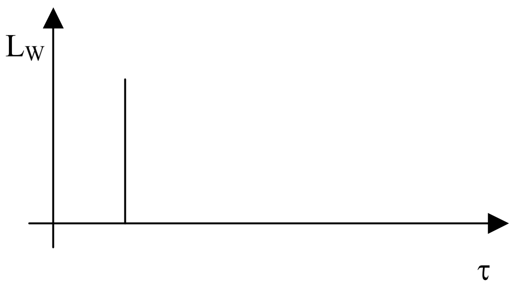
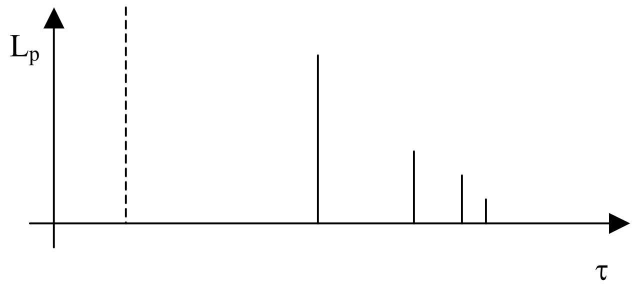
Lezione XXXV - 15/05/2003 ora 14:30 – 16:30 - “Propagazione e misure acustiche nelle sale” - Originale di Di Veneziano Lucio

Misure nelle sale

Si supponga di posizionare una sorgente e un rilevatore in una sala con tutte le pareti in squadro una rispetto alle adiacenti. Si emetta ora un impulso δ di Dirac. Si hanno i seguenti grafici dei livelli di potenza e di pressione sonora





Come si vede, la prima risposta all’impulso si ha non in coincidenza con l’emissione del δ di Dirac, ma dopo un tempo pari a r_0/c. La prima risposta è data dall’irraggiamento diretto del ricevitore da parte della sorgente. Le risposte successive, sono causate delle riflessioni multiple che si verificano all’interno di un locale, dovute ad una emissione sonora e che raggiungono, con il relativo ritardo, il punto di ascolto.

Esistono due tipi di misure in ambienti chiusi: una misura stazionaria, compiuta con altoparlanti, più costosa e più lunga da compiere, e una misura impulsiva, data per esempio dallo scoppio di un petardino, più facile da compiere.

La risposta all’impulso di un ambiente descrive, nella sostanza, il medesimo fenomeno fisico cui ci si riferisce quando si parla della riverberazione.
L’approccio è però concettualmente diverso perché in questo caso non si raggiunge la densità di energia sonora di regime in tutto l’ambiente ma si hanno solo informazioni sulla risposta dell’ambiente ad un certo impulso emesso da una sorgente in una certa posizione. I tempi di riverberazione misurati direttamente dal decadimento della risposta all’impulso sono leggermente inferiori a quelli prodotti dal decadimento da rumore stazionario, e comunque non coincidono con la definizione data da Sabine. Il legame tra la risposta all’impulso e il tempo di riverberazione è stato studiato da Schroeder che ha mostrato come la legge di decadimento riverberante sia ricostruibile attraverso un integrale della risposta all’impulso.

Il decadimento del rumore contiene fluttuazioni casuali dovute alla storia casuale del segnale immediatamente precedente allo spegnimento della sorgente. La media temporale $<n^2(t)>$ di un numero molto grande di misure del decadimento quadrato $n^2(t)$, è collegata alla risposta all’impulso al quadrato $g^2(t)$, dalla seguente relazione:

$$< n^2(t) >= \int_t^\infty g^2(t')dt' = \int_0^\infty g^2(t')dt' - \int_0^t g^2(t')dt'$$

La ricostruzione grafica dell’integrazione di Schroeder della curva di decadimento può avvenire mediante l’integrazione all’indietro della risposta all’impulso quadrata (curva A) fino a raggiungere il livello di energia stazionario, oppure, procedendo per tempi crescenti, per sottrazione dal livello di energia stazionario calcolato a parte, dei valori assunti progressivamente dall’integrale della risposta all’impulso quadrata (curva B). Trasformando questi grafici in scala logaritmica, è possibile calcolare il tempo di riverberazione con gli stessi procedimenti illustrati precedentemente.
La norma ISO3382 prevede esplicitamente che la misura del tempo di riverbero venga effettuata mediante integrazione all’indietro di Schroeder allorquando il segnale di eccitazione è di tipo

impulsivo o pseudo-impulsivo; la determinazione del tempo di riverbero direttamente dalla risposta all'impulso non integrata è pertanto fuori norma.

