

## Linee di trasmissione

Parte prima.

A cura di Gianfranco: i2VGO

Sono passati cinquantasei anni da quando Vincenzo, I1ZSI mi portava all'istituto dei Salesiani di Sesto San Giovanni. i1FKF Adalberto professore di elettrotecnica, aveva ottenuto dal direttore un'aula da disporre la domenica mattina come sede della sezione ARI di Sesto. Anche allora come oggi, erano frequenti le discussioni sugli argomenti come: onde riflesse dai carichi, i danni del ROS, l'adattamento di antenne ecc. Osservo che a differenza di allora, oggi la confusione è altissima a causa della quantità di disinformazione del WEB rispetto all'informazione corretta.

Chi ha le idee chiare, non solo su questi argomenti, ma di quasi tutta La radiotecnica, sono i dilettanti che si occupano dalle V-UHF alle SHF. In pratica i lettori di Dubus, VHF Communications ecc.

Perché, si chiese anche Sergio Pesce I1ZCT, nei miei sei anni di suo consulente (1988- 1994.) anche chi ha una preparazione tecnica scolastica, professionale, ITIS, Universitario (elettrotecnici, elettronici, informatici) vi è più confusione su questi argomenti di radioamatori che non hanno questi studi?

Un OM ingegnere elettrotecnico, continuava a mandare lettere e, a lamentarsi con il segretario nazionale (MQP) che Sergio non capiva nulla, rifiutando di pubblicare il suo articolo (e altri) dove dimostrava matematicamente che la potenza riflessa dall' antenna con  $Z = R + jX$ , era dovuta ad alti valori dalla parte reattiva del carico.

Trovai diversi motivi. Il primo e il più importante fu che in tutti i programmi scolastici delle discipline elettriche (che non sono di radiotecnica) manca all'inizio un fondamentale avviso:

*"Tutto lo studio sulle reti elettriche che sarà fatto, correnti e tensioni si propagano sempre a velocità infinita, ma sappiate che ciò non è vero!"*

È mia opinione che andrebbe inserito a caratteri cubitali. Nel corso degli anni per gli studenti immersi nella teoria delle reti elettriche, sembra normale che la tensione ai capi di un generatore raggiunga il carico nello stesso istante.

In pratica gli studenti studiano blocchi funzionali, doppi bipoli o quadripoli di circuiti analogici, dove l'uscita dipende istante per istante dall'ingresso, essendo poi lineari questa dipendenza è di proporzionalità.

Il rapporto tra la tensione d'uscita, **Vu**, e la tensione d'ingresso, **Vi**, è normalmente una funzione razionale fratta più o meno complessa secondo il grado del polinomio. I rapporti di **Vu/Vi**, sono sempre visti nello stesso preciso istante. **Cioè i segnali entrano ed escono dai quadripoli (anche**

**complessi) sempre nello stesso tempo come se viaggiassero a velocità infinita.**

Negli anni di scuola si sono studiati segnali che variano nel tempo o in frequenza ma, mai funzioni del tempo attraverso lo spazio. Ecco perché questi tecnici rimangono meravigliati, quando si avvicinano al nostro hobby, che la corrente possa circolare anche a circuito aperto o peggio che un morsetto aperto possa diventare un corto circuito e viceversa (se non fosse così, non potrebbe esistere nessuna antenna di tipo aperto che irradi o che riceva. Non avremmo mai avuto la radio).

Solo dopo sane letture ed esperienze molti apprendono che le leggi che conoscono molto bene (legge di Ohm e i principi di Kirchhoff) non sono più valide sulle linee di trasmissione.

Riaffermo in un altro modo ciò che ho accennato nel mio articolo del mese scorso.

**Quando un qualsiasi oggetto elettrico con una o due coppie di morsetti ha dimensioni geometriche comparabili con la lunghezza d'onda dei segnali considerati non è più possibile ritenerlo né bipolo né doppio bipolo né quadripolo, ma rientra nella disciplina delle linee di trasmissione perché diventa determinante il tempo di propagazione del segnale.**

Nelle linee di trasmissione il tempo di propagazione è essenziale.

