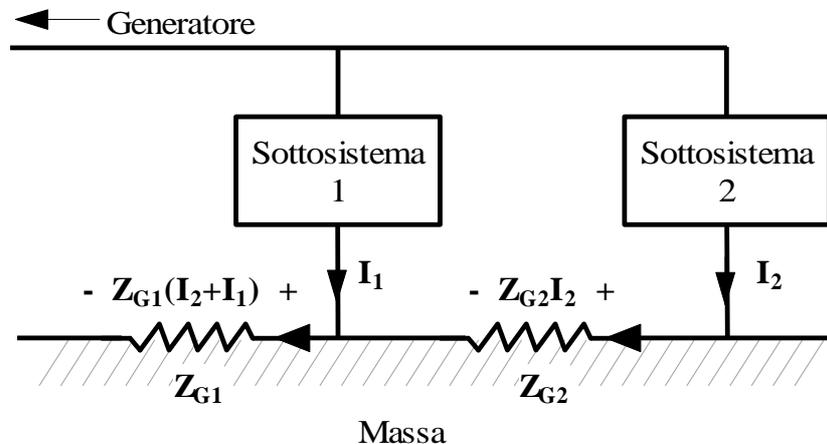


# Appunti di Compatibilità Elettromagnetica

## COLLEGAMENTI A MASSA

Nell'accezione convenzionale, con il termine **massa** (o **terra**) si intende una superficie equipotenziale ad impedenza nulla, ossia un conduttore perfetto ( $\sigma=\infty$ ), che spesso viene considerata solo dal punto di vista del suo comportamento in continua. In realtà, *nessuno di questi concetti è applicabile quando si considerano applicazioni con frequenze di lavoro particolarmente elevate (dalle decine di MHz in su)*: infatti, tutti i conduttori presentano un certo valore di impedenza  $\dot{z}=R+jX$  e questo comporta che ogni corrente che passa attraverso la massa generi una differenza di potenziale tra i vari punti della superficie.

Per comprendere a pieno il concetto, consideriamo lo schema mostrato nella figura seguente, dove sono considerati due sottosistemi (ad esempio due *circuiti stampati*) collegati a massa (costituita ad esempio da una pista di circuito stampato oppure da un semplice filo oppure anche da un piano metallico):



Abbiamo fatto l'ipotesi che la massa (o conduttore di ritorno) del secondo sottosistema sia collegata alla massa del primo sottosistema come illustrato, il che significa che i due sottosistemi condividono, dal primo in poi, lo stesso **conduttore di ritorno**.

I due sottosistemi qui considerati possono essere sia digitali sia analogici sia una combinazione dei due tipi:

- nel caso di **sottosistemi digitali**, la corrente dell'alimentazione (a +5V) ritorna alla sua sorgente (un alimentatore in continua) percorrendo questa massa; tale corrente, inoltre, commuta il suo stato secondo la commutazione dei dispositivi logici; tali commutazioni fanno sì che lo spettro della corrente sia abbastanza largo, tanto più largo quanto più rapide sono le commutazioni;

- nel caso di **sottosistemi analogici**, invece, la corrente può essere composta, in generale, sia da segnali a banda stretta, in bassa o alta frequenza, sia da segnali a banda larga, come quelli prodotti da un arco elettrico sulle spazzole di un motore in corrente continua. Anche i segnali analogici ritornano alle loro sorgenti lungo un certo cammino di ritorno.

La corrente di ritorno  $I_2$  del secondo sottosistema, nel suo percorso di ritorno attraverso il conduttore di massa, attraversa una impedenza complessiva  $Z_{G2}$ , dando così origine ad una differenza di potenziale, ai capi di tale impedenza, pari a  $Z_{G2}I_2$ . Questo fatto ci mostra subito che tra i collegamenti a massa dei due sottosistemi esiste senz'altro una differenza di potenziale (che invece, idealmente, dovrebbe essere nulla), tanto maggiore quanto maggiori sono  $Z_{G2}$  e  $I_2$ .

