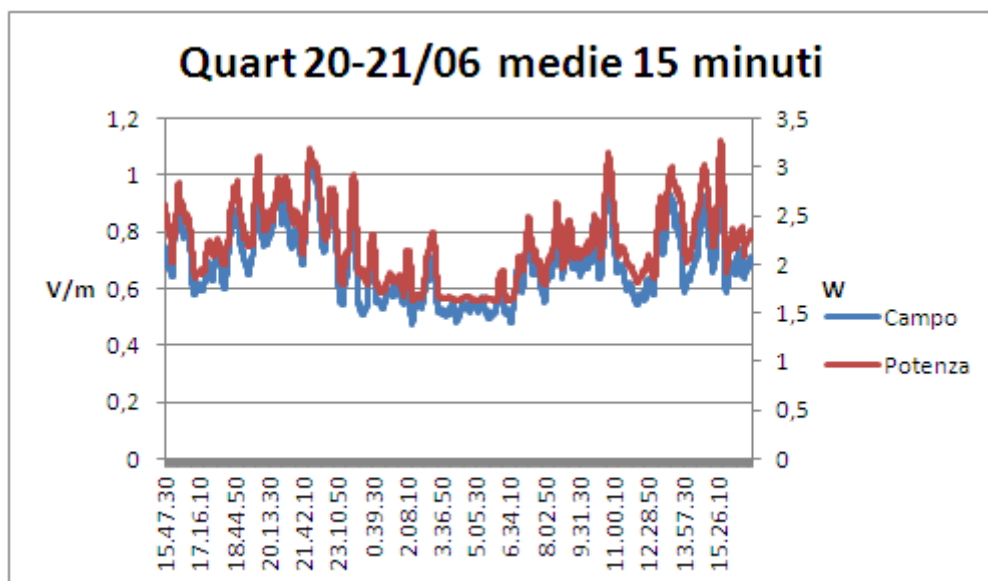


Figura V: Medie su 15 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito QUART – 20\_21/06

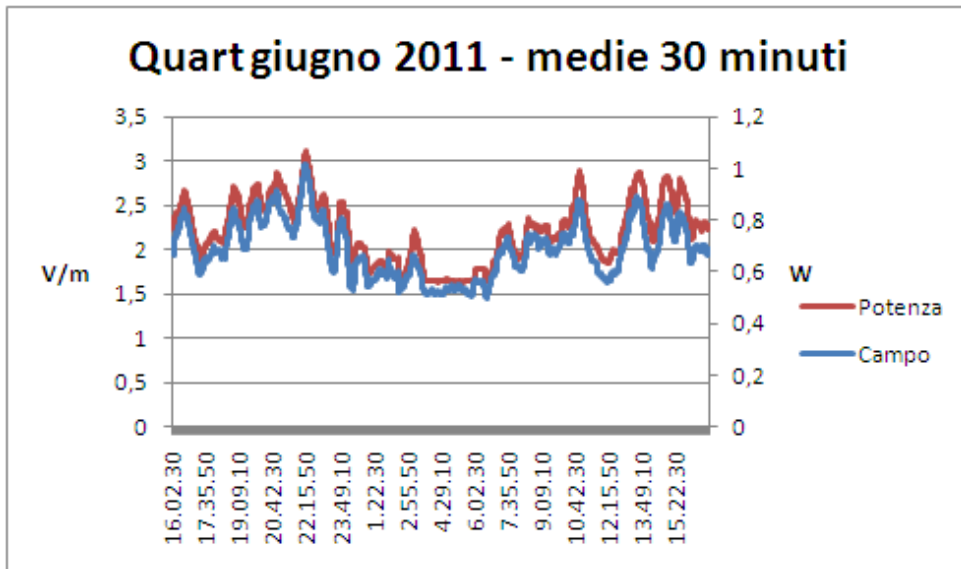


Figura VI: Medie su 30 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito QUART – 20\_21/06

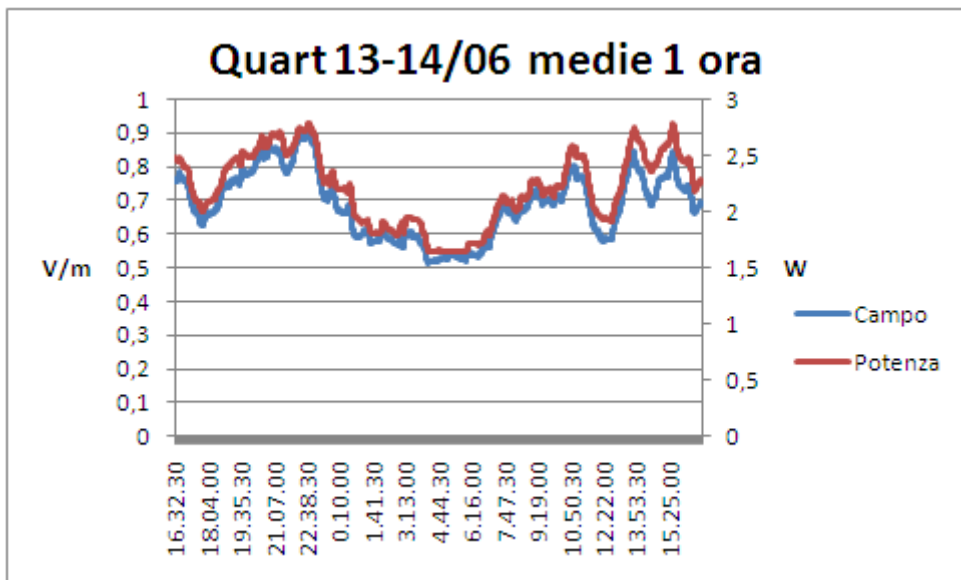


Figura VII: Medie orarie Campo Elettrico e Potenza – sito QUART – 20\_21/06

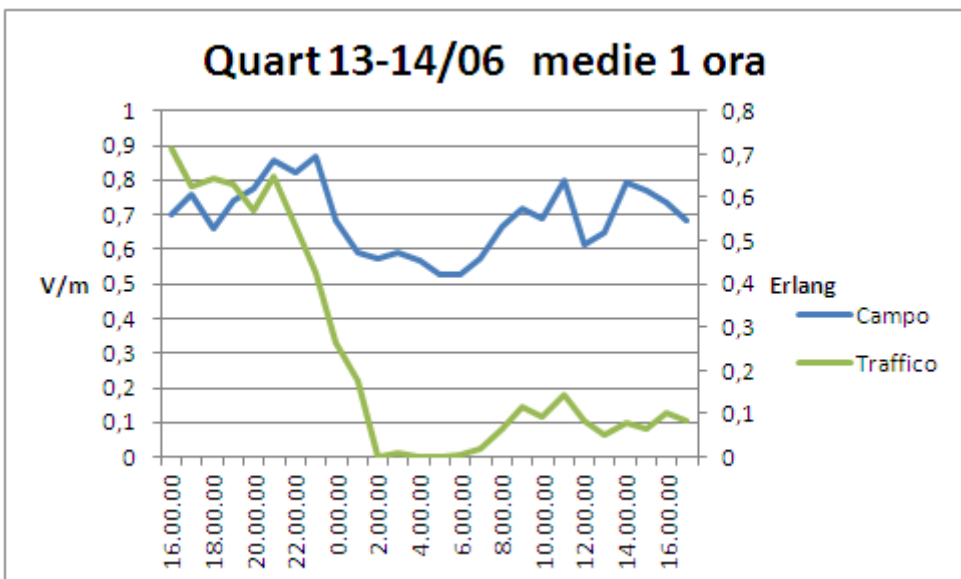


Figura VIII: Medie orarie Campo Elettrico e Traffico – sito QUART – 20\_21/06

b) IVREA 09/06/2011

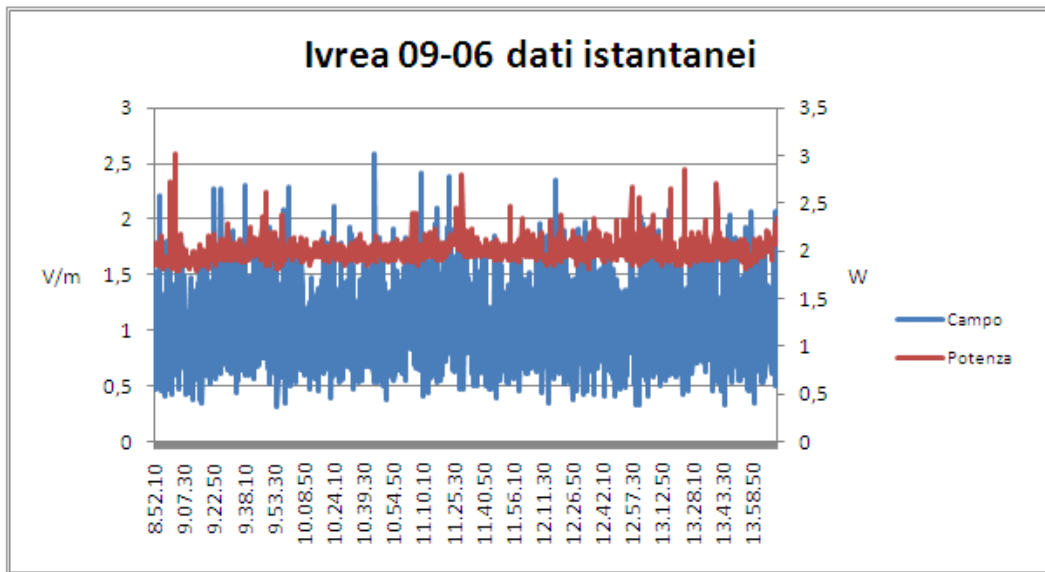


Figura IX: Dati Istantanei Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 09/06

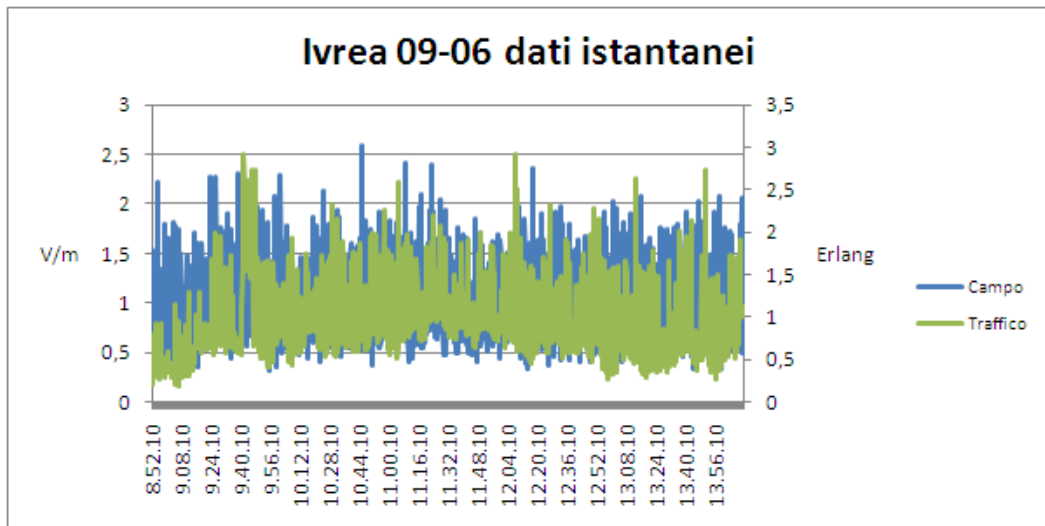


Figura X: Dati Istantanei Campo Elettrico e Traffico – sito IVREA – 09/06

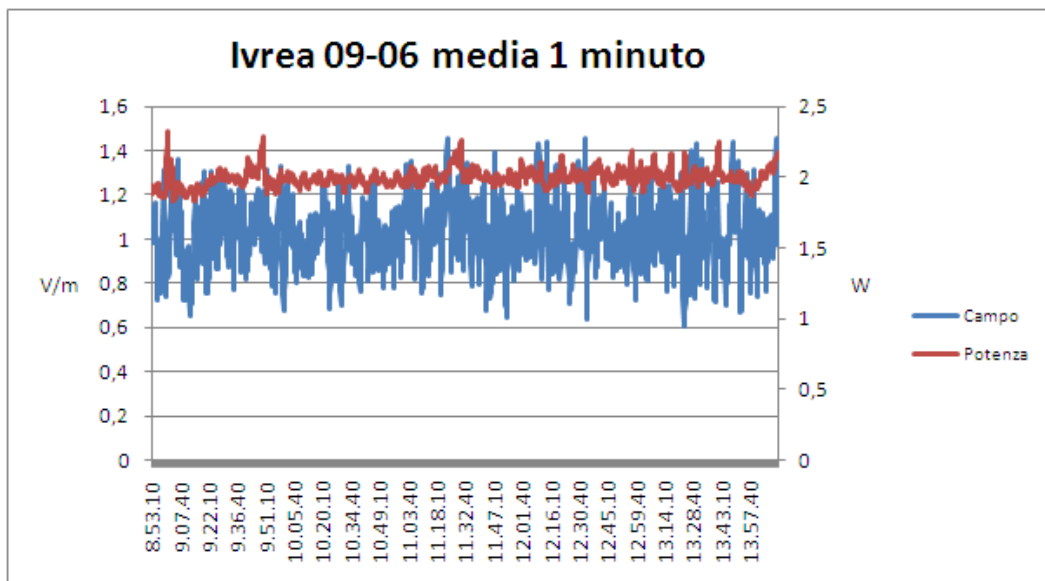


Figura XI: Medie 1 minuto Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 09/06

