

# Appunti di Compatibilità Elettromagnetica Concetti generali

|  |   |
|--|---|
| Introduzione .....   | 1 |
| Aspetti della compatibilità elettromagnetica .....                         | 3 |
| <i>Emittenti intenzionali e emittenti involontarie</i> .....               | 3 |
| <i>Metodi generali di prevenzione delle interferenze</i> .....             | 4 |
| <i>Emissioni radiate o condotte. Suscettività radiata o condotta</i> ..... | 5 |
| <i>Scariche elettrostatiche (ESD)</i> .....                                | 8 |
| <i>Impulsi elettromagnetici (EMP)</i> .....                                | 8 |
| <i>Effetti dei fulmini</i> .....   | 9 |

## INTRODUZIONE

Nei primi anni in cui furono utilizzate le *comunicazioni radiotelegrafiche*, ci si rese subito conto che i cosiddetti *spinterometri* generavano onde elettromagnetiche, con componenti spettrali su un ampio spettro, che causavano **interferenze** in vari dispositivi elettronici come *ricevitori radio* o *apparecchiature telefoniche*. Al giorno d'oggi, sono diventate numerose le **sorgenti di emissioni elettromagnetiche** di livello tale da causare interferenze (ovviamente non volute) con i suddetti dispositivi:

- ad esempio, tra le *sorgenti ad ampio spettro* citiamo fulmini, relé, motori in corrente continua e luci fluorescenti;
- tra le *sorgenti a spettro stretto*, invece, spiccano le **linee di trasmissione dell'energia elettrica**, che generano emissioni elettromagnetiche alla frequenza di rete (che è di 50 Hz in Europa e di 60 Hz in America) ed alle sue armoniche;
- tipiche sorgenti di onde elettromagnetiche sono inoltre le **emittenti radio**, che trasmettono le proprie informazioni (voci, musica, ecc.) codificandole su una frequenza portante (si parla notoriamente di tecniche di trasmissione con *modulazione di ampiezza* - AM - o *modulazione di frequenza* - FM); i **ricevitori radio** intercettano queste onde, le amplificano ed estraggono l'informazione codificata nel segnale;
- altre sorgenti di onde sono i **trasmettitori degli impianti radar** (RADAR sta per *Radio Detection and Ranging*) che emettono impulsi di una portante monofrequenziale, secondo un ben noto meccanismo. Il contenuto spettrale degli *impulsi radar* è distribuito su una banda di frequenze, centrata ovviamente su una portante, di ampiezza anche maggiore rispetto a quella delle trasmissioni radio;
- un'altra sorgente di emissioni elettromagnetiche è costituita dai **dispositivi elettronici digitali** in generale e, in particolare, dai **computer**. Questi dispositivi digitali utilizzano *forme d'onda impulsive* di tensione per rappresentare i numeri binari: il livello alto è associato,

ad esempio, all' 1 logico mentre il livello basso è associato allo 0 logico<sup>1</sup>. In tal modo, i numeri e gli altri simboli vengono rappresentati mediante *sequenze di forme d'onda elementari*. Il **tempo di transizione** tra i due possibili livelli di un segnale digitale è il più importante fattore di determinazione del contenuto spettrale del segnale: infatti, quando più breve è tale tempo di transizione (cioè quanto più veloce è la transizione), tanto più ampio è lo spettro di frequenza occupato dal segnale in questione. Proprio il fatto di occupare uno spettro molto ampio fa' sì che questo tipo di segnali possano causare interferenze in altri dispositivi elettrici ed elettronici.

In questi capitoli *ci occupiamo proprio delle emissioni elettromagnetiche che sono causa di fenomeni di interferenza nei dispositivi elettrici ed elettronici*. Tanto per fare un esempio classico, è noto che i **fulmini** provocano rilevanti fenomeni di interferenza sulle onde radio in modulazione di ampiezza. Il motivo di ciò è il seguente: i fulmini sono correnti elettriche di elevatissima intensità e con uno spettro molto ampio; alcune delle componenti spettrali di queste correnti riescono a passare attraverso il filtro di ingresso dei ricevitori radio, sovrapponendosi così al segnale desiderato (cioè producendo **rumore**). Una tipica manifestazione di questo fenomeno si ha quando l'apparecchio radio non è sintonizzato su una particolare trasmittente, ma si ode ugualmente un segnale spurio (ovviamente irriconoscibile), prodotto appunto dall'interferenza.