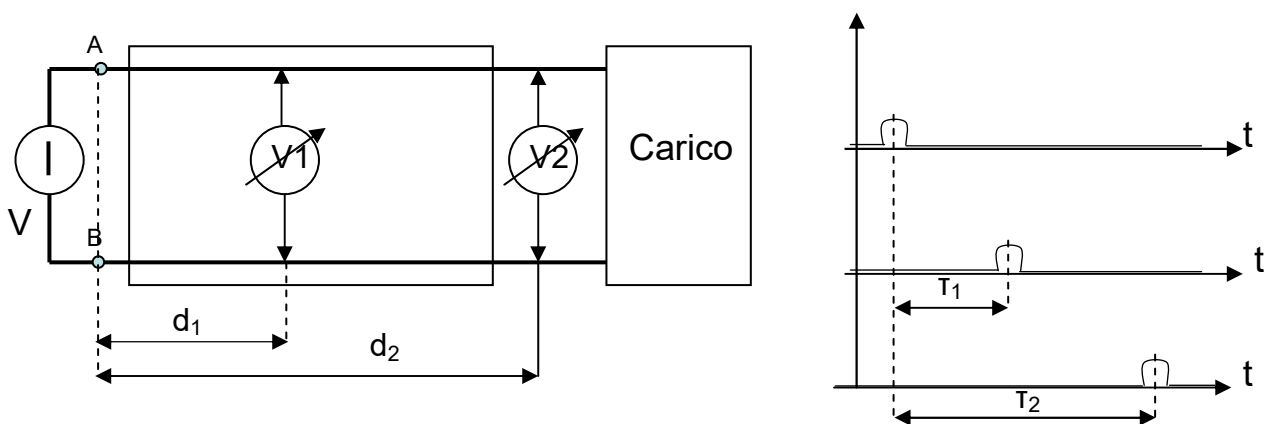


Fig 1

Inviando un impulso  $V$  da un generatore di tensione ideale si osserva che si muove lungo la linea verso il carico con una certa velocità finita,  $u$ , percorrendo distanze,  $d$ , (in metri) in tempi,  $\tau$  (in secondi).

$$u = \frac{d_1}{\tau_1} = \frac{d_2}{\tau_1} = m / \text{sec} \quad (1)$$

**Ciò è valido per tutti i segnali esistenti al mondo: casuali, deterministici sia continui sia discreti nel tempo.**

### Studio delle linee

Per analizzare qualsiasi componente elettrico esistente o ancora da inventare (resistore, induttore, trasformatore, FET ecc.) si può procedere in due modi:

- a) *Rilievo sperimentale delle caratteristiche.*
- b) *Calcolo delle caratteristiche a partire dalla costituzione interna del componente.*

Ricavate le caratteristiche in un modo qualsiasi si può studiare come il componente si comporta inserito in una rete elettrica.

Esempio. Negli istituti tecnici, come nei corsi per radioamatori, quando si studia la resistenza elettrica, gli insegnanti fanno vedere sperimentalmente che incrementando la tensione elettrica di un alimentatore chiuso da un amperometro e un resistore, la corrente elettrica aumenta proporzionalmente. Cioè il rapporto tensione, **V** e corrente, **I** rimane costante. Questa costante del rapporto **V/I** è detta Resistenza elettrica <sup>1</sup>. È noto a tutti che la caratteristica della resistenza (tensione verso corrente) è una retta come tutte le equazioni di primo grado.

Il metodo analitico si utilizza nei corsi universitari di *fisica due*. Tramite il *tubo di flusso* si passa dall'elettrostatica all'elettrodinamica. Si mette un conduttore di metallo ai capi di un campo elettrico sostenuto da una tensione. Cariche elettriche immerse in un campo elettrico sono sottoposte ad una forza con conseguente accelerazione proporzionale al campo. Le cariche però si muovono in un reticolo cristallino del metallo e, dopo un certo percorso urtano, disperdono energia (ecco perché il filo scalda), diminuiscono di velocità, ma poi sono nuovamente accelerate dal campo elettrico esterno <sup>2</sup>. Il risultato è, che invece dell'accelerazione, è la velocità media delle cariche a essere proporzionale alla tensione, **V**. **La corrente che attraversa il conduttore non è altro che la velocità media delle cariche** <sup>3</sup> (un elettrone per ogni atomo presente nel conduttore di rame).

Il rapporto **V/I** rappresenta chi rallenta, chi frena la velocità media delle cariche, data una tensione V, ed è stato chiamato "Resistenza elettrica".

Abbiamo ottenuto lo stesso risultato del metodo sperimentale. Comunque ci si arrivi, da questo momento in poi il resistore è definito da:

$$R = \frac{V}{I} = \text{ohm} \quad V = R \cdot I \quad (2)$$

Tutto ciò è quello che ci serve per applicare correttamente il resistore nei circuiti indipendente dal metodo usato. Analogamente possiamo usare il metodo sperimentale anche per il componente linea. Bastano poche proprietà ricavabili sperimentalmente per applicarlo correttamente nel sistema elettrico.