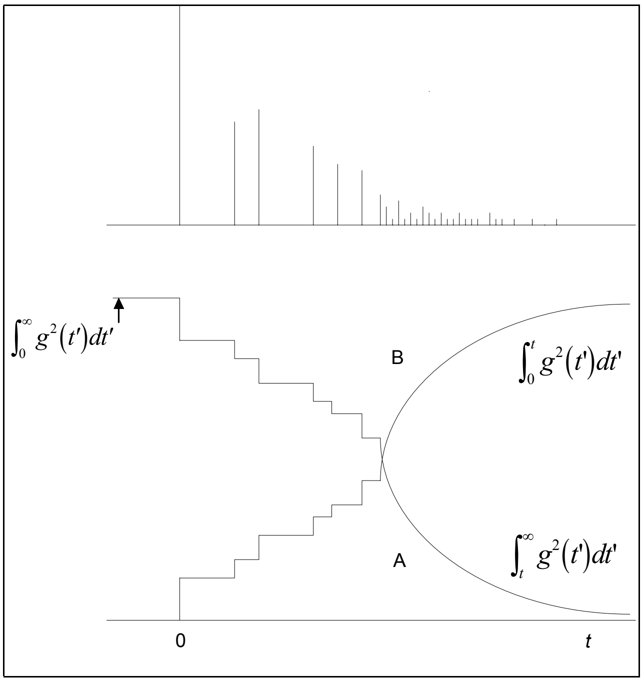


Fig. 1: Ricostruzione della curva di decadimento mediante integrazione all'indietro

Attualmente sono disponibili strumenti capaci di effettuare automaticamente l'integrazione di Schroeder di segnali impulsivi. In questo modo è possibile ottenere accurate misure dei tempi di riverberazione alle varie frequenze con un semplice colpo di pistola. Tali risultati sono in genere confrontabili con i risultati ottenuti con le misure classiche ottenute dallo spegnimento del rumore stazionario.

In caso di decadimento non esponenziale si riscontrano viceversa delle differenze fra i due metodi. Secondo Schroeder è proprio il valore misurato dalla risposta all'impulso integrata ad essere meglio correlato con la sensazione soggettiva delle persone.

L'integrazione all'indietro di Schroeder può essere fatta anche con un foglio elettronico secondo lo schema di calcolo riportato nella Tabella 1. Nella *Fig.* 6 sono riportate le curve di decadimento da rumore impulsivo e l'integrale di Schroder per l'esempio della Tabella 1.

Osservando la figura, si nota come la pendenza della curva integrata cambi avvicinandosi al termine della risposta all'impulso, poichè viene integrato anche il rumore di fondo non causato dall'impulso stesso. Esso si traduce in un secondo tratto lineare, di pendenza molto inferiore a quella del primo tratto, che può essere facilmente confuso con un caso di decadimento a doppia pendenza. In realtà la misura riportata in *Fig.* si riferisce ad un ambiente perfettamente Sabiniano, e la doppia pendenza è un tipico artefatto prodotto dall'integrazione di Schroeder. Il valore corretto del tempo di riverbero si ottiene estrapolando la pendenza del primo tratto di curva, e tralasciando il secondo.