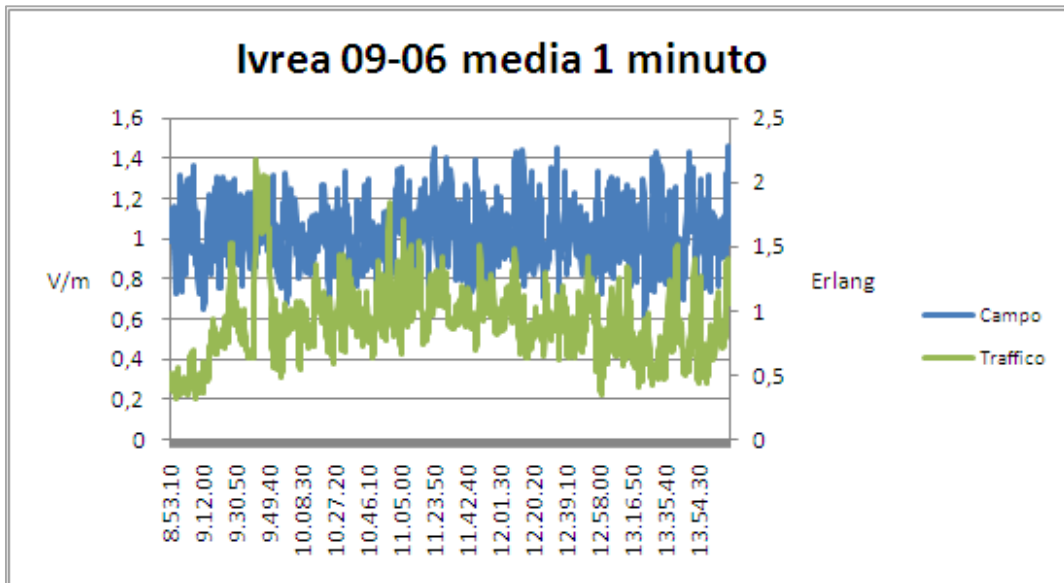


Figura XII: Medie 1 minuto Campo Elettrico e Traffico – sito IVREA – 09/06

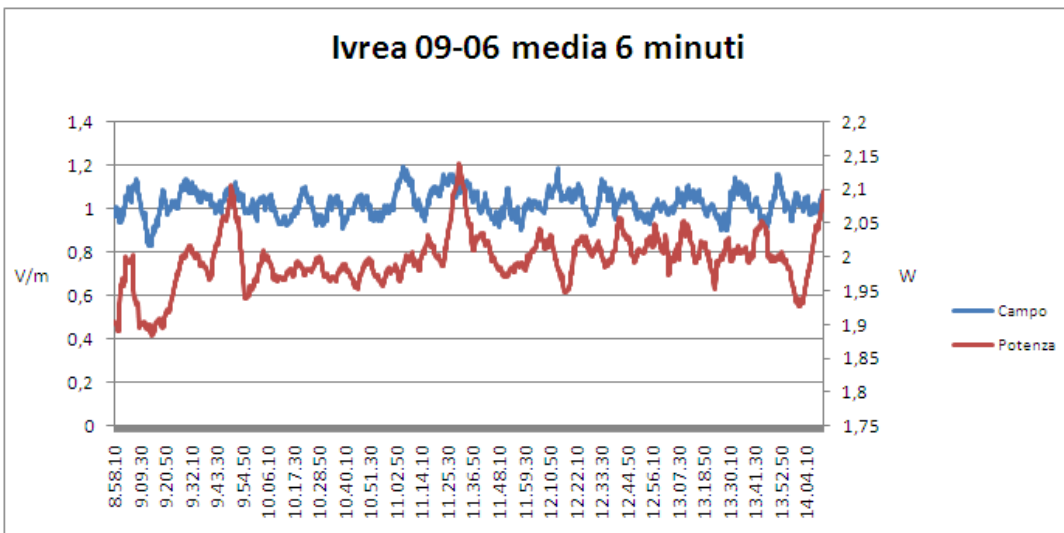


Figura XIII: Medie 6 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 09/06

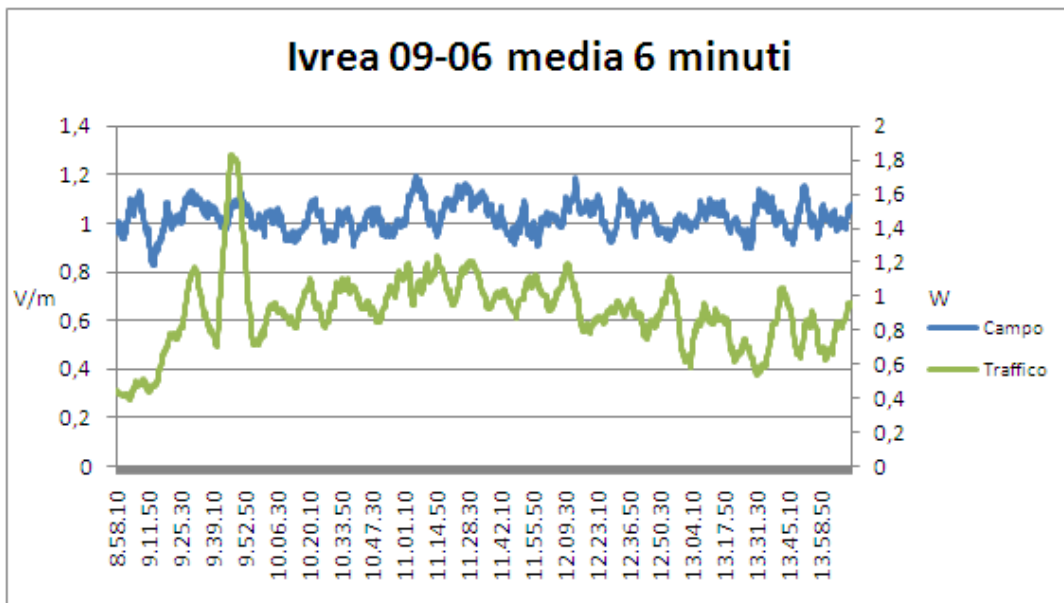


Figura XIV: Medie 6 minuti Campo Elettrico e Traffico – sito IVREA – 09/06

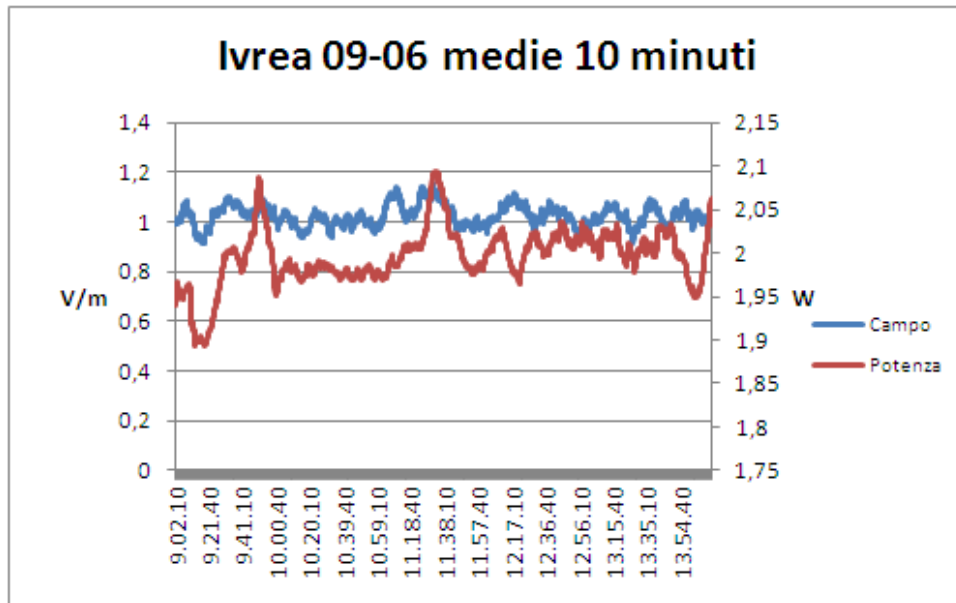


Figura XV: Medie 10 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 09/06

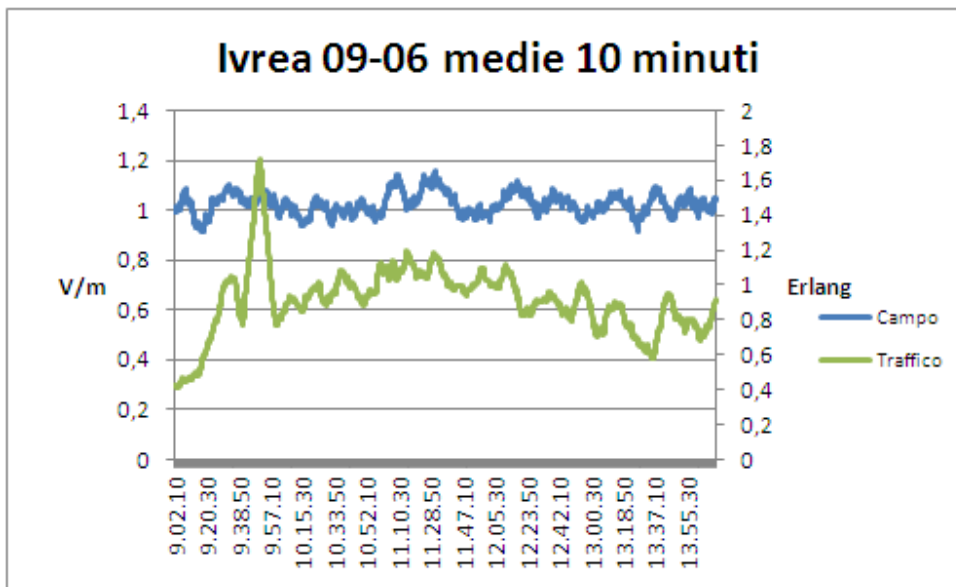


Figura XVI: Medie 10 minuti Campo Elettrico e Traffico – sito IVREA – 09/06

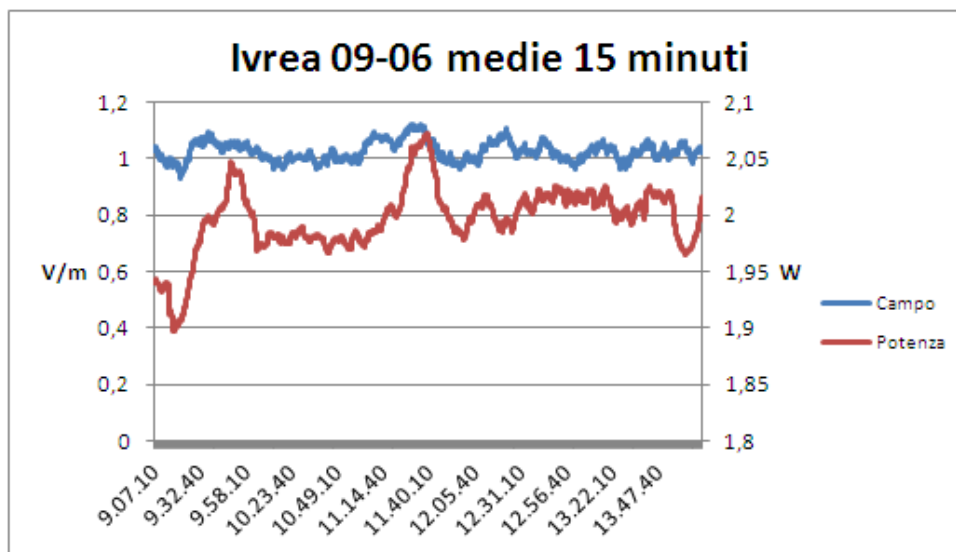


Figura XVII: Medie 15 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 09/06