La corrente  $I_2$  si somma poi alla corrente di ritorno  $I_1$  del primo sottosistema ed insieme attraversano la nuova impedenza  $Z_{G1}$ , dando così origine ad una differenza di potenziale, ai capi di tale impedenza, pari a  $Z_{G1}(I_1+I_2)$ . Questa espressione mostra una cosa molto interessante: in presenza di eventuali variazioni di segnale dovute esclusivamente al secondo sottosistema, cambia la corrente  $I_2$  e cambia anche la tensione ai capi di  $Z_{G1}$ ; quindi, *a causa dell'impedenza  $Z_{G2}$ , eventuali variazioni di segnale nel secondo sottosistema finiscono per influenzare, in modo direttamente proporzionale, il potenziale del punto di collegamento a massa del primo sistema:*

$$V_{\text{massa},1} = z_{G1}(I_1 + I_2)$$

Questo indica dunque che il segnale nel secondo sottosistema si accoppia con il primo sottosistema in virtù dell'impedenza non nulla del piano di massa e della condivisione dello stesso conduttore di ritorno per entrambi i sistemi.

In modo del tutto analogo, il potenziale del punto di collegamento a massa del secondo sottosistema vale

$$V_{\text{massa},2} = z_{G1}(I_1 + I_2) + z_{G2}I_2$$

Di conseguenza, su tale potenziale viene riportato il segnale del primo sottosistema ancora attraverso l'impedenza  $Z_{G1}$ .

Questo fenomeno è indicato spesso col nome di **accoppiamento tramite l'impedenza di modo comune**. Esso illustra in modo semplice ma estremamente efficace l'importanza degli effetti non ideali dell'impedenza di massa.

Un altro errore frequente è quello di considerare che l'impedenza di massa sia dovuta alla sua resistenza in continua o a bassa frequenza. Al contrario, *per alte frequenze (ad esempio nel campo [30MHz, 1GHz] indicato dalle norme di compatibilità elettromagnetica sulle emissioni radiate), la resistenza dei conduttori, inclusa quella per "effetto pelle", è sicuramente trascurabile rispetto all'induttanza dei conduttori stessi:*

$$z = R + jX \cong j\omega L = j \cdot 2\pi f \cdot L$$

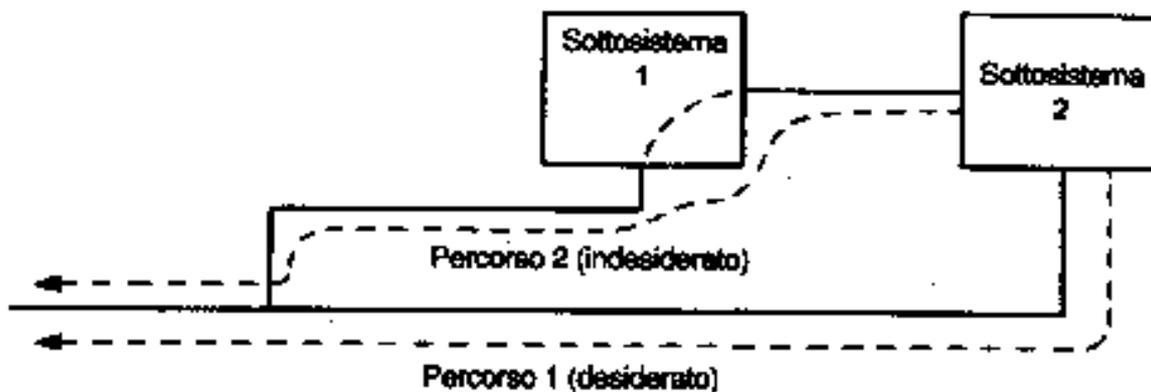
Tanto per fare un esempio numerico, supponiamo di lavorare alla frequenza di 100 MHz: in questo caso, la reattanza induttiva risulta essere