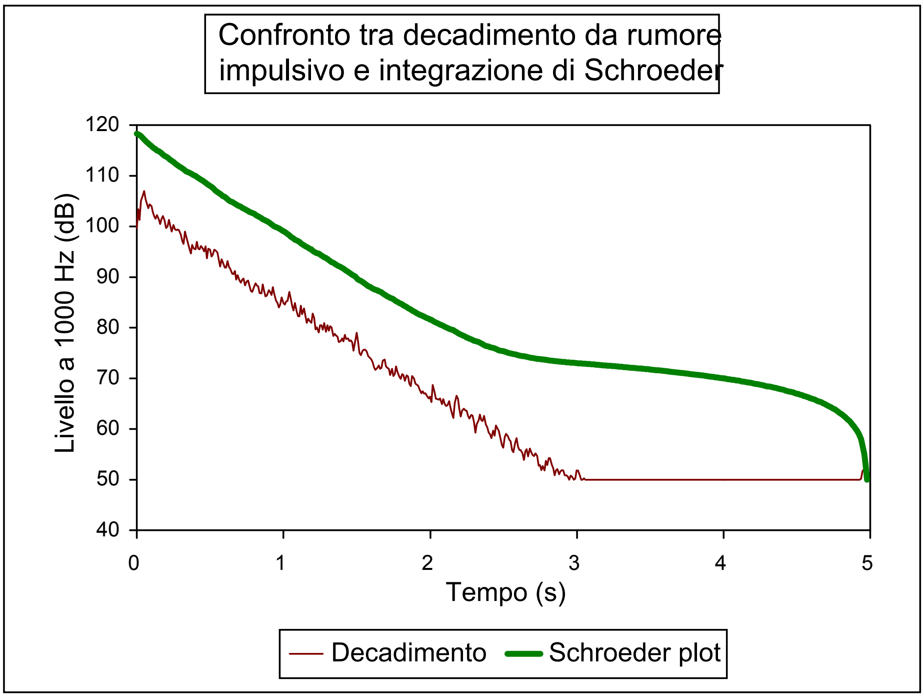


Fig. 2: Curva di decadimento da rumore impulsivo e integrale di Schroeder per l'esempio riportato in tabella 1

Senza fare l'integrazione di Schroeder, il calcolo del tempo di riverbero è sbagliato.

$$L(\tau) = 10\log\left[\int_t^{\infty} g^2(\tau)\,d\tau\right]$$

Campionamento di un segnale

Campionare un segnale significa identificare un quanto temporale ΔT (che chiameremo periodo di campionamento) e considerare solo i valori del segnale continuo in corrispondenza di istanti multipli di ΔT.

Prima dell'avvento del digitale le bande venivano approssimate con curve del genere:

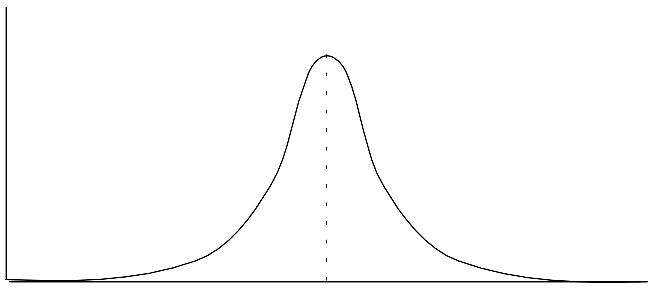


Figura 7

Ottenute , con filtri analogici passivi (composti cioè da sole resistenze , induttanze e condensatori) attraverso cui si faceva passare il segnale. Oggi invece si sfrutta la trasformata di Fourier per il calcolo dello spettro. Alla base di questo sta la possibilità di poter passare dal dominio analogico a quello digitale .