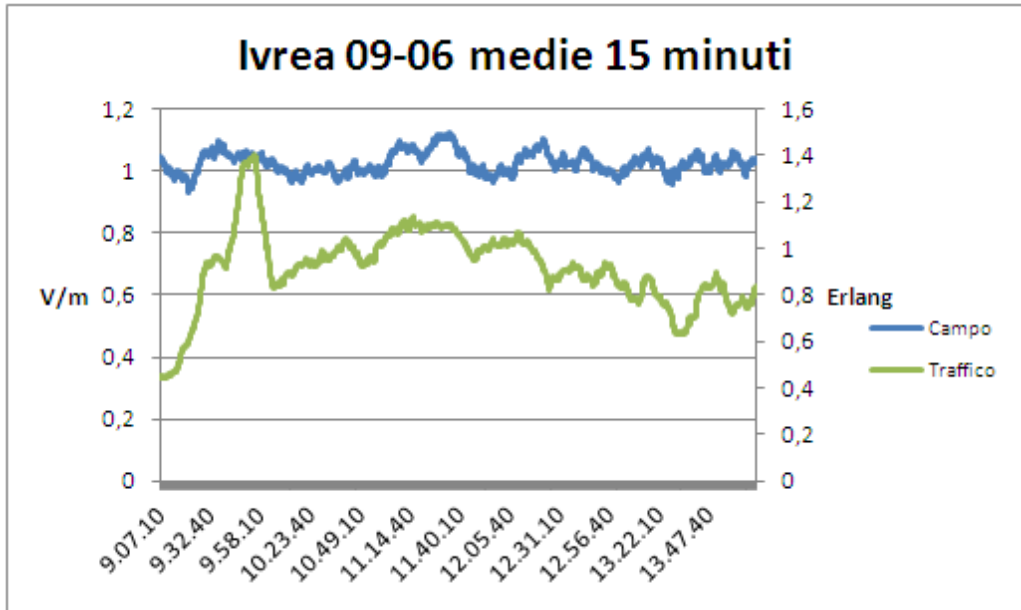


Figura XVIII: Medie 15 minuti Campo Elettrico e Traffico – sito IVREA – 09/06

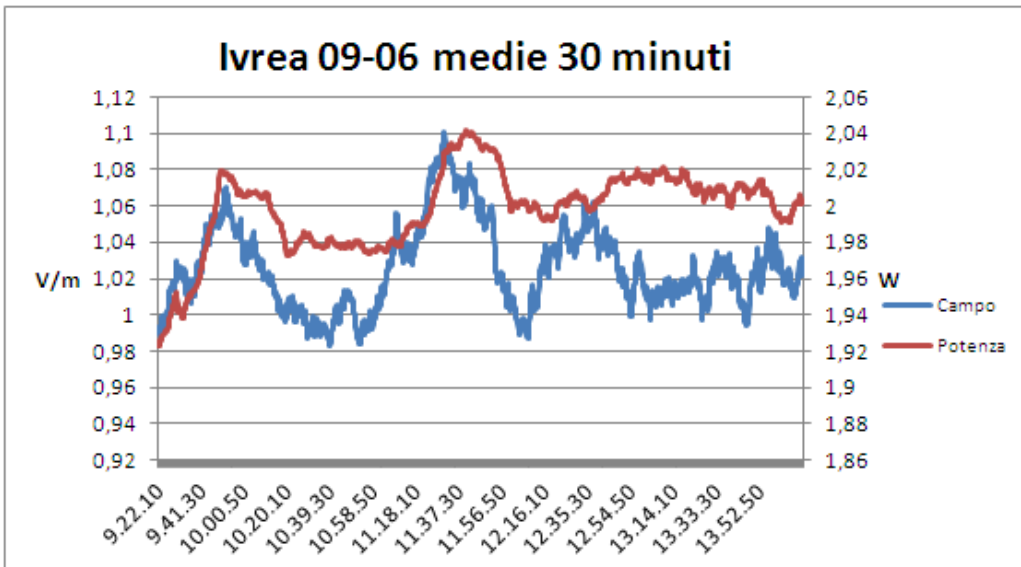


Figura XIX: Medie 30 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 09/06

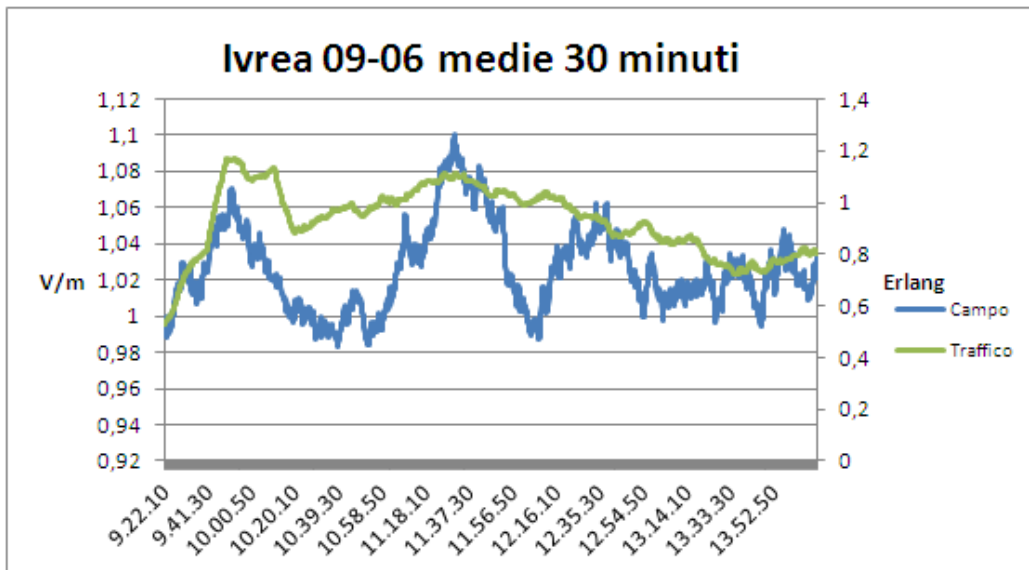


Figura XX: Medie 30 minuti Campo Elettrico e Traffico – sito IVREA – 09/06



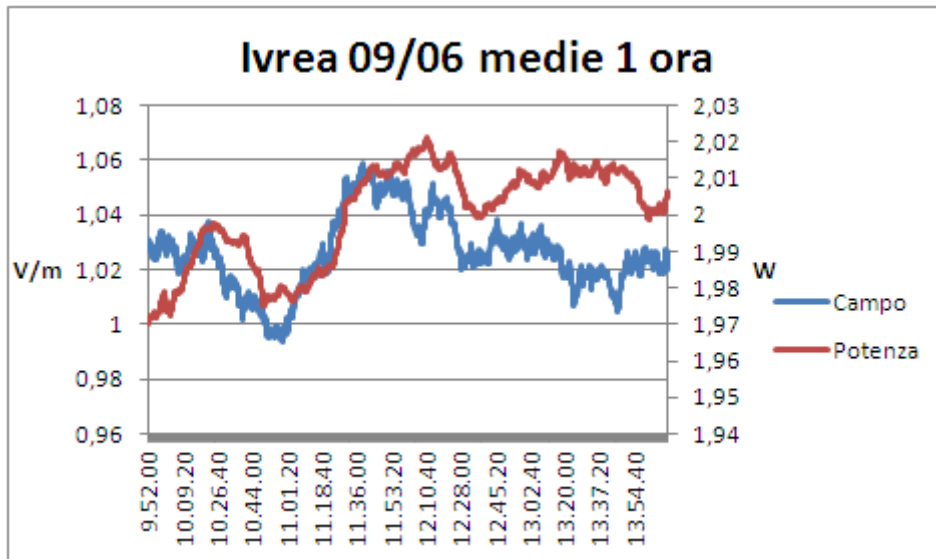


Figura XXI: Medie orarie Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 09/06

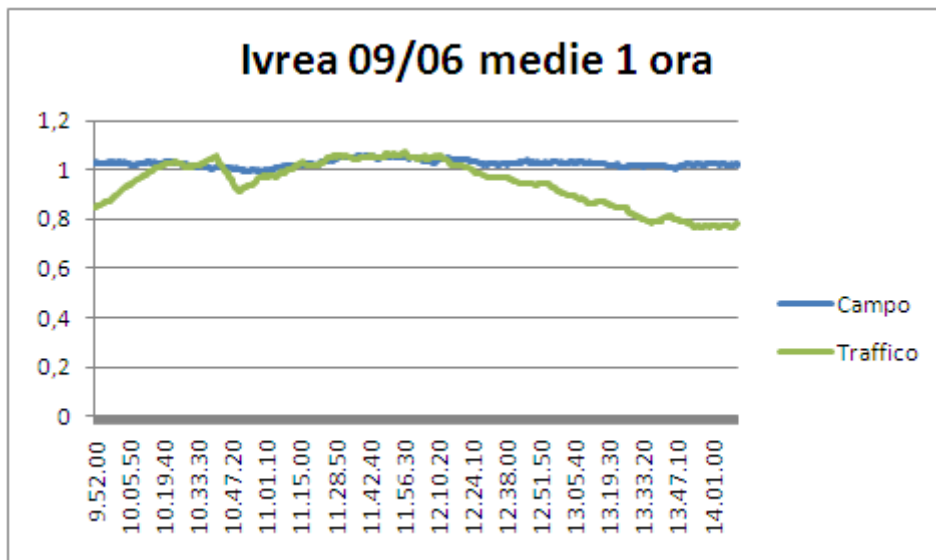


Figura XXII: Medie orarie Campo Elettrico e Traffico – sito IVREA – 09/06

c) IVREA 10/06/2011

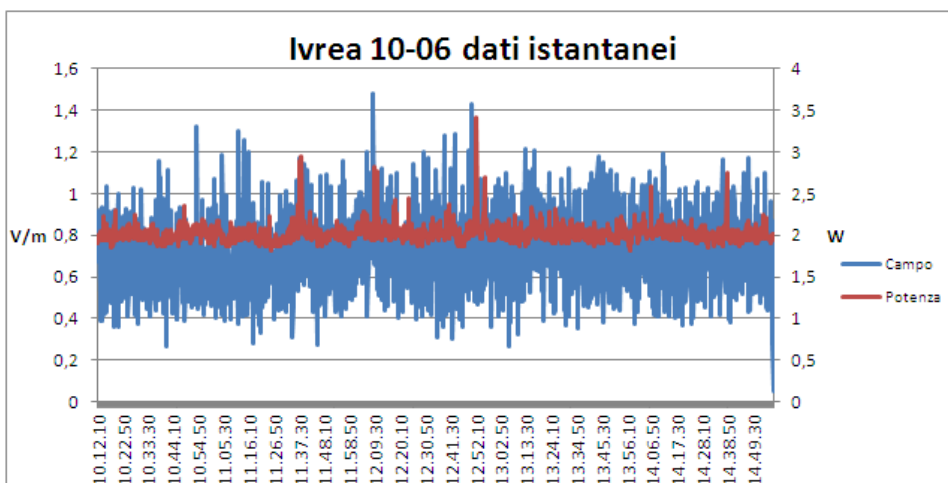


Figura XXIII: Dati Istantanei Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 10/06