$$X_L = j\omega L = j \cdot 2\pi f \cdot L$$

$$f = 100\text{MHz} \longrightarrow X \cong j \cdot 6.3 \cdot 10^8 \cdot L$$

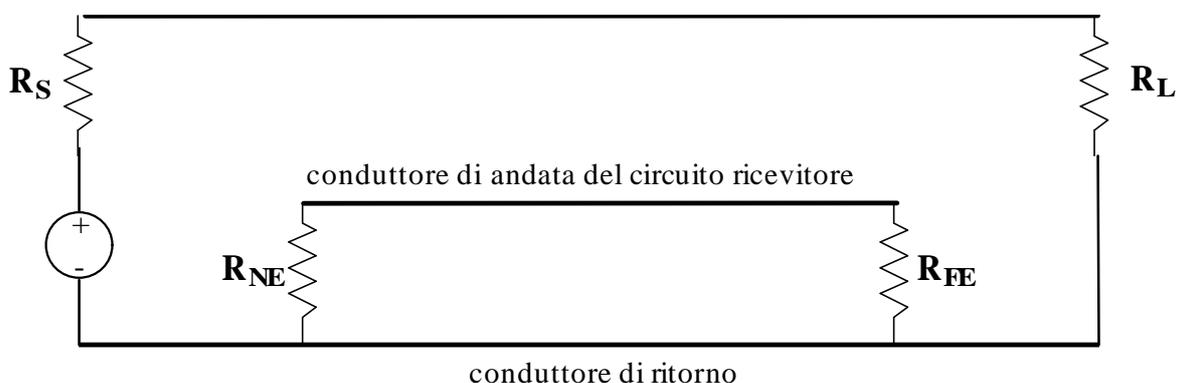
In base a questa espressione, basta una induttanza di circa  $0.1\mu\text{H}$  ( $=10^{-7}$  H), per avere una reattanza di circa  $100\ \Omega$ .

Sempre nell'ambito di errori concettuali abbastanza frequenti, spesso si suppone che le correnti ritornino alle loro sorgenti solo lungo i percorsi appositamente previsti a tale scopo. In effetti, questo è quanto succede di solito alle basse frequenze e sicuramente in continua. Viceversa, alle alte frequenze la cosa è diversa e sicuramente non è più valido supporre a priori che le correnti ritornino lungo i percorsi previsti; nella realtà, possono nascere, a seconda delle situazioni, **percorsi di ritorno alternativi** (e spesso dannosi) a quelli previsti teoricamente, come illustrato nella figura seguente:



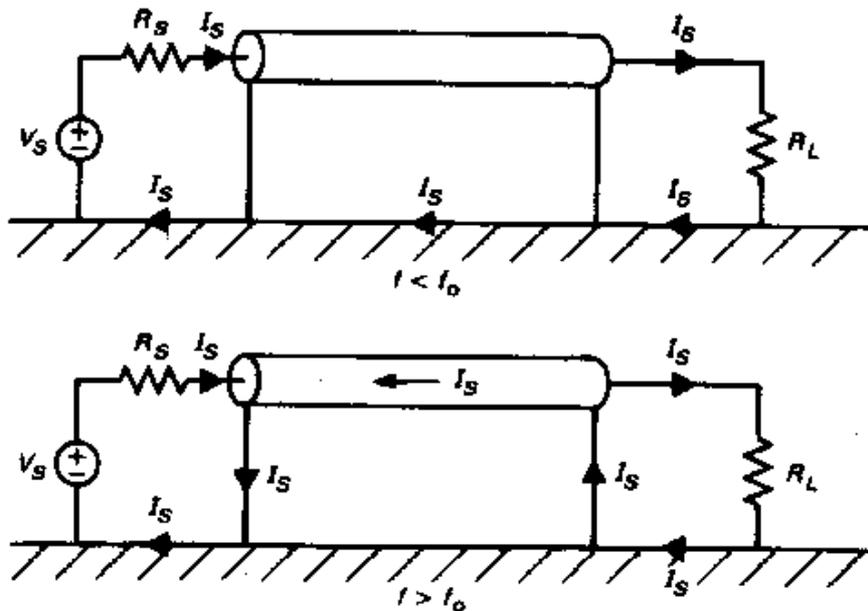
Come si vede, il percorso di ritorno desiderato per i segnali nel sottosistema 2 è quello che porta tali segnali attraverso il conduttore di ritorno appositamente predisposto; al contrario, a causa di fenomeni di **accoppiamento** tanto più probabili e intensi quanto maggiore è la frequenza, potrebbe svilupparsi un percorso di ritorno che passa attraverso il sottosistema 1, che quindi risulta influenzato, in modo indesiderato, dai segnali provenienti dal sottosistema 2.