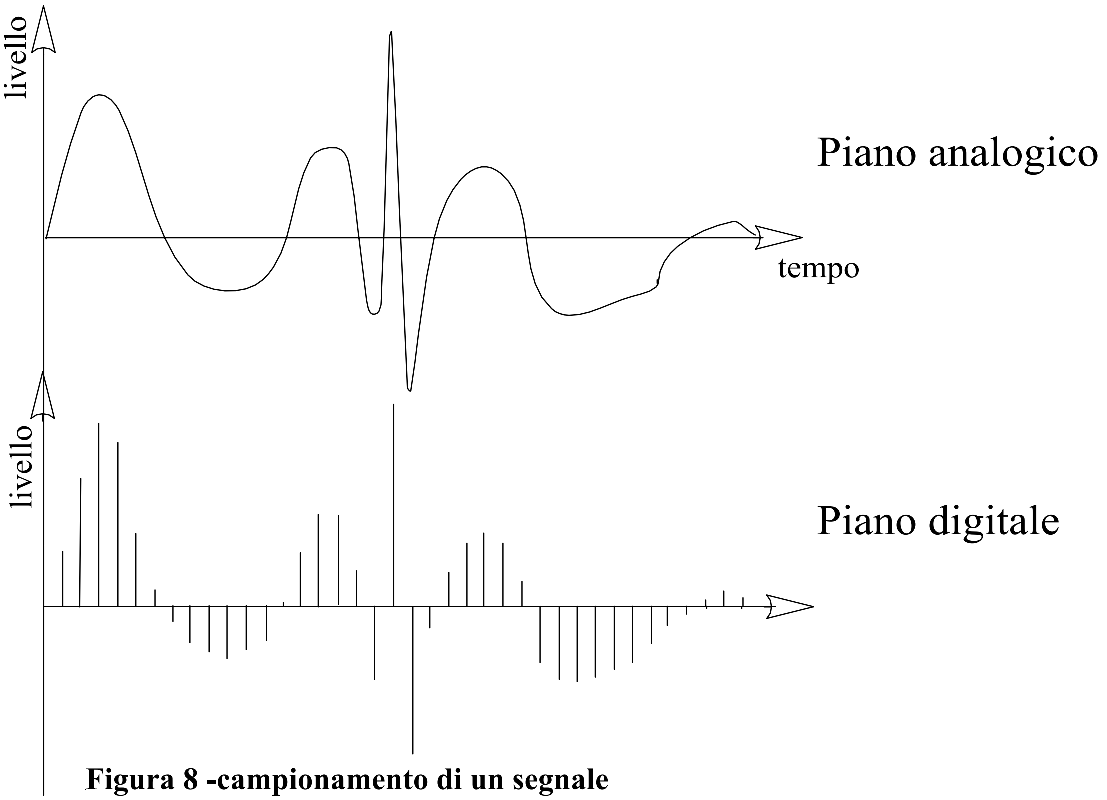


Figura 8 -campionamento di un segnale

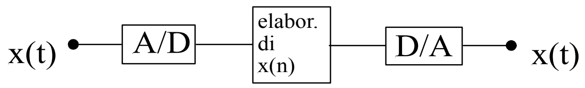
Dove il “piano analogico” è un piano continuo nel tempo e nelle ampiezze (si hanno valori che appartengono ai numeri reali).

Nel piano digitale invece il segnale analogico è stato campionato , si hanno cioè i valori del segnale ogni $\Delta\tau$ secondi , si ha quindi che tra questi intervalli temporali tutte le informazioni analogiche vengono perdute. Ma non è tutto , perché la campionatura viene fatta con convertitori analogico-digitali (A/D) che discretizzano anche i livelli dell’ampiezza , riducendo ulteriormente la qualità della conversione del segnale. Quindi i convertitori A/D si caratterizzano sulla base dei seguenti parametri fondamentali:

- Numero di livelli discreti possibili con cui può venire descritta l’ampiezza del segnale campionato
- Periodo (o intervallo) di campionamento

I convertitori tipici hanno 16 bit (signed integer numeri con segno cioè 65535 valori che vanno da –32767 a +32767) di livelli possibili in ampiezza mentre arrivano a frequenze di campionamento di 48000Hz.
I convertitori più moderni (ad esempio le più evolute schede audio per P.C.) hanno 24 bit di livelli e frequenze di campionamento a 96000Hz.

Tornando al concetto di “approssimazione del segnale” da analogico a digitale , porta a dover distinguere due scopi separati di ricerca:
- Elettroacustica il cui traguardo finale è la riproduzione del segnale , ossia la trasformazione del segnale originale analogico in digitale , un’elaborazione di questo e la successiva trasformazione da digitale in analogico il più simile possibile al segnale di partenza.



- Metrologia ,dove il segnale campionato , non viene più riconvertito analogicamente.