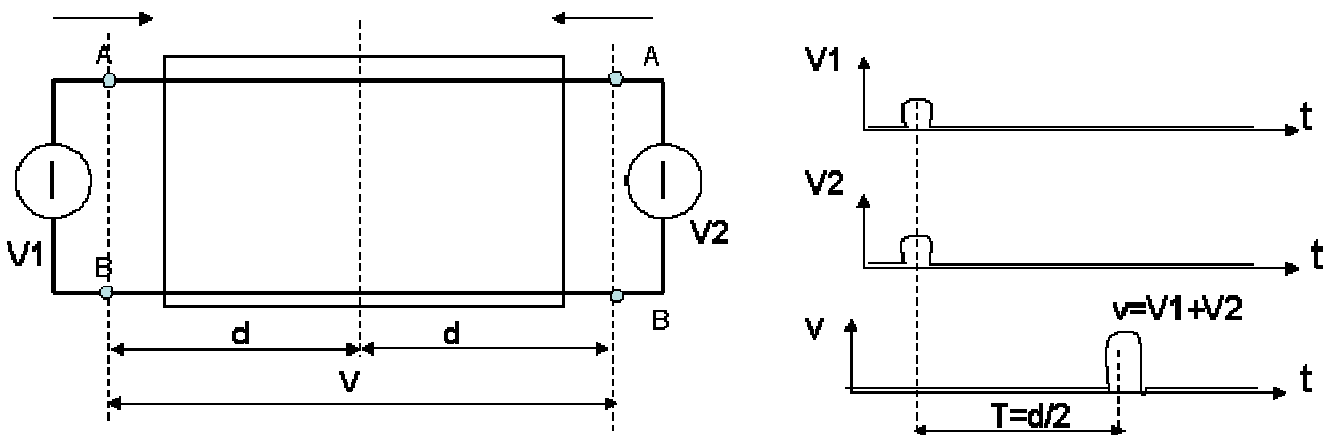
**Gli esperimenti sono fatti su linee aventi caratteristiche elettriche costanti su tutta la lunghezza** come: cavi coassiali, piattine, doppino telefonico, cavi ethernet, strip line su circuito stampato ecc.

Il primo esperimento è deduttivo in base a quanto detto nello schema di figura 1.

**I)** Il segnale transita lungo una linea con una certa velocità  $u$ , quindi ad esempio applicato all'ingresso, non è presente istantaneamente all'uscita.

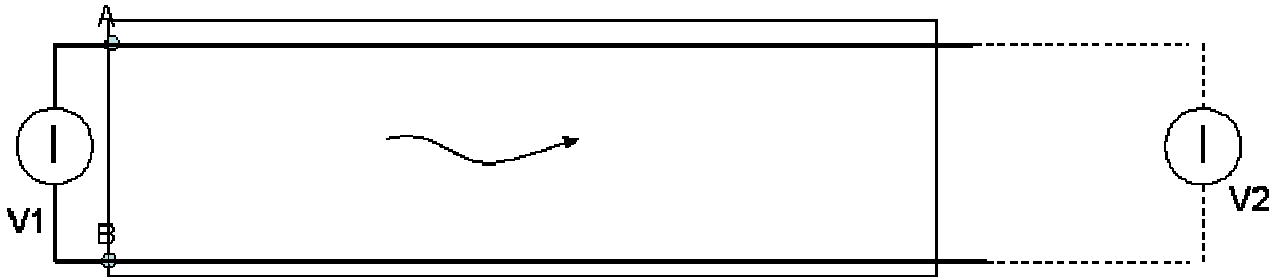
**II)** Il segnale può transitare in tutti e due i sensi <sup>4</sup>. Con due generatori opposti.

Ne segue che in una sezione il segnale  $v$ ,  $i$  (valori istantanei di tensione e corrente) presente è la somma dei due segnali.