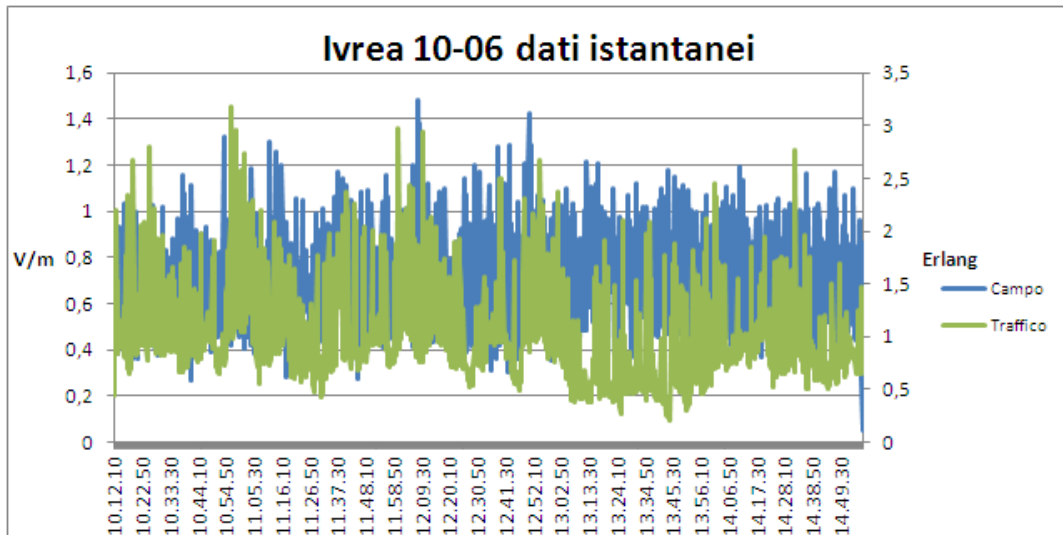


Figura XXIV: Dati Istantanei Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 10/06

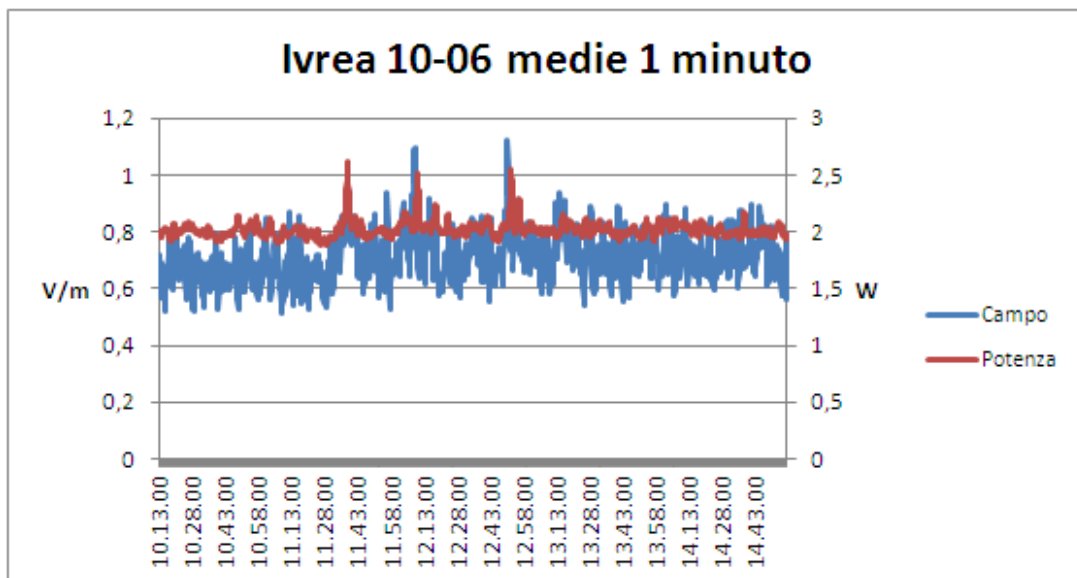


Figura XXV: Medie 1 minuto Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 10/06

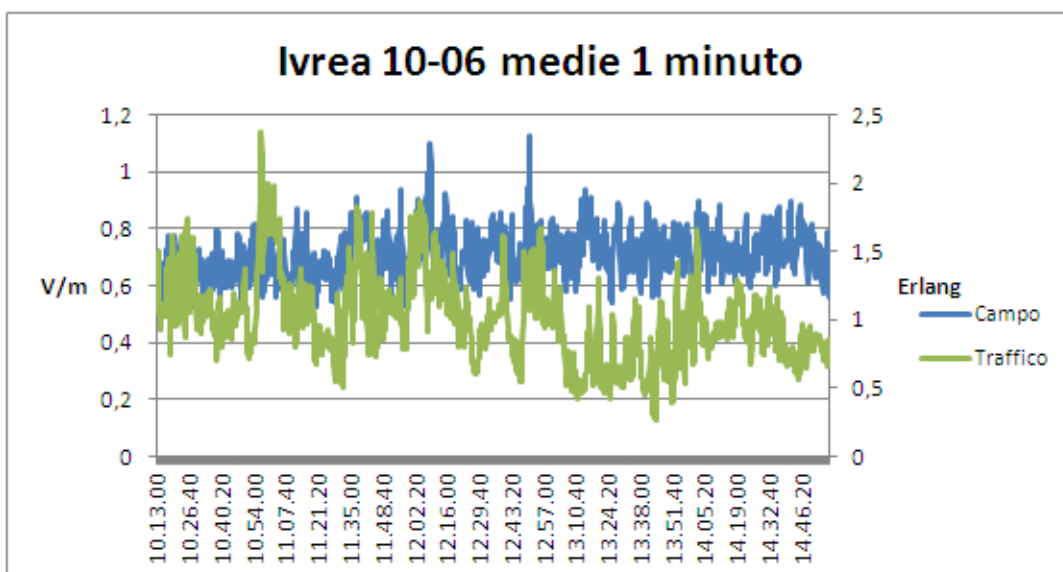


Figura XXVI: Medie 1 minuto Campo Elettrico e Traffico – sito IVREA – 10/06

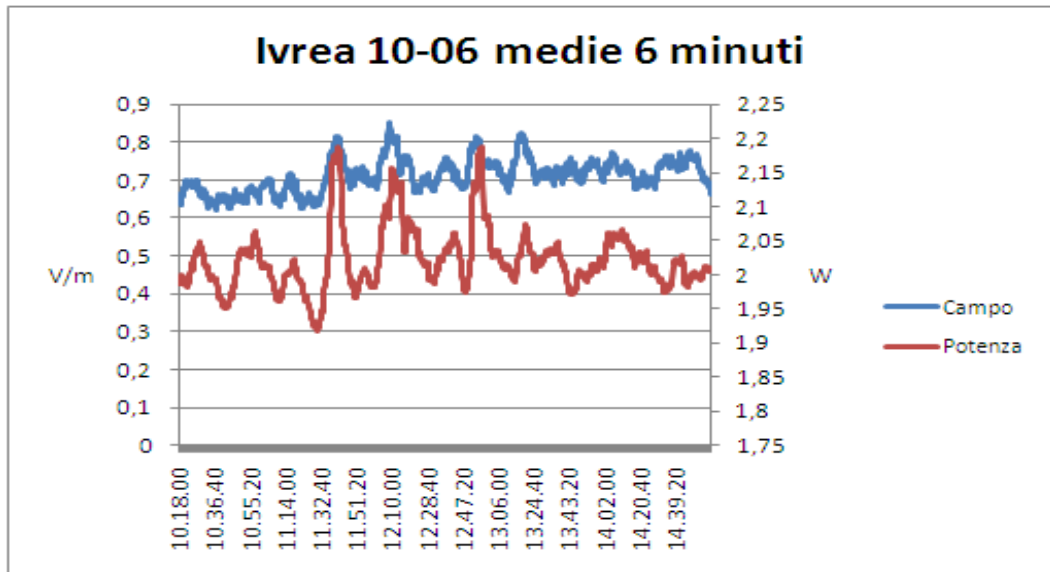


Figura XXVII: Medie 6 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 10/06

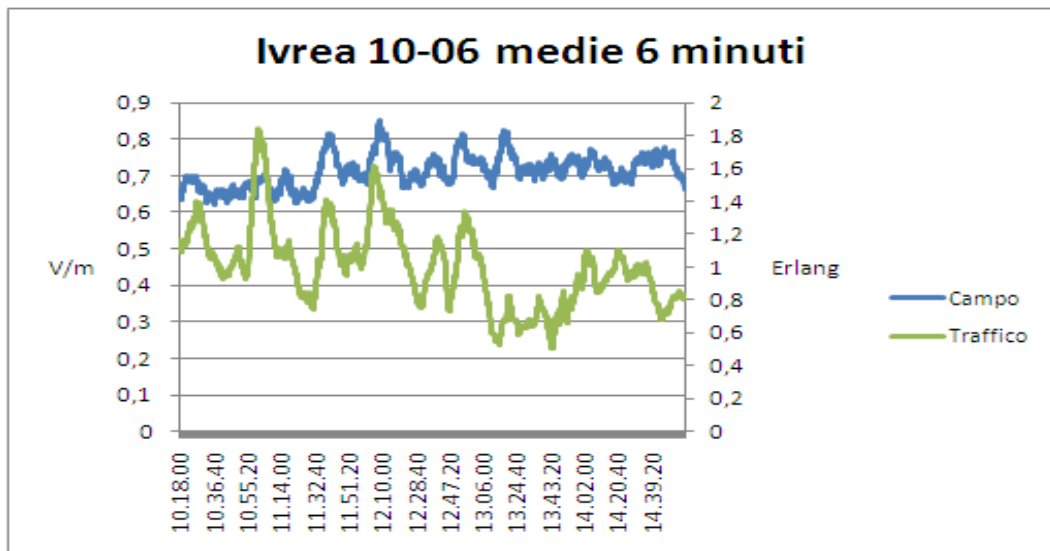


Figura XXVIII: Medie 6 minuti Campo Elettrico e Traffico – sito IVREA – 10/06

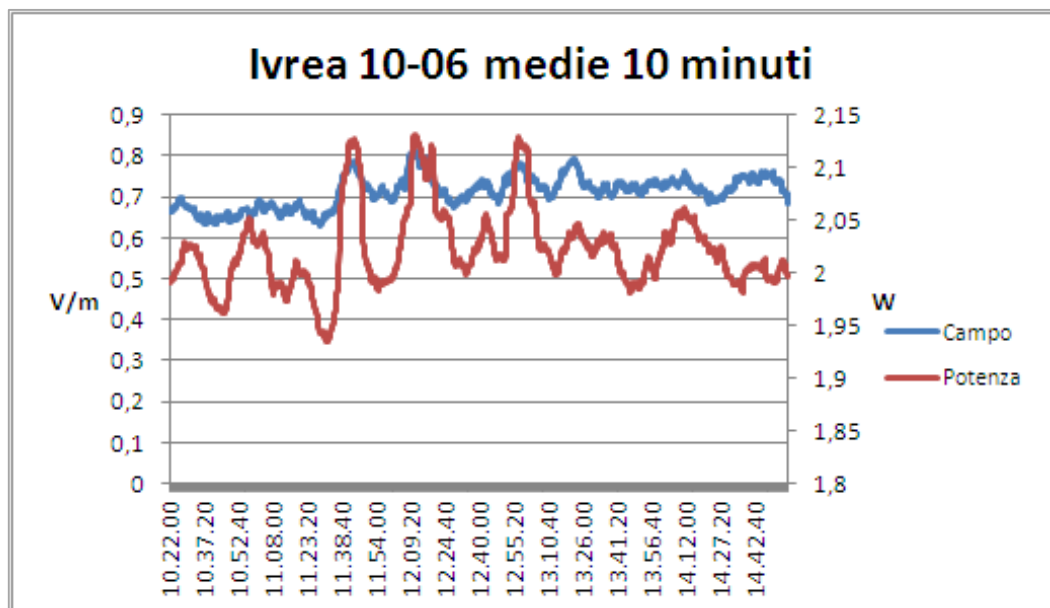


Figura XXIX: Medie 10 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 10/06