Quello appena citato è un tipico esempio di interferenze prodotte su un ricevitore intenzionale, ossia un apparato appositamente predisposto per la ricezione di segnali. Diverso, ma ugualmente importante, è invece il caso di interferenze prodotte su ricevitori non intenzionali, ossia apparati non predisposti per la ricezione dei segnali: ad esempio, se un computer lavora a distanza non elevata da una stazione radio in modulazione di frequenza o da una trasmittente televisiva, i segnali prodotti da tali stazioni possono essere di livello tale da essere *captati* dal computer stesso<sup>2</sup>, il quale potrebbe interpretarli come degli impulsi (di dati o di controllo), con conseguenti anomalie di funzionamento. Può capitare anche il contrario, ad esempio se c'è un televisore vicino al computer: le emissioni dovute ai segnali che si propagano nel computer potrebbero accoppiarsi con i circuiti del televisore stesso, causando disturbi nelle immagini visualizzate.

Diamo adesso una definizione che sintetizza, in un certo senso, gli argomenti di cui intendiamo parlare: in generale, *un sistema elettronico in grado di funzionare compatibilmente con altri sistemi e di non produrre o essere suscettibile di fenomeni di interferenza, viene definito **elettromagneticamente compatibile** con l'ambiente in cui opera*.

Questa definizione dice dunque che un sistema elettronico può definirsi *elettromagneticamente compatibile* se e solo se soddisfa i seguenti tre aspetti:

- non causa interferenza verso altri sistemi;
- non è suscettibile (cioè sensibile) alle emissioni elettromagnetiche di altri sistemi;
- non causa interferenza verso se stesso.

Nel seguito, ci occuperemo appunto di chiarire questi tre aspetti. *Essi, di fatto, impongono che i criteri di progetto dei sistemi elettronici debbano tener conto non solo la funzionalità del dispositivo progettato, ma*

---

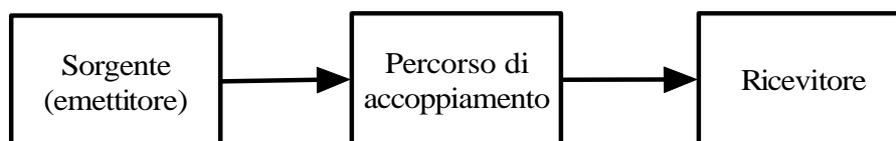
<sup>1</sup> Quando l'1 logico corrisponde al livello alto di tensione, si dice che i dispositivi lavorano **in logica positiva**; al contrario, quando l'1 logico corrisponde al livello basso di tensione, si dice che i dispositivi lavorano **in logica negativa**.

<sup>2</sup> Quando parliamo di *segnali captati* intendiamo dire, ovviamente, che tali segnali *si accoppiano* con i conduttori presenti nei sistemi elettronici, in quanto è noto che un qualsiasi conduttore percorso da corrente si comporta come una **antenna**, in grado di ricevere (captare appunto) e/o irradiare segnali nell'ambiente circostante.

anche i requisiti legali previsti da quasi tutte le nazioni per poter commercializzare il prodotto. In altre parole, il progetto di un dispositivo deve fare in modo sia che il dispositivo operi secondo le modalità desiderate sia che rispetti i **requisiti legali di compatibilità elettromagnetica**.

## ASPETTI DELLA COMPATIBILITÀ ELETTROMAGNETICA

In base alla definizione data nel precedente paragrafo, la **compatibilità elettromagnetica** è connessa alla *produzione, trasmissione e ricezione di energia elettromagnetica*. Possiamo sintetizzare la situazione tramite la figura seguente:



Abbiamo una **sorgente** (o **emettitore**) che produce un determinato **segnale**; questo, mediante un *dispositivo di trasferimento* o, più genericamente, mediante un **percorso di accoppiamento**, viene trasmesso ad un **ricevitore**, il quale lo elabora ottenendo un comportamento desiderato oppure un malfunzionamento: nel primo caso, il segnale ricevuto si definisce rigorosamente **segnale utile**, in quanto determina nel ricevitore il comportamento desiderato; nel secondo caso, il segnale rappresenta invece un **disturbo**, in quanto il ricevitore manifesta un malfunzionamento dovuto appunto al segnale. Diciamo perciò, in questo caso, che si è verificata una *interferenza*.