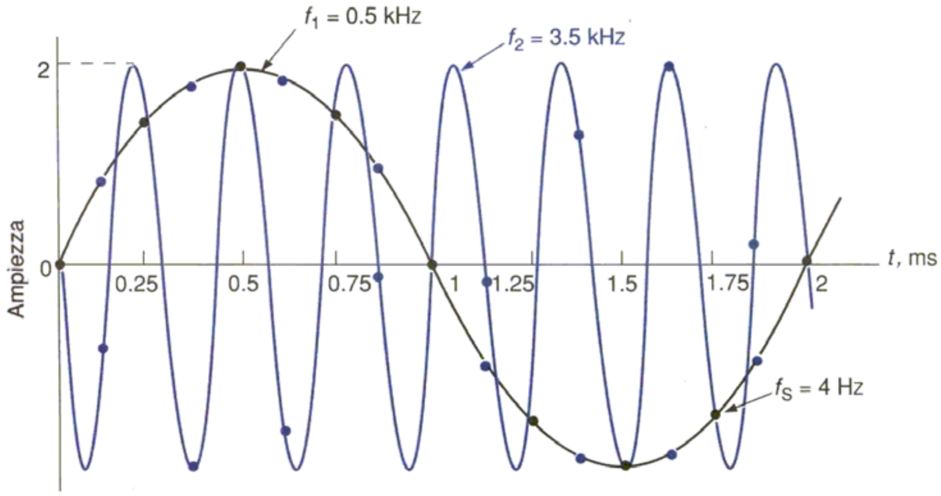
La differenza è notevole , infatti i metodi usati per l’elettroacustica permettono la perdita di pacchi di dati troppo grossi per poter essere utilizzati anche in metrologia.
Alcuni esempi applicativi dell’elettroacustica: la riproduzione elettroacustica mira a rendere il segnale in uscita uguale , per il nostro sistema uditivo , a quello originale di ingresso (le massime frequenze da noi captabili si aggirano sui 20000Hz ecco allora che si è scelto come frequenza di campionamento 48000 che ne è quasi il doppio).Un’ altro problema dell’elettroacustica è la scelta di una minore qualità di segnale (che comunque lascia il segnale comprensibile) per apparecchiature , quali telefonini o modem , che non hanno la possibilità o l’utilità di campionare ed elaborare i segnali con troppa precisione.
MP3 è uno standar di compressione digitale che arriva a compattare il numero di numeri ad 1/40 della dimensione iniziale della forma d’onda data senza alterazioni da noi osservabili del segnale; è anche questo un chiaro esempio di come si trascuri la qualità del segnale per dare maggiore importanza ad altri fattori (in questo caso si cerca di ridurre il numero di numeri).

Teorema di Shannon (o di Nyquist)

“La frequenza di campionamento deve essere almeno doppia di quella massima che c’è nel segnale”, cioè:

$f_c \geq 2 \cdot f_{\max}$ (19

f_{max} è anche detta frequenza di Nyquist $f_{Nyquist}$.
All’atto pratico questo può significare che se io campiono una sinusoide in maniera troppo sparsa , alla ricostruzione ottengo una sinusoide con frequenza diversa .



Esempio di aliasing. Le sinusoidi a 0.5 kHz (nera) e a 3.5 kHz (in colore) hanno la stessa ampiezza se queste forme d'onda vengono campionate ogni 0.25 ms (punti neri corrispondenti a una frequenza di campionamento di 4 kHz). Campionando invece ogni 0.125 ms (punti in colore corrispondenti a frequenza di campionamento di 8 kHz) si ottengono valori diversi per le ampiezze dei due segnali.

Figura 9

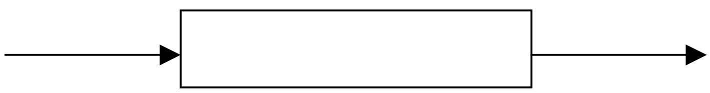
Quindi se la condizione di Nyquist non è soddisfatta, si va incontro a sottocampionamento e si causa ALIASING , cioè il segnale riprodotto avrà suoni che l'originale non aveva e questi avranno una frequenza pari a:

$$f_{aliasing} = f_{Nyquist} - (f_{vera} - f_{Nyquist}) = 2 \cdot f_{Nyquist} - f_{vera} \qquad (20$$

Per ovviare a questo si pone , prima del convertitore A/D, un filtro detto filtro Anti-aliasing , che provvede ad eliminare tutte le alte frequenze che potrebbero comparire come aliasing nel segnale ricostruito.

Ipotesi di campo

Nello studio dell'acustica l'ambiente viene schematizzato con il concetto di scatola nera (blackbox): un oggetto avente un ingresso ed una uscita ad esso correlata ma il cui funzionamento interno non é noto.



Si presuppone che il campo acustico in un ambiente sia lineare.

Un sistema si dice lineare se l'uscita é una funzione lineare dell'entrata ovvero se vale il principio di sovrapponibilitá degli effetti .

Il principio di sovrapponibilitá degli effetti si puó esprimere cosí: dati due ingressi generici A e B e le loro relative uscite C e D, ottenute applicando singolarmente gli ingressi, applicando nel sistema l'ingresso A+B si ottiene l'uscita C+D.

ingresso	uscita
A	C
B	D
A+B	C+D

Tab.1: Mostra il comportamento di un sistema lineare.