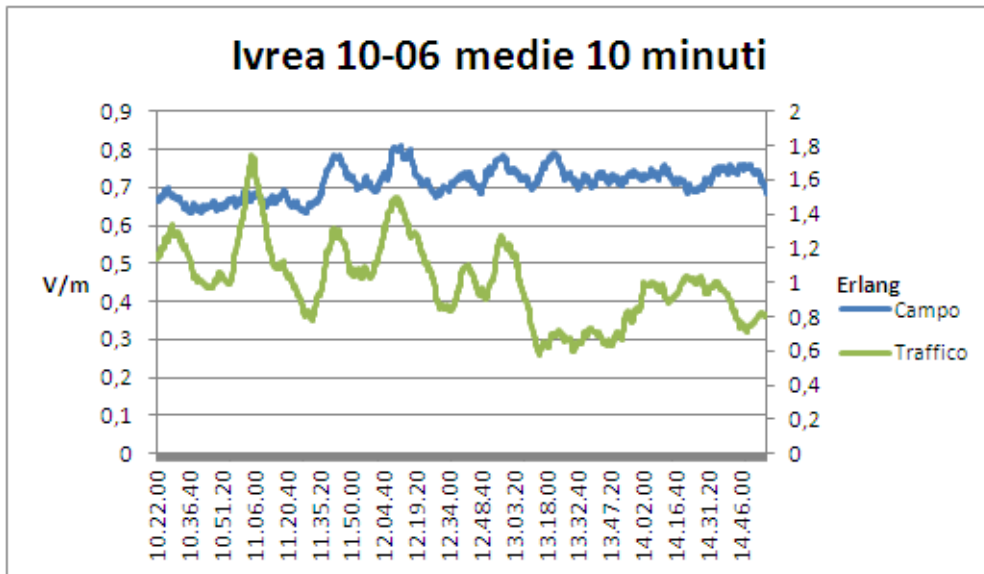


Figura XXX: Medie 10 minuti Campo Elettrico e Traffico – sito IVREA – 10/06

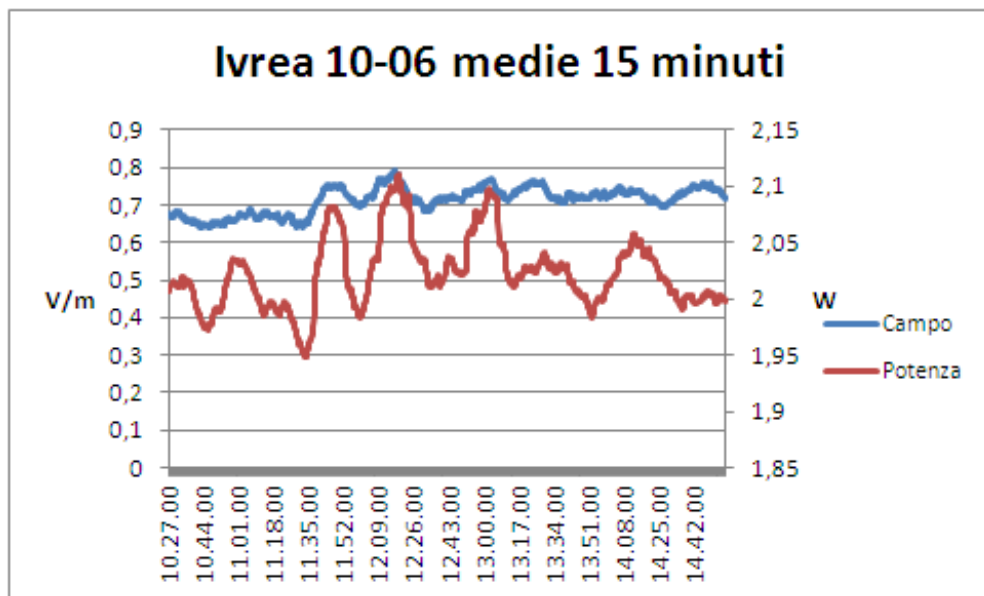


Figura XXXI: Medie 15 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 10/06

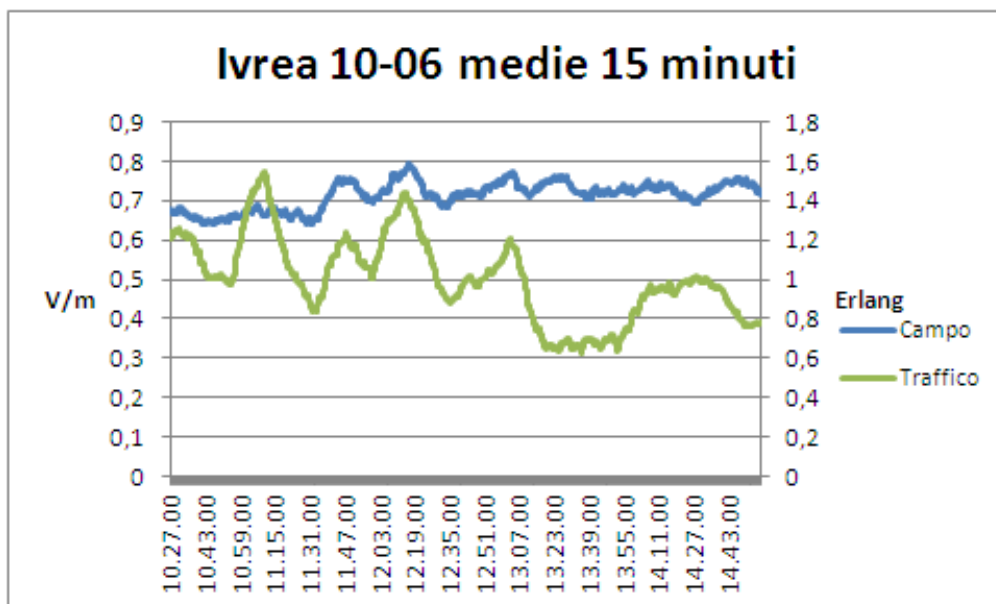


Figura XXXII: Medie 15 minuti Campo Elettrico e Traffico – sito IVREA – 10/06

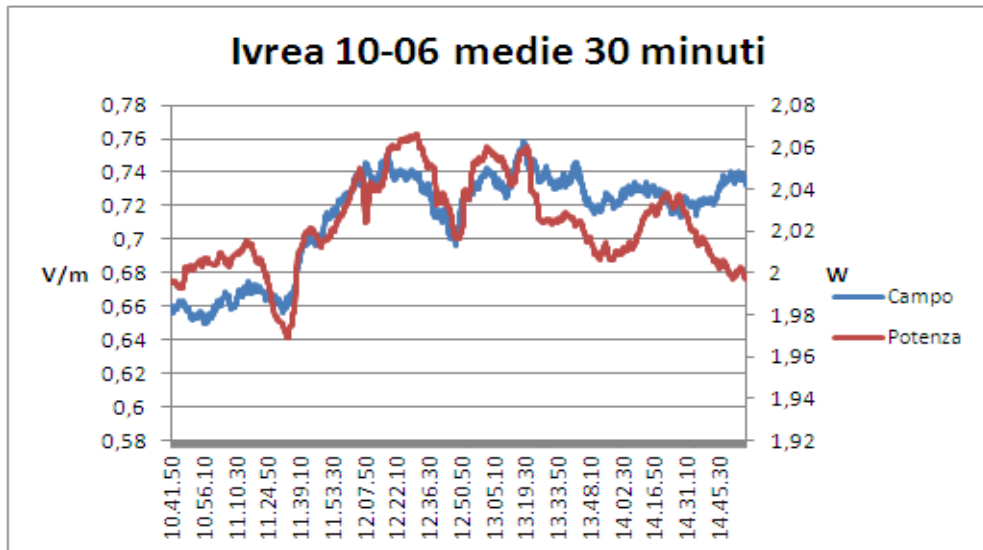


Figura XXXIII: Medie 30 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 10/06

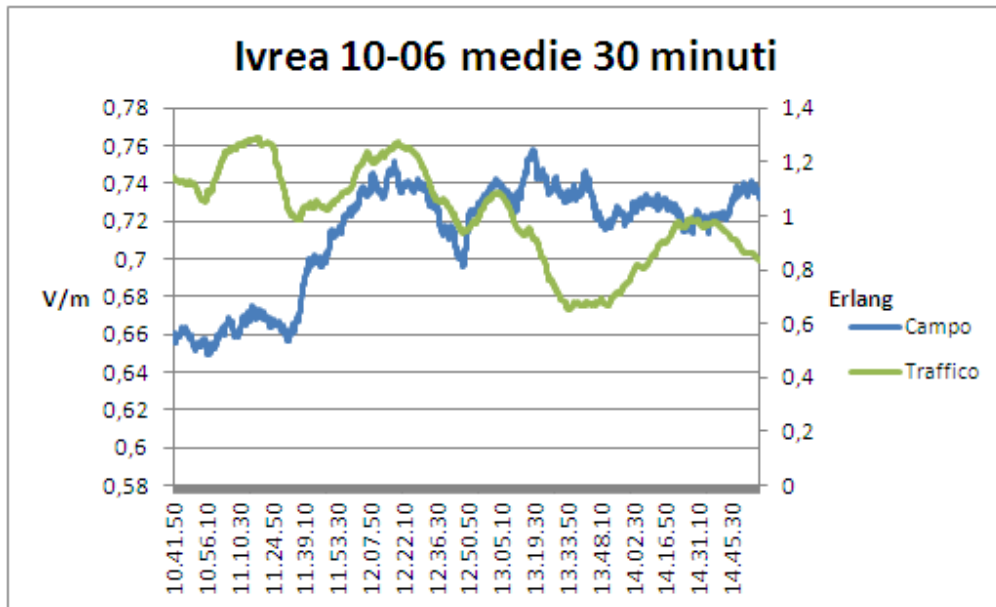


Figura XXXIV: Medie 30 minuti Campo Elettrico e Traffico – sito IVREA – 10/06

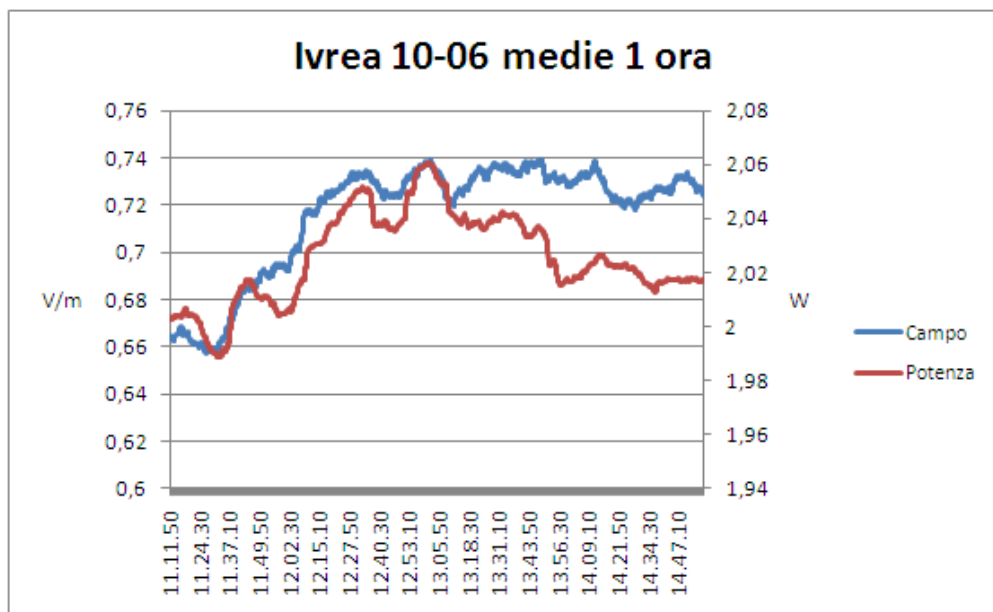


Figura XXXV: Medie orarie Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 10/06