In generale, *si dice che si è verificato un **fenomeno di interferenza** quando l'energia ricevuta ha causato un comportamento indesiderato del ricevitore*.

Il trasferimento di energia elettromagnetica avviene molto spesso a causa di **fenomeni di accoppiamento non voluti**. Tuttavia, non sempre il trasferimento non intenzionale di energia provoca interferenza: quest'ultima si verifica solo se l'energia ricevuta è sufficientemente elevata e/o se il segnale interferente ha contenuto spettrale sufficientemente esteso ed il sistema che lo riceve non è in grado di effettuare un filtraggio sufficientemente selettivo. In ogni caso, l'interferenza si manifesta solo in presenza di un malfunzionamento del ricevitore. In altre parole, *la trasmissione o la ricezione non intenzionale di energia elettromagnetica non sono necessariamente dannose: è il comportamento indesiderato del ricevitore che stabilisce l'interferenza*. In tal senso, a parità di energia ricevuta, diventa ovviamente importante il modo con cui tale energia viene elaborata dal ricevitore: spesso risulta difficile stabilire a priori se un segnale captato da un ricevitore possa causare interferenza nel ricevitore stesso oppure no.

### **Emittenti intenzionali e emittenti involontarie**

E' molto importante, inoltre, capire se una sorgente possa essere classificata come emittente intenzionale o involontaria di onde elettromagnetiche, così come un ricevitore può essere intenzionale o involontario. Tutto dipende da due fattori: dal fenomeno di accoppiamento e dal tipo di sorgente o ricevitore con cui si opera.

Facciamo un esempio semplice, considerando una stazione radio che trasmette in modulazione di ampiezza: essa verrà considerata una **emittente intenzionale** se la sua trasmissione viene captata da una stazione ricevente sintonizzata sulla giusta frequenza portante; viceversa, diremo che si tratta di una **emittente involontaria** quando la sua trasmissione è captata da un ricevitore non sintonizzato sulla giusta frequenza portante: infatti, in questo caso, è vero che la sorgente è intenzionale (nel senso che viene usata appositamente per trasmettere segnali), ma non lo è il fenomeno di accoppiamento.

Ci sono poi delle emittenti che in nessun caso possono essere considerate come intenzionali: tipico esempio è quello di una lampada fluorescente, che genera emissione elettromagnetica non visibile.

## **Metodi generali di prevenzione delle interferenze**

In base a questi discorsi, si intuiscono subito tre soluzioni per prevenire le interferenze:

- la prima e più evidente possibilità è quella di ridurre, in modo più o meno drastico, l'emissione della sorgente, qualunque essa sia; questo può essere fatto in vari modi, come vedremo in dettaglio nel seguito:
  - \* il modo più semplice è quello di ridurre l'intensità dei segnali che danno origine all'emissione, ma non sempre ciò è possibile, pena il malfunzionamento del sistema; ad esempio, si è detto che i dispositivi digitali, a causa dei segnali elettrici che vi circolano, sono sorgenti di emissioni ad ampio spettro; si potrebbe allora pensare di ridurre l'intensità dei segnali elettrici, ma è noto che non è possibile scendere al di sotto di alcune soglie minime se si vuole che i dispositivi lavorino correttamente;
  - \* in alternativa, a parità di intensità, è possibile ridurre il livello di emissione dei dispositivi digitali regolando i tempi di transizione dei segnali digitali: infatti, si è già detto che, aumentando tali tempi (cioè garantendo transizioni più lente), si riduce lo spettro dei segnali e quindi anche la loro energia<sup>3</sup>. Naturalmente, anche in questo caso il corretto funzionamento dei dispositivi impone dei limiti al rallentamento dei tempi di transizione;
- il secondo modo consiste nel rendere il fenomeno di accoppiamento il meno efficiente possibile; anche qui esistono metodi brutali e metodi più lievi:
  - \* un metodo drastico è quello di sistemare il ricevitore in un contenitore metallico (uno *schermo* protettivo); tuttavia, nella pratica risulta molto costosa la realizzazione di tale contenitore e, inoltre, le prestazioni effettive di questi schermi sono spesso al di sotto delle aspettative, per motivi che vedremo in seguito;
  - \* in generale, invece, è noto che l'efficienza del fenomeno di accoppiamento è generalmente tanto minore quanto minore è la frequenza del segnale che subisce l'accoppiamento stesso; tornando allora ai dispositivi digitali di cui si diceva prima, questo sarebbe un ulteriore motivo per ridurre i tempi di transizione dei segnali;
- il terzo ed ultimo modo consiste nel rendere il ricevitore meno suscettibile possibile all'interferenza: in altre parole, anziché limitare l'intensità dei segnali che interferiscono col ricevitore, si deve fare in modo che essi abbiano il minimo effetto possibile sul funzionamento

