



Giovanni Schgör (g.schgor)

REMINISCENZE DI CALCOLO ANALOGICO

2 January 2009

I ricordi

Sono passati 55 anni ma ricordo bene quel grande pannello che occupava tutta la parete.

C'era la raffigurazione topografica del territorio circostante, completata dalle linee di distribuzione dell'energia elettrica in tutta la zona.

Ogni centro di utenza era rappresentato da un potenziometro che poteva essere regolato in funzione del singolo assorbimento di potenza, e le linee da resistenze che riproducevano quelle effettive dei conduttori. Una serie di boccole consentiva la misura in ogni punto significativo della rete, in modo da permettere la verifica delle "cadute di tensione" che si riscontravano nelle varie condizioni di carico.

Era in definitiva un semplice modello in continua della rete di distribuzione locale, semplice ma di grande utilità nella progettazione di nuove linee o nel potenziamento di quelle esistenti.

Per me, allora studente del Politecnico, capitato lì (un paesino tedesco a nord di Francoforte) per un stage di scambi studenteschi intereuropei presso appunto l' Ente distributore dell'energia elettrica della zona, fu un'interessante esperienza ed un primo approccio, concreto, alla "modellistica".

Modelli fisici e di calcolo

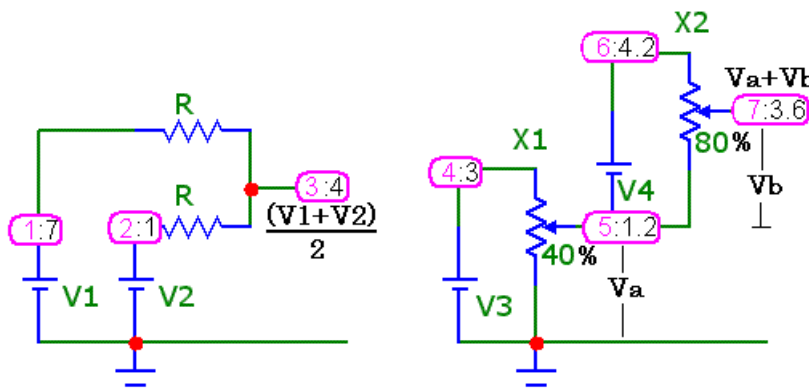
In effetti, l'idea che sta alla base della modellistica è semplice: studiando un qualsiasi fenomeno fisico si perviene a delle relazioni matematiche che legano tra loro i vari parametri in gioco. E' quindi facile passare da strutture di calcolo a strutture fisiche di altro tipo (modello) che diano luogo allo stesso comportamento, quindi alla stessa procedura di calcolo.

Così fenomeni meccanici, idraulici, termici, ecc., possono essere "convertiti" in un modello elettrico, cioè in un circuito che presenta analogie di calcolo con il fenomeno originario.

Perchè modello elettrico? E' semplice: perchè è il più facile ed economico da realizzare e può essere misurato con strumenti di grande precisione (cosa non sempre altrettanto fattibile in altri campi).

Oggi i modelli elettrici hanno perso d'importanza, sostituiti dai più potenti e flessibili computers, ma è comunque bene conoscerne almeno le basi concettuali (e chissà, potrebbero ancora essere utili nel risolvere nel modo più semplice anche casi attuali).

Ecco esempi elementari di modelli di calcolo:



Il primo fa una media fra 2 tensioni, il secondo ne fa la somma, ma è interessante notare l'uso dei potenziometri come "moltiplicatori per una costante (<1)" o, se si preferisce, come "divisori per una costante (>1)". V_a è infatti dato da $V_3 \cdot K$ (dove K è la posizione in % del potenziometro), e così rispettivamente per V_b .