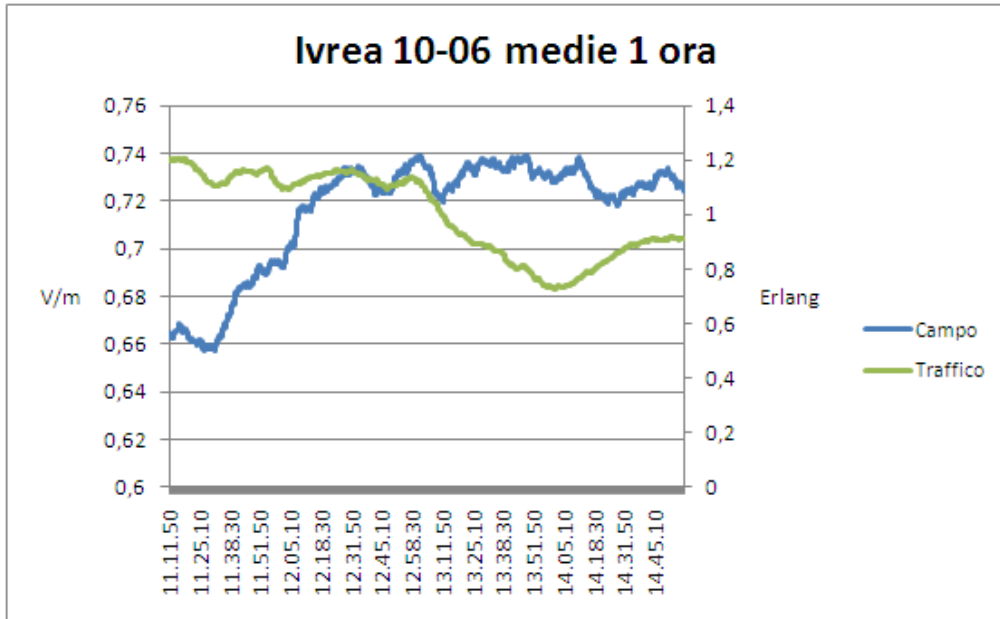


Figura XXXVI: Medie orarie Campo Elettrico e Potenza – sito IVREA – 10/06

d) SAINT VINCENT 12-13/04

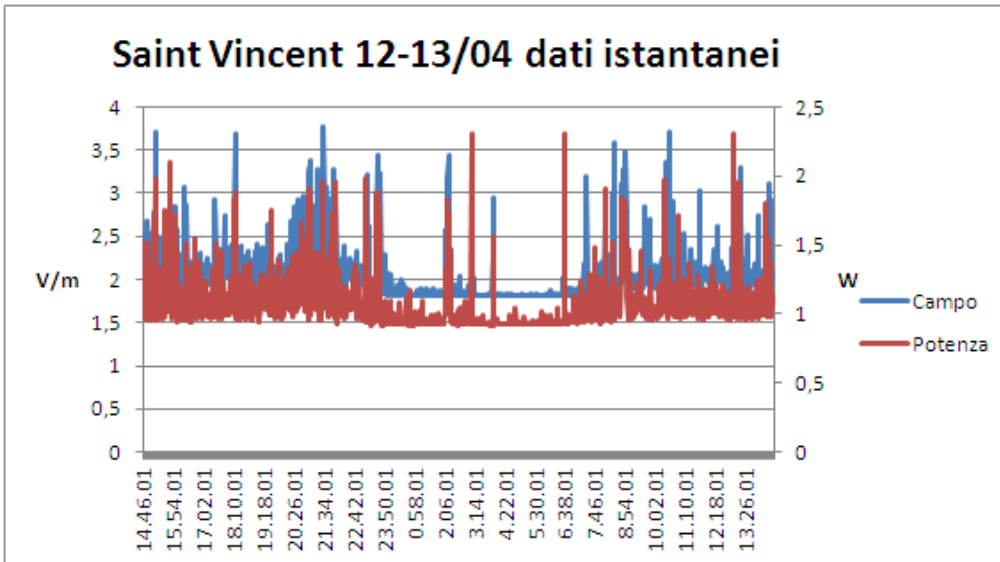


Figura XXXVII: Dati Istantanei Campo Elettrico e Potenza – sito SAINT VINCENT– 12\_13/04

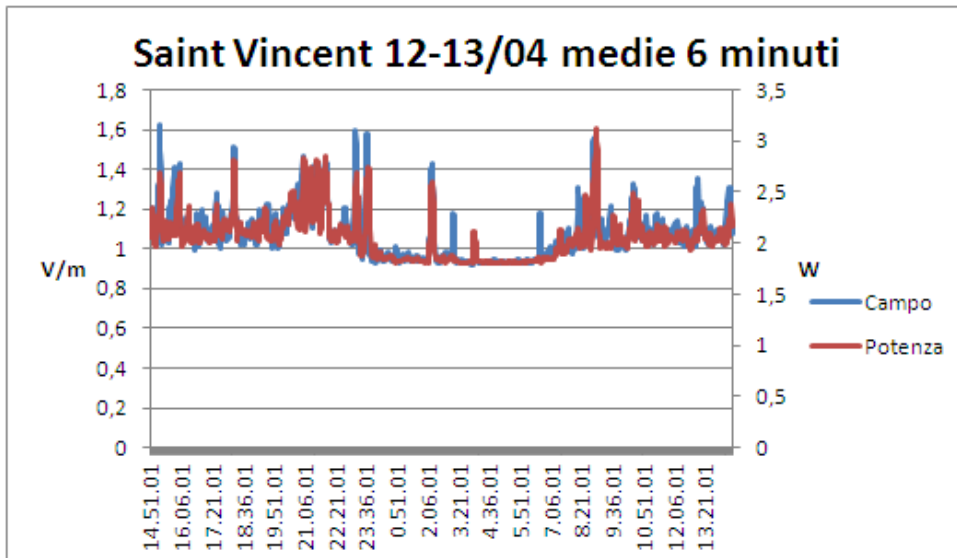


Figura XXXVIII: Medie su 6 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito SAINT VINCENT– 12\_13/04

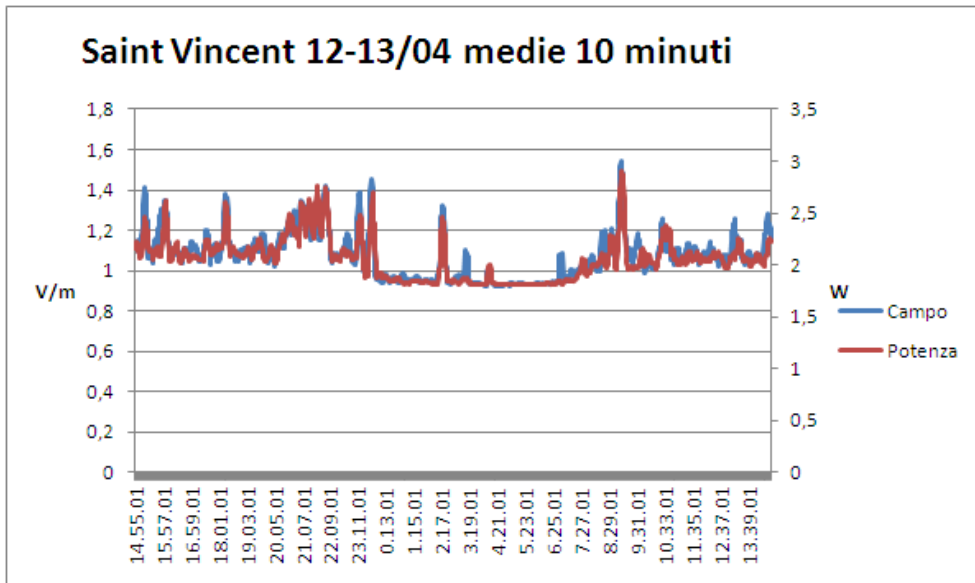


Figura XXXIX: Medie su 10 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito SAINT VINCENT– 12\_13/04

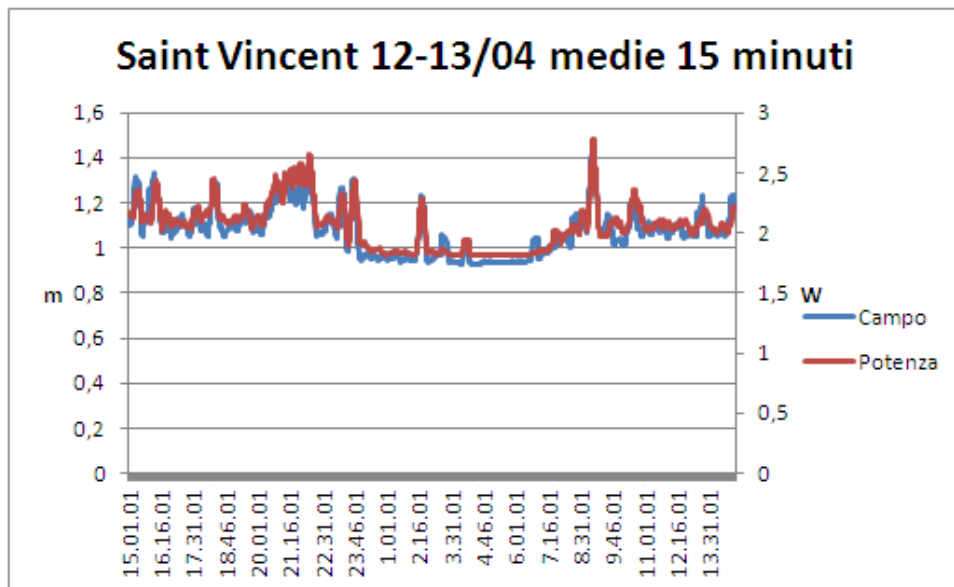


Figura XL: Medie su 15 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito SAINT VINCENT– 12\_13/04

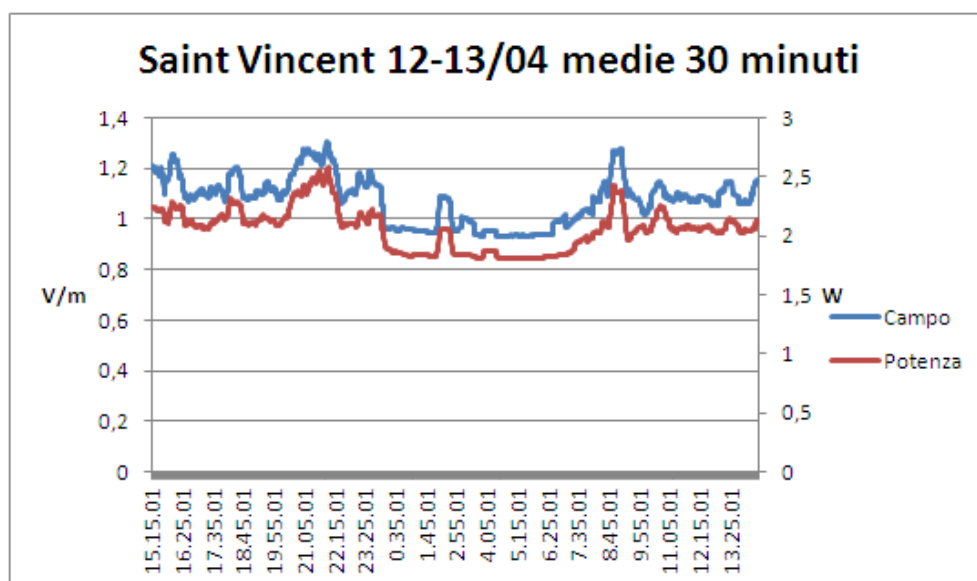


Figura XLI: Medie su 30 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito SAINT VINCENT– 12\_13/04