---

<sup>3</sup> Ricordiamo infatti che l'energia di un segnale è in qualche modo proporzionale alla banda di frequenza occupata dal segnale stesso.

del ricevitore stesso. La cosa è ovviamente più facile a dirsi che a farsi, perché spesso il conseguimento di questo obiettivo rischia di non preservare le funzioni proprie del dispositivo stesso. Un caso in cui si riesce ad ottenere risultati decisamente apprezzabile riguarda ancora i dispositivi digitali e consiste nell'uso dei *codici a rivelazione e correzione d'errore*: si tratta cioè di codificare i dati in modo tale che eventuale interferenze (che causano errori sui bit) vengano individuate ed eliminate.

## **Emissioni radiate o condotte. Suscettività radiata o condotta**

E' molto importante distinguere quattro diversi fenomeni di trasferimento dell'energia elettromagnetica: *emissioni radiate*, *suscettività radiata*, *emissioni condotte*, *suscettività condotta*. Vediamo di che si tratta.

Un **sistema elettronico** è generalmente costituito da uno o più **sottosistemi**, che comunicano tra loro per mezzo di **cavi**. Un modo per fornire potenza a questi sottosistemi è generalmente quello di usare la tensione alternata fornita dalla **rete commerciale di distribuzione dell'energia**: si tratta, come è noto, di una tensione sinusoidale di 240 V a 50 Hz in Europa e di 120 V e 60 Hz negli USA. L'*alimentatore* di ogni sistema elettronico ha il compito di convertire questa tensione nei diversi livelli di tensione continua necessari per l'alimentazione dei componenti interni al sistema stesso<sup>4</sup>. Ad esempio, i *circuiti digitali* richiedono generalmente una tensione continua di alimentazione di 5 V, i *circuiti analogici* richiedono tensioni continue di 12V (sia positive sia negative, ossia +12V e -12V), altri dispositivi, come ad esempio i *motori*, richiedono livelli ancora diversi. Questa tensione alternata distribuita dalla rete commerciale viene fornita al sistema per mezzo di un **cavo di alimentazione**. Non solo, ma ci sono poi tanti altri **cavi di interconnessione** necessari per collegare tra loro i vari dispositivi del sistema, al fine di ottenere l'interscambio dei segnali funzionali. Tutti questi cavi sono potenzialmente in grado di emettere e/o captare energia elettromagnetica e, di solito, lo fanno anche in modo piuttosto efficiente<sup>5</sup>.

Non solo, ma i segnali dovuti all'interferenza possono anche diffondersi per propagazione diretta lungo i cavi: in altre parole, un disturbo che si è generato nel sistema può irradiarsi nell'ambiente circostante ma può anche propagarsi lungo i cavi; in entrambi i casi, esso va ad interferire con altri dispositivi, ma seguendo strade diverse.