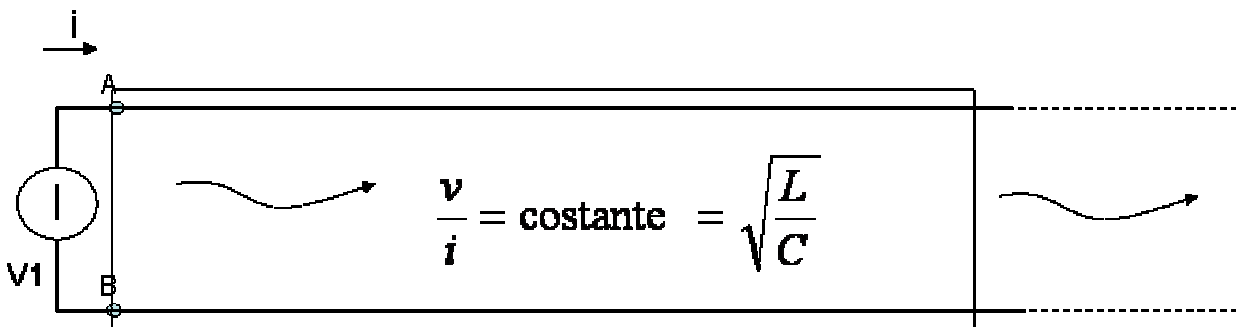
Vedremo che la linea è particolarmente semplice da studiare e sperimentare quando è presente un solo segnale.

**III)** In una linea infinitamente lunga o molto lunga è pensabile di avere un solo segnale.



Infatti, il segnale di un eventuale generatore alla fine della linea non ci arriva mai o arriva dopo un tempo così lungo che l'esperimento è già finito ed era presente solo il segnale trasmesso al generatore all'inizio della linea.

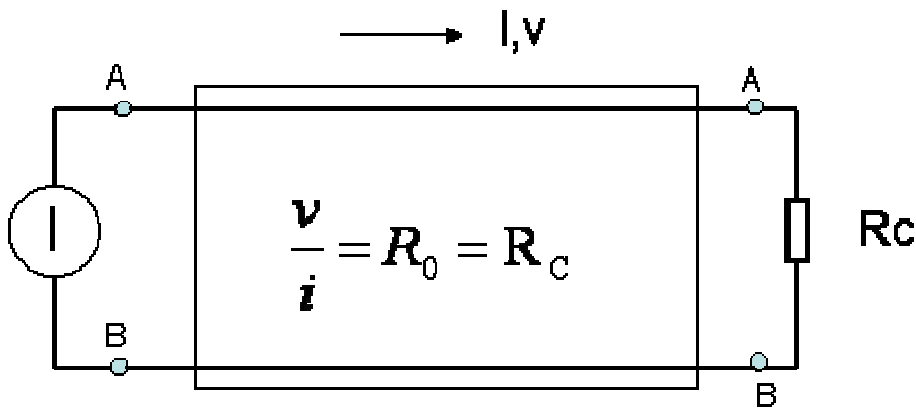
**IV) Nella linea infinitamente lunga, si osserva che il rapporto tra tensione,  $v$ , e corrente,  $i$ , è costante.**



Questo rapporto costante è detto (erroneamente) Impedenza caratteristica della linea. Per togliere un altro motivo che secondo me ha creato non poca confusione a molti dilettanti, la chiamerò come esattamente fisicamente è:  **$R_0$ , Resistenza caratteristica della linea** (anche per le linee reali con perdita).

In pratica è come se il generatore fosse terminato con una resistenza apparente che non si vede, non è dissipativa, il cui valore (in Ohm) è indipendente dalla frequenza, ma dipende esclusivamente dalle caratteristiche geometriche della linea e dalla costante dielettrica dell'isolante, che determinano i valori di induttanza  **$L$**  e di capacità  **$C$**  per unità di lunghezza.

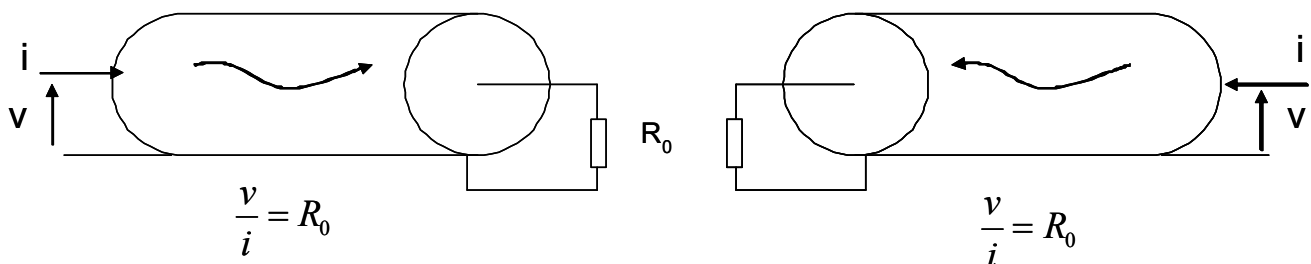
**V) Poiché la linea infinitamente lunga si comporta come se fosse una resistenza  $R_0$ , si potrà sostituire il tratto di linea con un Resistore di carico  $R_c$  uguale al valore di  $R_0$ , senza che nulla cambi.**