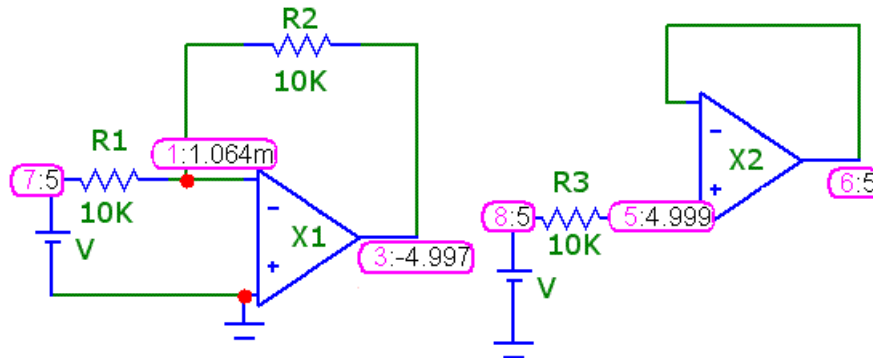
L'unica precauzione per mantenere precisioni accettabili, è che gli strumenti utilizzati siano ad alta impedenza, in modo da non prelevare significativamente correnti che influirebbero sull'equilibrio elettrico del circuito.

Ma il vero limite del metodo è la difficoltà, proprio per la medesima ragione, di collegare tra loro più circuiti elementari di calcolo per risolvere schemi di calcolo più complessi.

L'amplificatore operazionale

Il problema fu risolto brillantemente solo verso la fine degli anni '60, con l'avvento dei circuiti integrati e dei primi "amplificatori operazionali" (il precedente impiego di amplificatori a valvole termoioniche comportava infatti apparati costosi, delicati ed instabili).

La caratteristica principale di questi integrati è l'altissima impedenza d'ingresso ed il grandissimo guadagno (rapporto fra segnale d'uscita rispetto a quello di ingresso). Questo fa sì che chiudendo in reazione negativa il segnale d'uscita, si ottiene praticamente l'uguaglianza di questo col segnale d'ingresso:



La figura riporta le 2 principali configurazioni: invertente (X1) e non-invertente (X2), simulate in MicroCap9, e mostra quanto detto.

Ma oltre a questo importante risultato, si può osservare che il rapporto fra uscita ed ingresso può essere variato semplicemente col rapporto delle rispettive resistenze (cioè $K = \frac{R2}{R1}$, nella figura precedente): ciò toglie il limite del < di 1 del potenziometro, quindi K può essere una costante qualsiasi.

La somma di più segnali (o la sottrazione, cambiando il segno del segnale) è poi ottenibile aggiungendoli all'ingresso, con le rispettive resistenze.

Tutte le 4 operazioni algebriche sono quindi pienamente realizzabili e non vi è limite di complessità, in quanto i risultati delle singole operazioni, rigenerati dai singoli amplificatori, non sono praticamente influenzati dagli altri circuiti.

Un esempio applicativo

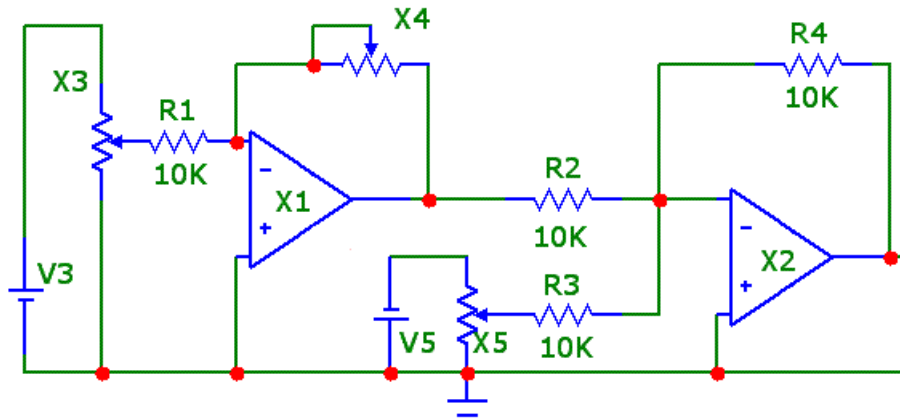
Per meglio fissare le idee sull'utilità pratica dei "calcolatori analogici", supponiamo di dover muovere un carrello elevatore/traslatore (quindi su un piano verticale) da un punto A (di coordinate x_A, y_A) a un punto B (x_B, y_B) in modo lineare.