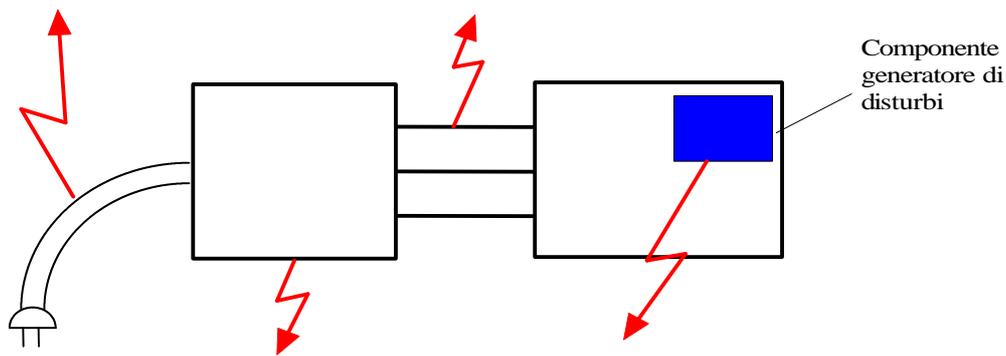
Spesso, i sottosistemi sono racchiusi da **schermi metallici** (e quindi conduttori): su questi schermi, a causa sia dei segnali presenti internamente sia di quelli presenti esternamente, si generano delle correnti (dette appunto **correnti indotte**), che possono poi irradiarsi sia nell'ambiente interno sia in quello esterno.

Ultimamente, è molto comune, specie nei sistemi a basso costo, l'uso di schermi non più metallici, ma di plastica (non conduttrice): in questo caso, i circuiti elettronici presenti nei contenitori sono, per la maggior parte, completamente esposti alle emissioni elettromagnetiche, il che significa che possono irradiare direttamente oppure essere soggetti alle interferenze esterne.

Tornando allora ai quattro fenomeni di trasferimento di energia citati all'inizio, consideriamo la figura seguente:

<sup>4</sup> Dato che servono **tensioni continue** per l'alimentazione dei dispositivi, è evidente che la tensione alternata fornita dalla rete deve essere prima *raddrizzata* e poi *attenuata*, al fine di ottenere i livelli richiesti dai vari dispositivi.

<sup>5</sup> In generale, l'efficienza di emissione e/o di captazione è tanto maggiore quanto maggiore è la lunghezza dei cavi e quanto maggiore è la frequenza dei segnali coinvolti.

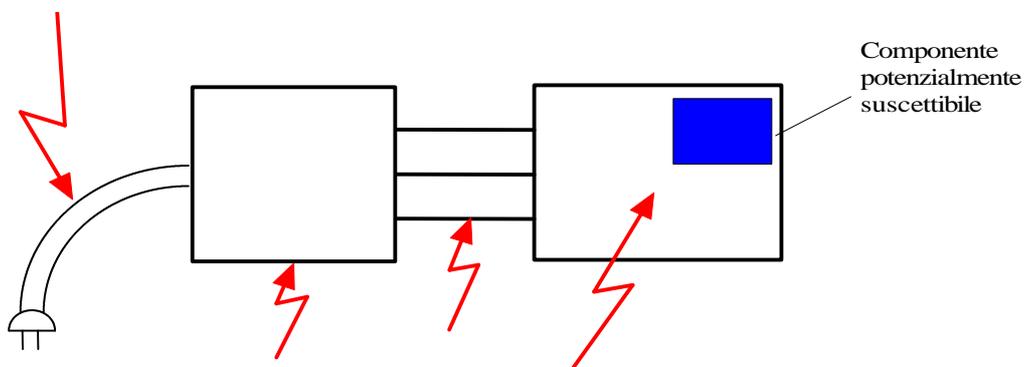


Emissioni radiate

Analizzando la figura da sinistra verso destra, notiamo che le **emissioni elettromagnetiche** possono essere generate da un cavo di alimentazione, da uno schermo metallico contenente un sottosistema, da un cavo che collega sottosistemi diversi oppure da un componente elettronico situato all'interno di un contenitore non metallico. Questo tipo di emissioni prendono il nome di **emissioni radiate**: si tratta perciò di onde elettromagnetiche che si propagano nel mezzo circostante e sono frutto dell'irradiazione di correnti che circolano lungo elementi conduttori (schermi o cavi).