Il generatore non si è accorto di nulla, continua erogare la stessa corrente. Tensione e corrente sul carico sono dello stesso valore di quello che transitava lungo la linea prima di raggiungere il carico. La linea si comporta come se fosse infinitamente lunga. Abbiamo un'onda di tensione e di corrente che si propaga con velocità  $u$ , dal generatore al carico con valori costanti lungo tutta la linea. Ciò si esprime dicendo che la linea ha un adattamento energetico o semplicemente che è adattata. Non c'è nessuna riflessione.

**Al contrario tutte le volte che  $R_c$  è diversa dalla  $R_0$ , la legge di Ohm ai morsetti del carico impone valori di tensioni e correnti diverse da quelle che transitano lungo la linea. L'energia in esubero è riflessa e ritorna al generatore.** Se il generatore non è adattato verso la linea, come negli esperimenti che abbiamo eseguito la potenza riflessa è rimandata nuovamente al carico.

**VI)** La linea si comporta allo stesso modo per un segnale che la percorre in un senso o nell'altro.



Riassumendo: in una linea il segnale transita in un senso o nell'altro. La tensione e corrente totale in una sezione è la somma algebrica delle due tensioni e delle correnti. Chiameremo segnale incidente,  $vi$ , quello che si propaga dal generatore al carico e riflesso  $vr$ , il segnale dal carico al generatore.

**Quando  $R_0 = R_c$ , la linea è semplice da studiare. Abbiamo un solo segnale dal generatore al carico. Tensione e corrente sono costanti lungo la linea.** È sempre meglio riuscire ad avere carichi resistivi verso la

linea. Con  $R_0 = R_c$  abbiamo sia adattamento energetico sia di uniformità. Purtroppo per le antenne non sempre si riesce ad ottenere anche in un piccolo intorno di frequenza un valore di resistenza uguale a quelle della linea senza che via sia anche una reattanza. Tra linea e antenna dovrà essere inserita una rete elettrica adattatrice che trasformi l'impedenza di antenna in una resistenza di valore uguale alla resistenza della linea. Normalmente 50 ohm.

## Note

1) Nel 1827 George Simon Ohm un ambizioso insegnante di scuola media copiò la legge che oggi porta il suo nome dalla termodinamica. Associò la differenza di temperatura alla tensione elettrica e la quantità di calore alla corrente. Nel 1852, due anni prima della morte, riuscirà ottenere l'incarico di professore di fisica sperimentale all'università di Monaco. Oggi il calcolo delle temperature dei dissipatori, transistor, ecc è chiamata legge di Ohm termica.

2) Quest'analisi fu fatta per la prima volta nel 1864 da James Clerk Maxwell. Egli rimase sorpreso e fece indagini di come Simon Ohm fosse potuto arrivare ai suoi stessi risultati quaranta anni prima. La legge di Ohm ricavata in modo empirico è l'unico caso della storia della fisica, dove un fenomeno complesso sia rigorosamente analizzato in modo preciso tramite una semplice equazione di primo grado dedotta da altri scenari fisici.

3) Gli elettroni presenti ai capi di un interruttore luce arrivano dopo ore alla lampadina. L'immediatezza dell'accensione del lampadario di casa, dopo aver chiuso l'interruttore, è data dalla velocità dell'onda e non dalla migrazione degli elettroni lungo filo. L'onda di tensione arriva alle lampadine a velocità poco minore della velocità luce,  $c$ , mettendo in fibrillazione gli elettroni presenti lungo il filo conduttore e nel filamento. Il tempo più lungo è l'inerzia del filo di tungsteno a raggiungere la temperatura per quella data emissione di luce.

4) In un sistema lineare i singoli segnali si comportano come fossero presenti indipendentemente l'uno dall'altro. Tutti i circuiti formati da resistenze, capacità e induttanze (senza nucleo) sono lineari come lo sono le linee di trasmissioni. Due segnali possono percorrere contemporaneamente e in senso opposto lo stesso filo senza interferire fra loro. La linearità è un fenomeno comune nei circuiti elettrici ma non lo è per nulla un fenomeno naturale generale: due treni, ad esempio, non possono viaggiare in senso opposto sullo stesso binario senza interferire.

Gianfranco, i2VGO