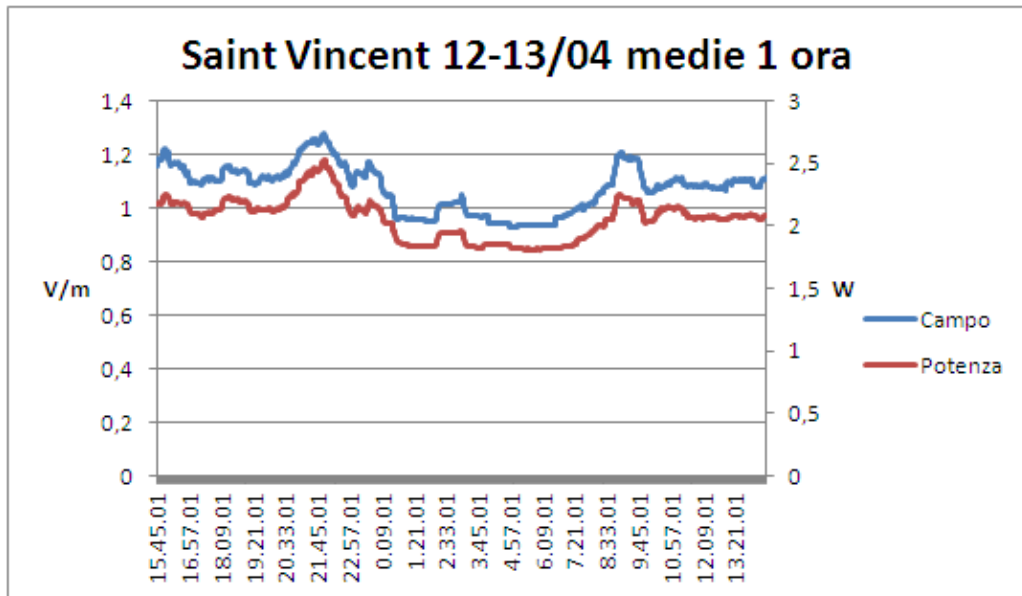


Figura XLII: Medie orarie Campo Elettrico e Potenza – sito SAINT VINCENT– 12\_13/04

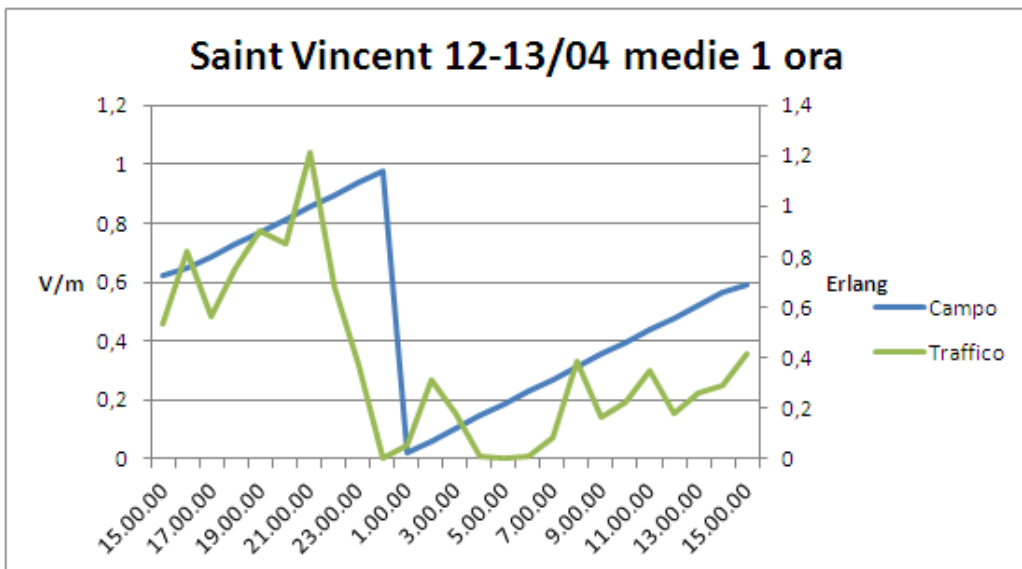


Figura XLIII: Medie orarie Campo Elettrico e Traffico – sito SAINT VINCENT– 12\_13/04



e) SAINT VINCENT 13-14/06

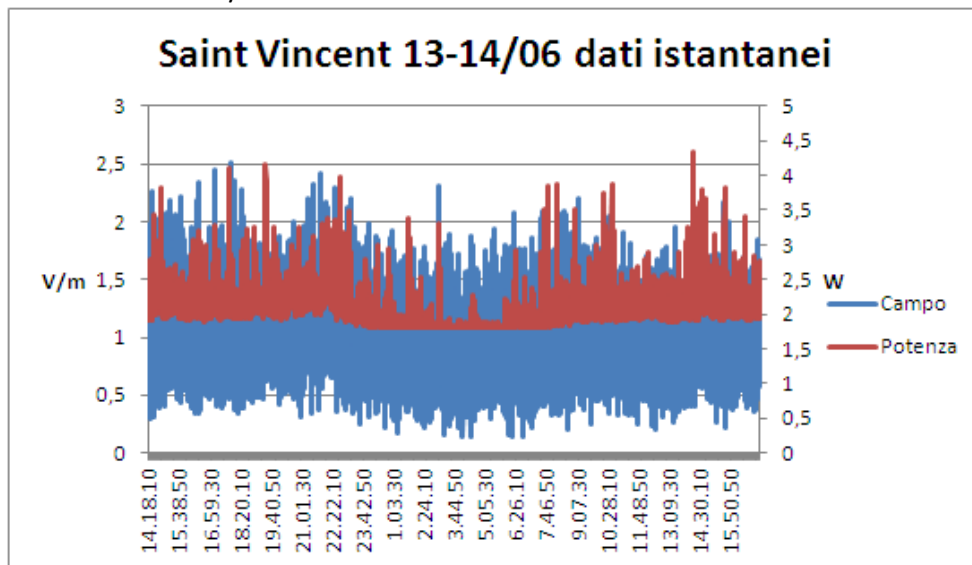


Figura XLIV: Dati Istantanei Campo Elettrico e Potenza – sito SAINT VINCENT– 13\_14/06

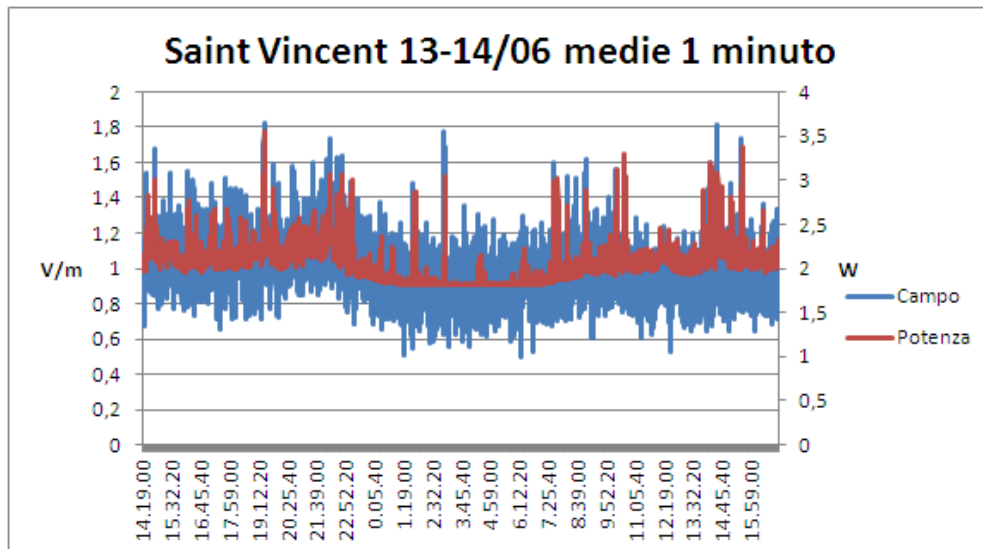


Figura XLV: Medie su 1 minuto Campo Elettrico e Potenza – sito SAINT VINCENT– 13\_14/06

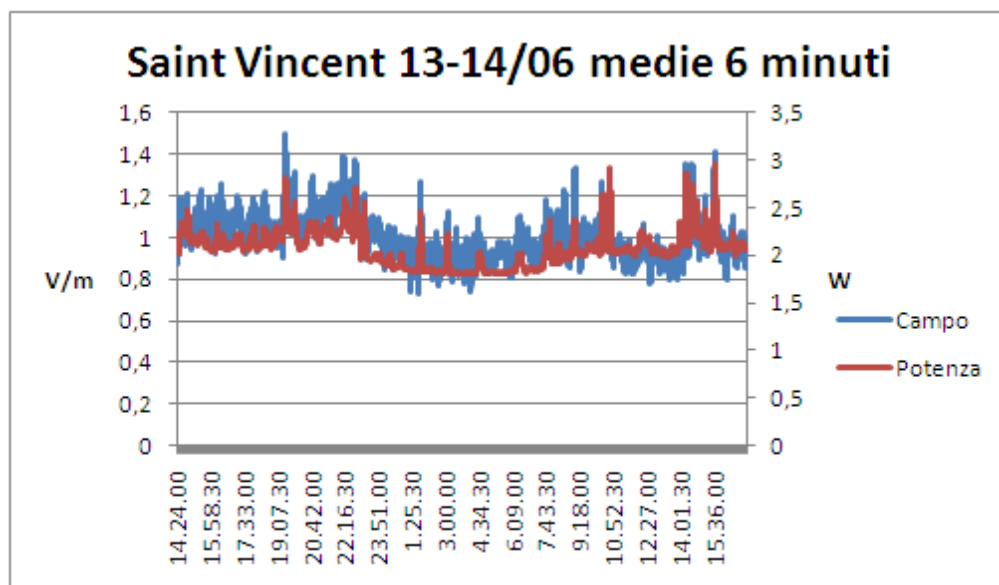


Grafico XLVI: Medie su 6 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito SAINT VINCENT– 13\_14/06

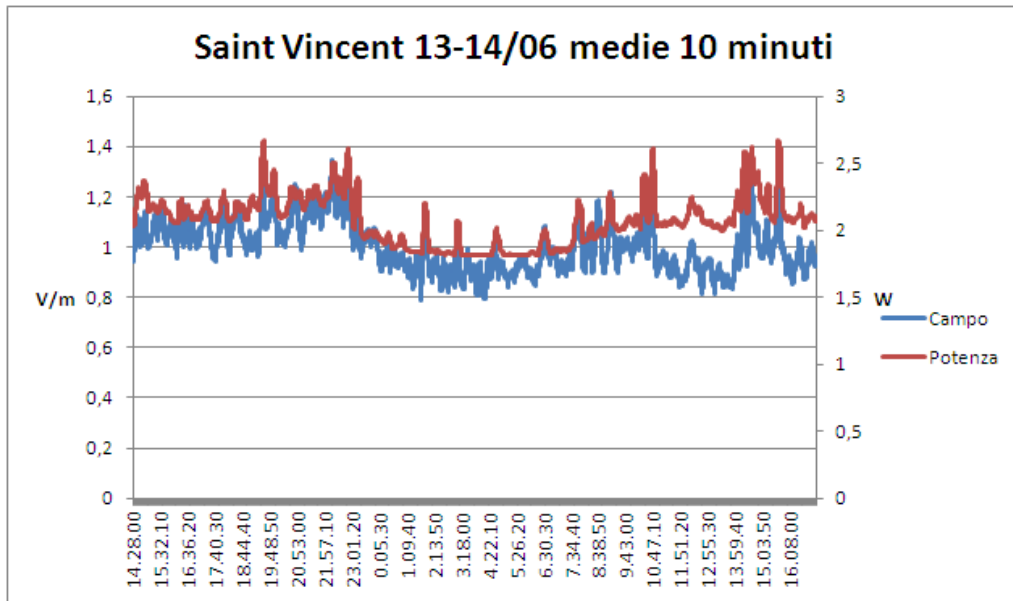


Figura XLVII: Medie su 10 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito SAINT VINCENT– 13\_14/06