Spesso si hanno convinzioni errate che non permettono la comprensione del problema. Ad esempio, spesso si crede che il cordone di alimentazione di un apparato trasporti solo segnali alla frequenza di rete (50 Hz o 60 Hz); anche se lo scopo primario di tale cavo è quello di fornire al sistema la potenza distribuita dalla rete commerciale, su di esso si propagano solitamente altri segnali, a frequenza più elevata; tali segnali provengono dai sottosistemi interni e vengono captati dal cavo di alimentazione per effetto di vari percorsi di accoppiamento di cui parleremo in seguito. Questi segnali ad alta frequenza, propagandosi lungo il cavo di alimentazione (o altri cavi), danno origine ad un fenomeno di irradiazione piuttosto efficiente (si tenga conto, infatti, che le lunghezze tipiche sono di 1 metro ed anche più). E' dunque questo un caso in cui le correnti elettriche che circolano nel cavo producono segnali irradiati che si propagano nell'ambiente circostante: siamo perciò sempre nell'ambito delle *emissioni radiate*.

La figura seguente illustra come il cavo di alimentazione (o un qualsiasi cavo di interconnessione) possa anche funzionare da *antenna*, captando le emissioni radiate da altri sistemi elettronici localizzati più o meno nelle vicinanze:



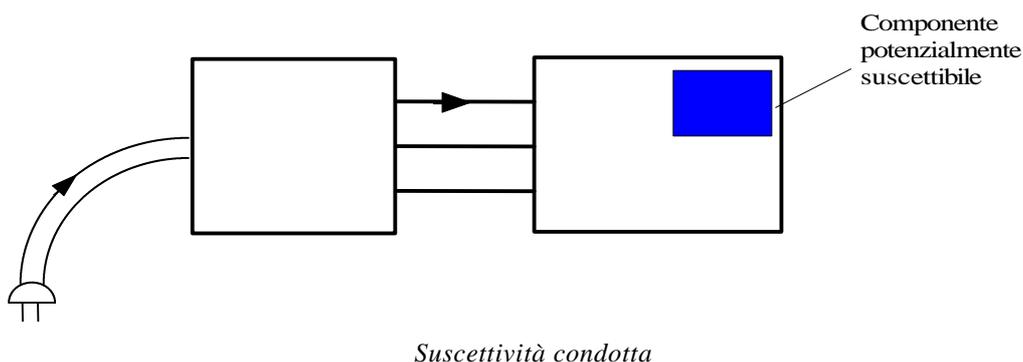
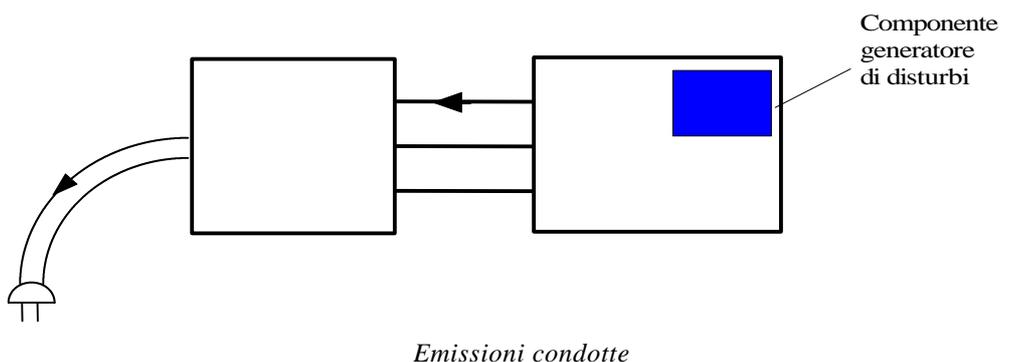
Suscettività radiata

Le emissioni captate dal cavo inducono nel cavo stesso, con una determinata efficienza, delle correnti di disturbo che possono così giungere fino ai componenti interni del sistema e dare origine a

fenomeni di interferenza. Il problema è dunque, in questo caso, di sensibilità alle emissioni presenti nell'ambiente di lavoro, ossia di **suscettività radiata**.