Inoltre si presuppone che i sistemi studiati siano tempo invarianti, cioé indipendenti dal tempo.

Rappresentazione digitale

Nell'ambito di queste ipotesi si applica il concetto matematico di risposta all'impulso. La formulazione di questa teoria é particolarmente semplice nel dominio digitale dei segnali campionati.
Il segnale in questo dominio é rappresentato cosí: l'intervallo di variabilita' della tensione viene diviso in 2^n (dove n é il numero di bits usati nella rappresentazione) sottointervalli rappresentati ciascuno dal proprio valore medio; periodicamente il segnale analogico viene misurato (campionato) ed a seconda dell'intervallo in cui cade la tensione il campione assume il valore medio dell'intervallo.

Quindi la rappresentazione di un segnale nel dominio digitale é semplicemente un insieme ordinato di numeri interi. Si definiscono inoltre alcune grandezze che influenzano la rappresentazione digitale: frequenza di campionamento ν , periodo (é l'inverso della frequenza di campionamento) $\Delta\tau$.

10010000
01001010
10001001
01110011
00011000
10100000
00000011
00111111
01010101
10000111
00010000

Tab 2. Esempio di segnale nella rappresentazione digitale (e binaria) ad 8 bit.

Come si é visto il segnale entra nel sistema come un vettore di numeri (il nome dei vettori verrá scritto minuscolo in neretto) ed esce dal sistema come un altro vettore di numeri con la stessa frequenza di campionamento. Chiamando **x** il vettore di numeri in entrata e **y** quello in uscita essi possono essere rappresentati come lo sono nella pagina seguente:

x_1	y_1
x_2	y_2
x_3	y_3
x_4	y_4
x_5	y_5
x_6	y_6
x_7	y_7
x_8	y_8

La Convoluzione

Bisogna notare come i dati in uscita siano “legati” ai dati in ingresso: in particolare avendo in ingresso una sequenza di zeri (silenzio) seguita da numeri non nulli a loro volta seguiti da zeri, in uscita si avrà una sequenza simile alla prima salvo che per il numero di zeri all’inizio ed alla fine e per i valori dei campioni.

Questa disparitá nel numero di zeri precedenti e seguenti i due segnali deriva dal fatto che la risposta del sistema non é istantanea, né quando il sistema viene eccitato (attacco del suono), né quando il sistema ritorna allo stato iniziale (coda del suono).

In termini matematici questo si esprime dicendo che y_n non é funzione solo di x_n ma di un certo numero di campioni in entrata precedenti a x_n. Nel dominio digitale questo viene espresso dall’equazione:

$$y_n = x_n h_1 + x_{n-1} h_2 + x_{n-2} h_3 + x_{n-3} h_4 + \ldots\ldots + x_{n-m} h_m$$

dove m é il numero dell’ultimo elemento di cui si ha memoria.

Questa operazione si definisce convoluzione e si usa la notazione:

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} \otimes \mathbf{h}$$

I coefficienti rappresentano quindi la “caratteristica” del sistema. Guardando a questi coefficienti come ad una forma d’onda, questa rappresenta la risposta all’impulso del sistema ed ha la stessa frequenza di campionamento dei dati in ingresso. Per riprodurre questo comportamento del sistema i sistemi digitali di riproduzione e studio degli ambienti hanno a disposizione della memoria in cui i campioni vengono immagazzinati. La natura del problema studiato implica la necessità di avere una memoria “equivalente” a tempi che possono arrivare ad alcuni secondi. Con un semplice calcolo, ipotizzando una frequenza di campionamento di 44.100 Hz (la frequenza dei CD audio commerciali), si nota come una memoria di 5 secondi richieda l’utilizzo di
5 * 44100=220500 bytes.

Tale calcolo é realistico, considerando il fatto che valori tipici di memorie dei sistemi digitali di studio e simulazione degli ambienti, variano nell’ordine di 10^5-10^6 bytes.

Si possono fare due considerazioni: intanto un notevole aumento della memoria richiesta rispetto a sistemi digitali dedicati allo studio ad esempio di fenomeni elettrici, inoltre la notevole mole di calcoli che questo tipo di trattazione richiede, così notevole da non poter essere svolta tuttora in tempo reale e comunque tecnologicamente irrealizzabile fino a pochi anni fa.