Supponiamo inoltre che la posizione orizzontale del carrello sia rappresentata da un potenziometro e che si voglia generare il riferimento di posizione verticale (y) in funzione appunto di quella orizzontale (x).

Dal punto di vista matematico, la relazione è elementare : $y = K \cdot x + y_0$

$$(\text{con } K = \frac{yB - yA}{xB - xA} \quad , e : y0 = yA - K \cdot xA).$$

Un circuito di calcolo corrispondente, supponendo noti K (positivo) e y0, può essere:



Dove X3 è il potenziometro della posizione orizzontale (x), mentre X4 è quello che fissa il valore di K ed X5 il valore di y0.

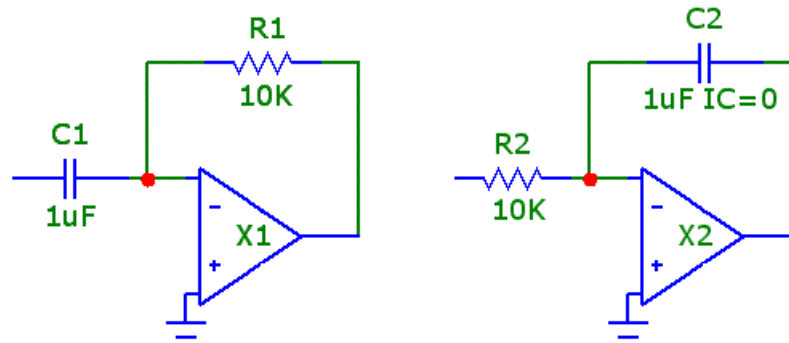
L'amplificatore X1 dà in uscita il termine Kx, però cambiato di segno, che viene sommato al valore di X5 (y0), pure questo con segno cambiato. La loro somma, invertita da X2, dà infine y.

Anche se possibile, meno facile sarebbe stata la soluzione partendo dalla sola conoscenza delle coordinate dei 2 punti. (per la moltiplicazione e divisione fra variabili e non per costanti si veda la [nota](#)).

Calcoli integro-differenziali

Ma non è finita. Fra i pregi dei calcolatori analogici c'è la possibilità di eseguire anche funzioni di derivazione e di integrazione.

Senza entrare nella teoria di funzionamento, si indicano qui le 2 principali configurazioni:

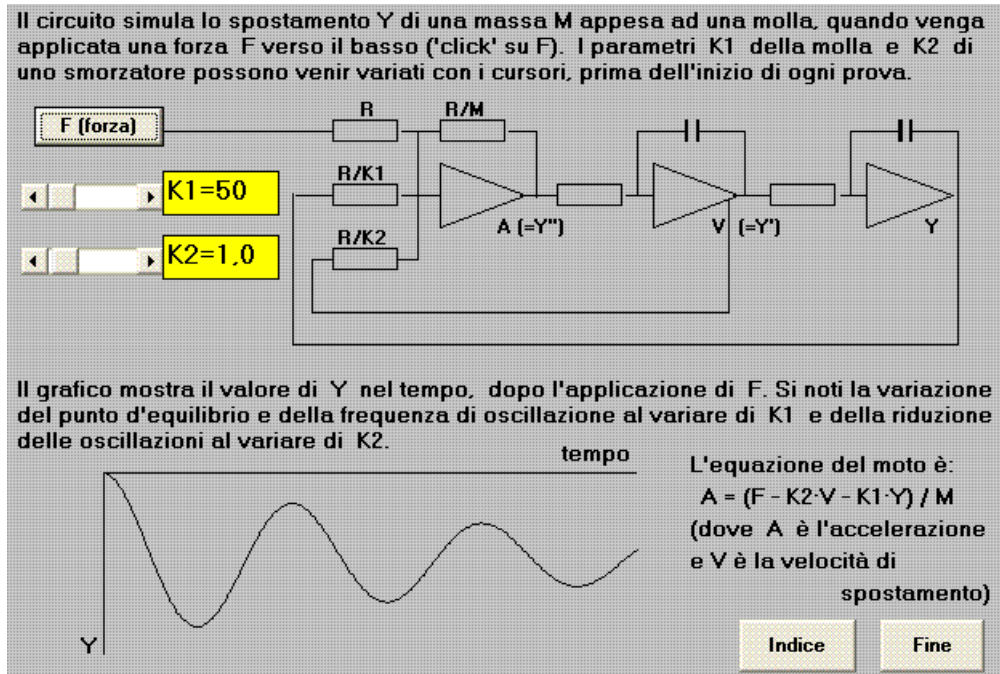


Il primo (X1) è un derivatore, il secondo (X2) un integratore, le cui "costanti di tempo" sono rispettivamente $R1C1$ ed $R2C2$ (si noti la condizione iniziale stabilita per l'integratore con $IC=0$).

Soprattutto queste configurazioni sono quelle che permettono la simulazione dei più svariati fenomeni fisici, come si diceva all'inizio, ma queste hanno anche reso possibile lo sviluppo pratico della regolazione automatica.

Tuttora infatti la maggioranza dei regolatori è basata sull'impiego di amplificatori integrati analogici, prevalentemente in configurazioni integratrici.

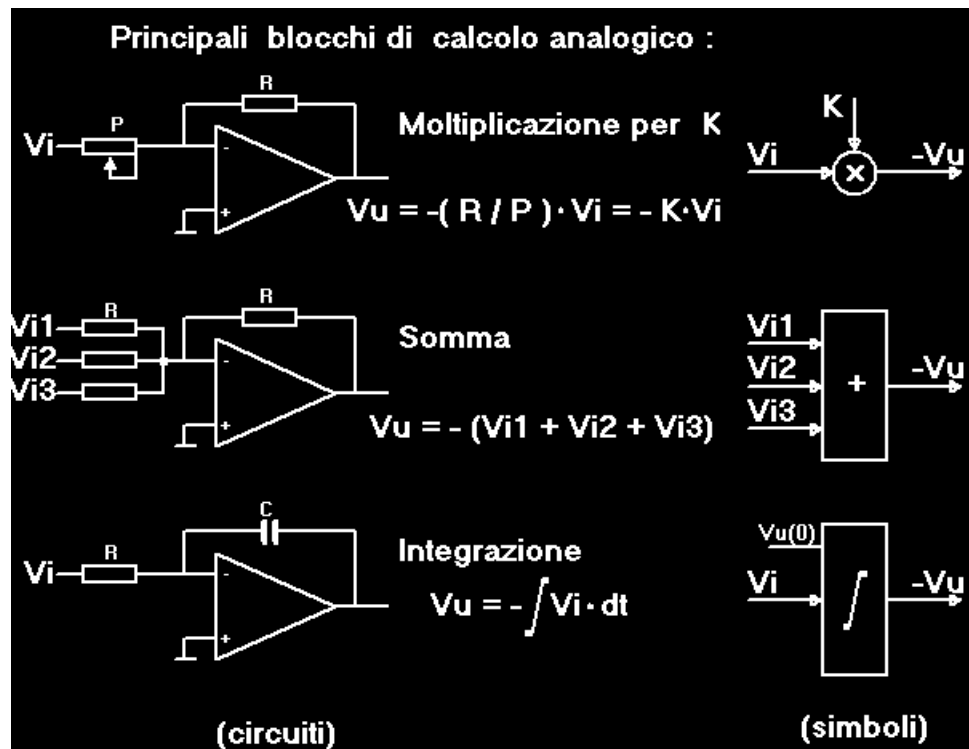
Quello che però interessa qui sottolineare è l'aspetto della soluzione matematica, cioè la possibilità di studiare il comportamento di sistemi governati da equazioni integro-differenziali, con una semplice simulazione. Per un'idea più precisa di questa possibilità, si riporta la videata di un vecchio programma in VisualBasic che illustra come utilizzare degli integratori operazionali per lo studio del raggiungimento della posizione di equilibrio di una massa appesa ad una molla:



(chi fosse interessato alla sperimentazione con questo programma, può trovarlo nel mio [Sito](#) con Elettronica analogica/Circuiti lineari con OpAmp/Esempio di applicazione).

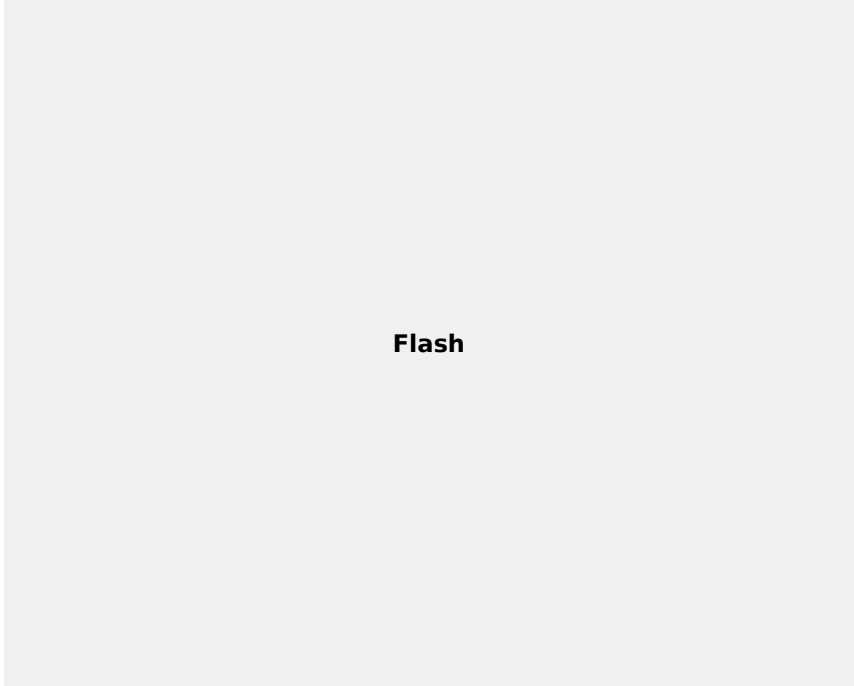
Conclusioni riassuntive

A conclusione di questa breve panoramica, si riporta una tabella in uso molti anni fa, con una simbologia di calcolo, e le corrispondenti configurazioni operazionali. La simbologia semplifica concettualmente la configurazione di calcolo, rendendo più evidenti le funzioni svolte.



Anche questo è tratto dal mio Sito (Elettronica Analogica/Applicazioni degli OpAmp/Calcolo), in cui sono disponibili programmi di simulazione. Per comodità, vengono qui riportati in edizione YouTube:

Flash



Flash

Chi fosse interessato a maggiori dettagli, è pregato di farne richiesta nel Forum.

Un'ultima riflessione: è strano che questo articolo sul calcolo analogico sia stato scritto da uno che da oltre quarant'anni è convinto sostenitore della superiorità delle tecniche digitali rispetto a quelle analogiche!

Pentimento?. No. Osservo che tutti gli esempi qui riportati sono fatti con il calcolatore (dunque simulazioni analogiche ... simulate digitalmente).

Estratto da "<http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:G.schgor:articolo11>"