Riassumendo, quindi, abbiamo visto che segnali non desiderati possono essere irradiati (*emissioni radiate*) oppure captati (*suscettività radiata*) dal cavo di alimentazione, dai cavi di interconnessione, dai contenitori metallici o dalla circuiteria interna dei sottosistema, anche se tali dispositivi o cavi non dovrebbero invece trasportare questi segnali.

Le emissioni e la suscettività all'energia elettromagnetica non avvengono però solo attraverso onde elettromagnetiche che si propagano nell'aria. Esistono anche fenomeni di propagazione diretta nei conduttori metallici, così come evidenziato nelle due figure seguenti:



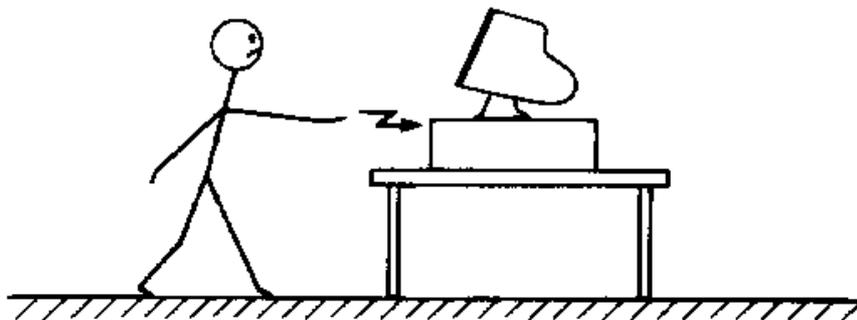
Nella maggior parte dei casi, questo tipo di accoppiamento è più efficiente di quello che si ha per effetto della propagazione in aria; di conseguenza, il progetto dei dispositivi deve sempre prevedere apposite *barriere* alla propagazione dei disturbi, ossia dei **filtri**, lungo il percorso di accoppiamento, in modo da bloccare la trasmissione di energia non voluta.

I segnali indesiderati emessi da un sistema e che si propagano da esso ad altri sistemi tramite i cavi di interconnessione prendono il nome di **emissioni condotte**. Viceversa, la sensibilità di un sistema a segnali di disturbo che gli arrivano tramite il cordone di alimentazione o tramite altri cavi di interconnessione, prende il nome di **suscettività condotta**.

E' particolarmente importante comprendere che il problema della interferenza si estende oltre i confini mostrati nelle ultime figure. Per rendercene conto, consideriamo le correnti di disturbo che si propagano in un cavo di alimentazione; queste correnti, se non vengono opportunamente filtrate, oltre a diffondersi tra i vari dispositivi collegati al cavo vengono anche iniettate nella **rete distribuzione dell'energia**; quest'ultima è costituita da un vastissimo insieme di fili interconnessi, che possono perciò irradiare questi segnali in modo anche molto efficiente; si tratta perciò di un caso classico in cui una emissione condotta (proveniente da un sistema) produce una emissione radiata (prodotta dai cavi). Di conseguenza, le limitazioni imposte alle emissioni condotte all'esterno del sistema tramite il cavo di alimentazione hanno proprio lo scopo di ridurre le emissioni radiate dalla rete di distribuzione dell'energia.

## Scariche elettrostatiche (ESD)

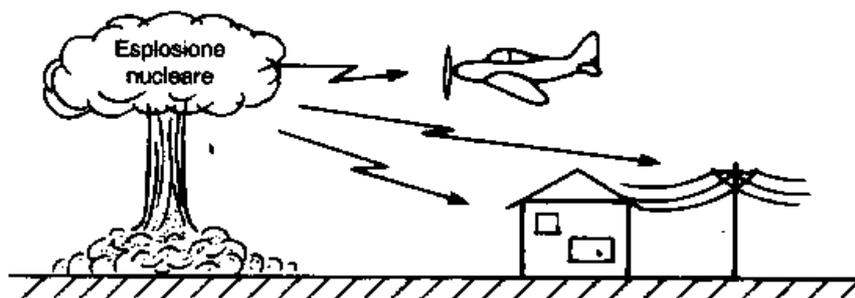
Un problema di suscettività attualmente sempre più frequente nei circuiti integrati su piccola scala è legato alle cosiddette **scariche elettrostatiche (ESD, Electrostatic Discharge)**: quando camminiamo su un pavimento di materiale sintetico (ad esempio nylon) con scarpe dalle soles di gomma, è possibile che si accumulino cariche elettrostatiche sul nostro corpo; se poi tocchiamo un dispositivo elettronico come, ad esempio, la tastiera di un computer, si può formare un **arco elettrico** tra la punta delle dita e la tastiera stessa:



Questo arco elettrico trasferisce le cariche al dispositivo, il che potrebbe determinarne la distruzione, in quanto deleterio per alcuni componenti elettronici come i circuiti integrati. Non solo, ma l'arco genera anche un'onda elettromagnetica che può venir captata dal circuito interno e quindi essere causa di malfunzionamento del sistema.

## Impulsi elettromagnetici (EMP)

In occasione della prima *esplosione nucleare* (avvenuta a metà degli anni '40), si scoprì che i dispositivi a semiconduttore, contenuti nei sistemi elettronici utilizzati per controllare gli effetti dell'esplosione, furono distrutti; questa distruzione non fu causata da effetti fisici diretti dovuti alla detonazione, bensì agli effetti dell'onda elettromagnetica di forte intensità creata dalla separazione e dal movimento di cariche durante l'esplosione:

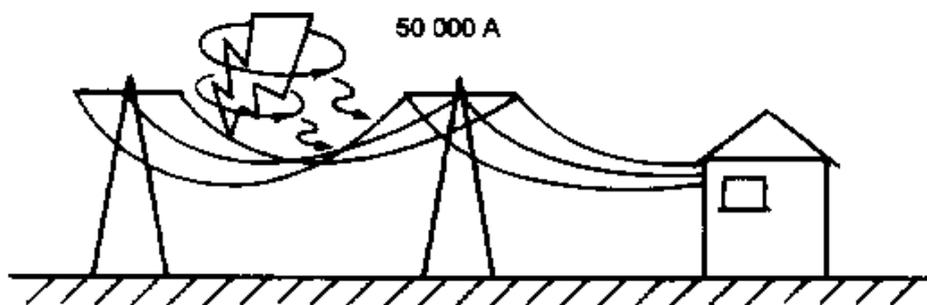


In seguito a questo particolare evento, le forze armate di vari paesi hanno cominciato a prendere accorgimenti per la protezione della strumentazione dei sistemi di telecomunicazione e di elaborazione dei dati dagli effetti di un **impulso elettromagnetico (EMP, Electromagnetic Pulse)**.

La situazione appena descritta rappresenta un problema di vulnerabilità e quindi la sua soluzione consta degli stessi accorgimenti citati per la riduzione degli effetti delle emissioni radiate da sistemi elettronici situati nelle vicinanze; l'unica differenza con quel caso è nell'ordine di grandezza delle quantità in gioco, che in questo caso è decisamente più elevato.

## Effetti dei fulmini

Un altro problema legato alla compatibilità elettromagnetica consiste nello studio degli effetti provocati da un **fulmine**, come schematizzato nella figura seguente:



Anche in questo caso, sia gli effetti diretti del fulmine sia quelli indiretti possono provocare gravi danni sui sistemi elettronici. Si consideri infatti che nel **canale** del fulmine fluisce una corrente che può anche raggiungere i **50000 A**; i campi elettromagnetici generati da una simile corrente possono coinvolgere i sistemi elettronici in modo diretto (cioè per irradiazione nell'aria) oppure in modo indiretto, ossia per accoppiamento con la rete di distribuzione dell'energia (nel qual caso raggiungono il sistema attraverso il cavo di alimentazione, sotto forma di correnti di disturbo indotte). Per questo motivo è importante progettare e provare i dispositivi in modo tale da garantirne l'immunità nei confronti di sovratensioni sui cavi di alimentazione: molti costruttori simulano fenomeni transitori sui cavi di alimentazione e realizzano i dispositivi in modo che operino correttamente anche in tale situazione.

Autore: **SANDRO PETRIZZELLI**  
e-mail: [sandry@iol.it](mailto:sandry@iol.it)  
sito personale: <http://users.iol.it/sandry>  
succursale: <http://digilander.iol.it/sandry1>