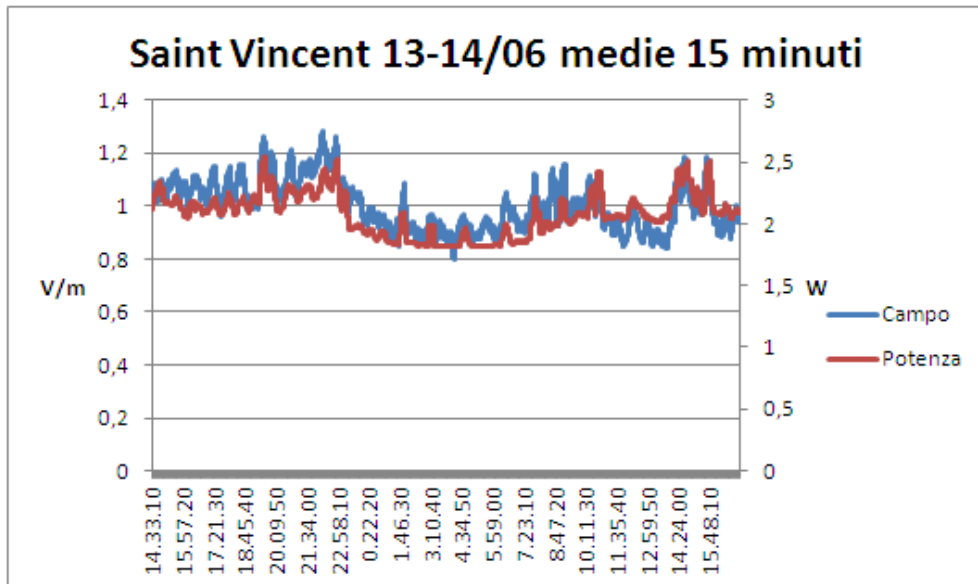


Figura XLVIII: Medie su 15 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito SAINT VINCENT– 13\_14/06

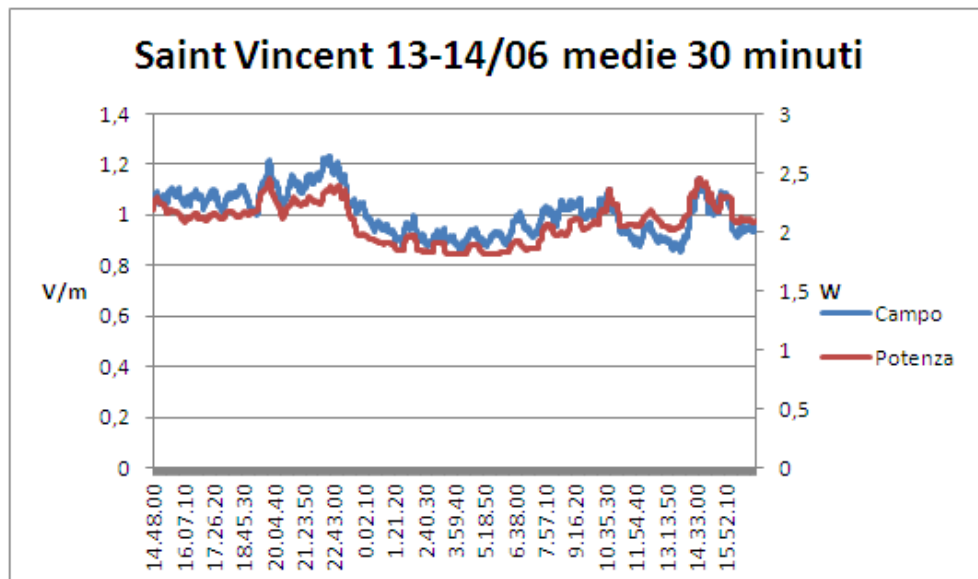


Figura XLIX: Medie su 30 minuti Campo Elettrico e Potenza – sito SAINT VINCENT– 13\_14/06

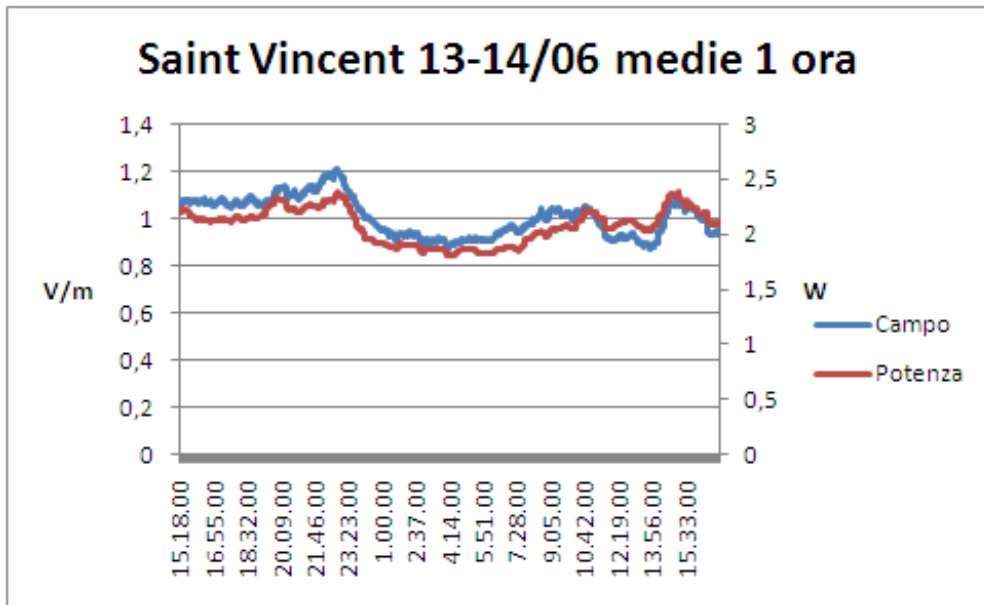


Figura L: Medie orarie Campo Elettrico e Potenza – sito SAINT VINCENT– 13\_14/06

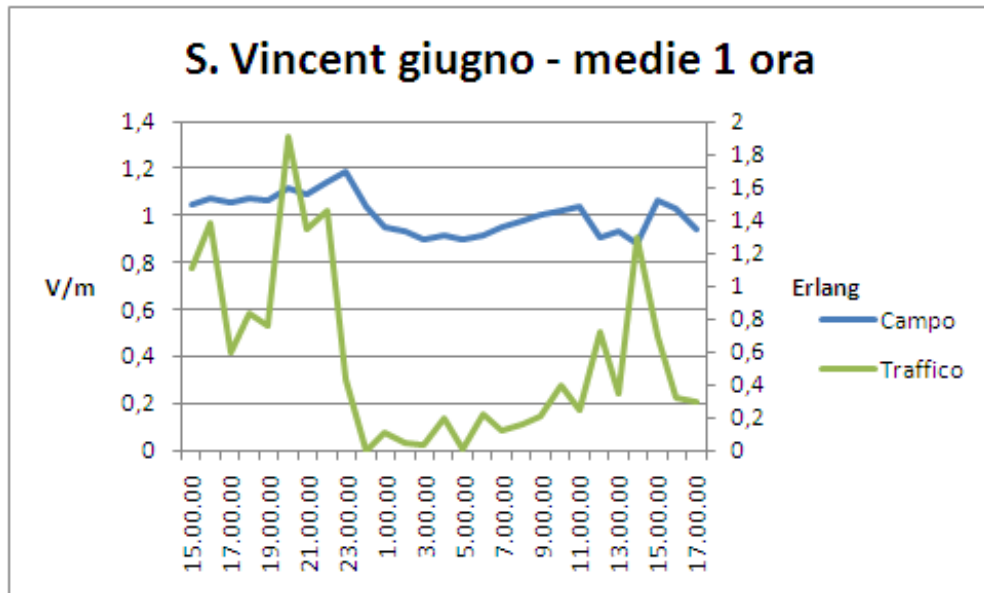


Figura LI: Medie orarie Campo Elettrico e Traffico – sito SAINT VINCENT– 13\_14/06

# BIBLIOGRAFIA

---

## Siti internet:

<http://www.arpa.vda.it>  
<http://www.itis-molinari.eu>  
<http://www.tuttomotorola.it>  
<http://www.arpa.emr.it>  
<http://www.aldena.it>  
<http://www.polito.it>  
<http://www.unimi.it>  
<http://www.mueseoscienza.org>  
<http://www.nonsolotelefonii.it>

## Testi:

D. Andreuccetti, M. Bini, A. Checcucci, A. Ignesti, L. Millanta, R. Olmi, N. Rubino **“Protezione Dai Campi Elettromagnetici Non Ionizzanti”**, CNR – Istituto Di Ricerca **Sulle Onde Elettromagnetiche “Nello Carrara”** (IROE), 3<sup>a</sup> edizione (2001).

CT211 CEI **“Guida Per La Misura E La Valutazione Dei Campi Elettromagnetici Nell’intervallo Di Frequenza 10 KHz ÷ 300 GHz, Con Riferimento All’esposizione Umana”**, CEI 211-7 (2001).

L. Anglesio **“Guida Tecnica Per La Misura Dei Campi Elettromagnetici Compresi Nell’intervallo Di Frequenza 100 KHz ÷ 3 GHz In Riferimento All’esposizione Della Popolazione”**, ANPA (2000).

Seminario ANPA **“La Terza Generazione Di Comunicazioni Mobili: La Tecnologia UMTS”**, Roma 9 luglio 2002.

CEI SC 106B GDL **“Stazioni radio base – Appendice H: metodologie di misura per segnali UMTS”**.

G. Licita, D. Palazzuoli, A.S. Ricci, A.M. Silvi **“Misura Di Segnali UMTS Attraverso Analizzatore Di Spettro Digitale”**, Atti Del Convegno **“Dal Monitoraggio Degli Agenti Fisici Sul Territorio Alla Valutazione Dell’esposizione Ambientale”**, Villa Gualino (Torino) 29 – 31 ottobre 2003.

ICNIRP STATEMENT **“Guidelines For Limiting Exposure To Time-Varying Electric And Magnetic Fields”** (1 Hz TO 100 kHz) (1998)

CT211 CEI **“Guida Alla Realizzazione Di Una Stazione Radio Base Per Rispettare I Limiti Di Esposizione Ai Campi Elettromagnetici In Alta Frequenza - Appendice G: Valutazione Dei Software Di Calcolo Previsionale Dei Livelli Di Campo**

***Elettromagnetico - Appendice H: Metodologie Di Misura Per Segnali UMTS***" CEI 211-10 (2006)

HEALTH PHYSICS 99(5): 631- 638 ***"Influence Of Mobile Phone Traffic On Base Station Exposure Of The General Public"*** (2010)

HEALTH PHYSICS 95(5):529-542 ***"In-Situ Measurement Procedure For Temporal RF Electromagnetic Field Exposure Of The General Public"*** (2009)

A. CECCONELLI A. TOMMASINI ***"Telecomunicazioni – Tecniche Di Trasmissione E Sistemi Di Telecomunicazione"*** ED. CALDERINI EDAGRICOLE (2001)

F. MARINUZZI F. TORTORETO ***"GPRS, UMTS, Wi-Fi E Le Tecnologie Di IV Generazione"*** ED. FRANCO ANGELI (2003)

M. ALONSO E. J. FINN ***"Fisica - Corso Per L'università"*** ED. MASSON (1995)

A. MANNI ***"Wireless Communication – Evoluzione Della Comunicazione Mobile Personale Dal GSM All'UMTS"*** ED. CALDERINI (2002)

G. COLUMPSI; M. LEONARDI; A. RICC ***"UMTS – Tecniche E Architetture Per Le Reti Di Comunicazioni Mobili Multimediali"*** Ed. Hoepli (2005)