Un facile esempio pratico di questo fenomeno è costituito dal fenomeno della cosiddetta **diafonia** in un cavo schermato. Non vogliamo scendere nei dettagli (troppo onerosi) della diafonia, per cui ci limitiamo a dire che essa si verifica quando, data una linea di trasmissione a 3 o più conduttori, si verifica un accoppiamento tra due o più circuiti, per cui segnali teoricamente indipendenti tra loro risultano invece mutuamente influenzati. Per essere ancora più chiari, consideriamo una semplice **linea a 3 conduttori**, costituita perciò da due circuiti, in cui ci siano due *conduttori di andata* (uno per ogni circuito) ed un *conduttore di ritorno comune*:



Si distinguono dunque un **circuito generatore**, alimentato da una sorgente, ed un **circuito ricevitore**, costituito semplicemente da due resistenze. In condizioni ideali, sul circuito ricevitore dovremmo avere sempre lo stesso potenziale, data l'assenza di sorgenti. Al contrario, l'accoppiamento tra il circuito ricevitore ed il circuito generatore, dovuto alle correnti che circolano in quest'ultimo, fa sì che la resistenze  $R_{NE}$  e  $R_{FE}$  vedano una tensione non nulla ai propri capi. Questo è appunto il fenomeno della diafonia<sup>1</sup>.

Consideriamo allora il caso della diafonia in un cavo schermato sopra un piano di massa, come illustrato nella figura seguente:



In questo caso, i circuiti sono due in quanto, oltre al circuito generatore (che include i vari elementi  $V_S$ ,  $R_S$ ,  $R_L$  e piano di massa), c'è anche circuito (ricevitore) costituito dallo schermo e dal piano di massa.

Idealmente, la situazione dovrebbe essere tale per cui la corrente  $I_S$  (prodotta nel circuito generatore da  $V_S$ ) attraversa il cavo, poi il carico  $R_L$  ed infine ritorna alla sorgente attraverso il **piano di massa** (che quindi funge da conduttore di ritorno). Tuttavia, l'analisi rigorosa di questa situazione mostra che questo avviene effettivamente (figura superiore) solo per frequenze di lavoro inferiori ad una certa **frequenza di taglio  $f_0$**  del circuito costituito dallo schermo e dal piano di massa. Al contrario, per frequenze superiori ad  $f_0$  (figura inferiore), si dimostra che la corrente trova nello schermo un percorso di ritorno con impedenza minore rispetto al piano di massa (a prescindere da quanto esso sia esteso o da quanto piccola sia la sua impedenza), per cui segue tale percorso e non quello previsto.

A fronte di queste considerazioni, è evidente che *l'individuazione intuitiva del percorso di ritorno della corrente (cioè il percorso a minore impedenza) si rivela un approccio sbagliato*: se la corrente ha un contenuto spettrale esteso su un ampio intervallo di frequenza, alcune componenti spettrali (quelle con  $f < f_0$ ) ritorneranno alla sorgente lungo il piano di massa, mentre altre componenti (quelle con  $f > f_0$ ) torneranno lungo il cammino costituito dallo schermo.

<sup>1</sup> Tipicamente, esso si manifesta durante una conversazione telefonica: mentre parliamo, ci "sembra" di ascoltare la conversazione tra altri due interlocutori: questo accade perché il segnale corrispondente all'altra conversazione si è accoppiato sui conduttori che stiamo utilizzando noi in quel momento e quindi risulta da noi udibile.

In ogni caso, quindi, tutte le componenti spettrali della corrente tornano indietro attraverso il percorso di minore impedenza, ma tale percorso è diverso a seconda che la frequenza considerata sia inferiore o superiore alla frequenza di taglio  $f_0$ .

Molto spesso, dunque, bisogna evitare di determinare il percorso a minore impedenza semplicemente con una ispezione dello schema circuitale, ma bisogna fare una analisi molto più approfondita.

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>