

# Rapporti tecnici INGV

Simulazione di un geofono  
utilizzando pSPICE

# 242



## **Direttore**

Enzo Boschi

## **Editorial Board**

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Simona Masina (BO)

Mario Mattia (CT)

Nicola Pagliuca (RM1)

Umberto Sciacca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

[redazionecen@ingv.it](mailto:redazionecen@ingv.it)



# Rapporti tecnici INGV

## **SIMULAZIONE DI UN GEOFONO UTILIZZANDO pSPICE**

Giovanni Romeo, Francesco Pongetti, Giuseppe Spinelli

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Sismologia e Tettonofisica)

# 242



## Indice

Introduzione.....	5
1. Il geofono.....	5
2. Determinazione sperimentale dei parametri dell'S-13 .....	8
3. Modello pSPICE del sismografo .....	11
4. Qualche esperimento con il modello .....	15
4.1 Oscillazioni smorzate con pick-up coil non caricato .....	15
4.2 Effetto dell'induttanza della bobina di pick-up.....	16
4.3 Effetto dell'invecchiamento del magnete.....	17
4.4 Studio dell'estensione della banda passante.....	17
4.5 Studio del modello in un caso reale .....	19
Conclusioni.....	21
Riconoscimenti .....	22
Bibliografia .....	22



## Introduzione

Questo lavoro studia il modello pSPICE (personal Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) di un geofono. Perché un modello pSPICE? La principale utilità di un modello (che va al di là dello studio asettico della funzione di trasferimento) è quello di interfacciarsi con il dispositivo elettronico che ne estende la risposta (è difficile oggi trovare un sismografo che non sia generosamente aiutato da un qualche misterioso dispositivo di *feed-back*).

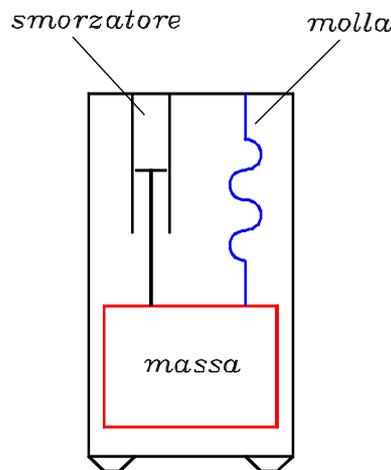
Mentre è relativamente facile indurre pSPICE a risolvere semplici problemi meccanici è molto più difficile indurre blasonati simulatori per sistemi meccanici ad incorporare un circuito elettronico. Il lavoro presentato parte da misure fatte su un geofono S-13 per costruirne il modello, che viene verificato con misure reali.

Il modello viene usato per studiare il comportamento del geofono simulandone l'invecchiamento del magnete ed il comportamento ad alta frequenza (effetto dell'induttanza della bobina di *pick-up*). Viene mostrato come interfacciare il modello ad un semplice estensore di banda utilizzando il metodo di Lippmann, e vengono confrontate le risposte del geofono simulato prima e dopo l'espansione di banda. Infine viene simulata la risposta del modello a un terremoto reale, mostrando come operare sul resistore di smorzamento per evitare la saturazione per forti segnali.

Questo lavoro può rappresentare il punto di partenza per chi voglia costruire, o soltanto capire, un sismometro a bilanciamento di forze.

### 1. Il geofono

Per geofono intendiamo un sensore di movimento costituito da una massa, una molla, un telaio ed un trasduttore elettromagnetico che misura la velocità relativa tra massa e telaio (Figura 1).



**Figura 1.** Schema semplificato di un sismografo. La massa è libera di muoversi verticalmente sospesa alla molla. Lo smorzatore fa estinguere le oscillazioni indotte nel sistema massa-molla.

Quando il terreno si muove con un'accelerazione  $x$  la variabile  $y$  nella (1) rappresenta lo spostamento della massa mobile dalla posizione di riposo:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = kax \quad (1)$$

Dove:

$m$	$[m]$	è la massa mobile
$c$	$[m][t]^{-1}$	esprime l'azione di frenamento dello smorzatore
$k$	$[m][t]^{-2}$	è la costante elastica della molla
$y$	$[l]$	è lo spostamento della massa rispetto al telaio
$x$	$[l][t]^{-2}$	è l'accelerazione a cui viene sottoposto il telaio
$a$	$[t]^{-2}$	è la costante dimensionale (rappresenta la conversione da accelerazione a spostamento per tempi lunghi)

Di solito la (1) viene scritta nella forma:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\xi\omega_0 \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = \omega_0^2 ax \quad (2)$$

Dove:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \xi = \frac{c}{2\omega_0 m} \quad (2.1)$$

La risposta di un sistema descritto dalla (2) ad un gradino è:

$$y(t) = 1 - \frac{\omega_0 e^{-\alpha t}}{\omega_d} \sin(\omega_d t + \phi) \quad (3)$$

Dove:

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} \quad (3.1)$$

$$\alpha = \xi\omega_0 \quad (3.2)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\omega_d}{\alpha} \right) \quad (3.3)$$

Vediamo che la risposta è un segnale armonico decrescente esponenzialmente di pulsazione  $\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$  che coincide con  $\omega_0$  per  $\xi = 0$ .  $\xi$  è detto coefficiente di smorzamento. Tanto più è grande, tanto più le oscillazioni si smorzano in fretta. La presenza dello smorzamento agisce anche su quello che percepiamo come frequenza di risonanza. La frequenza delle oscillazioni che misuriamo in caso di smorzamento è più bassa della frequenza non smorzata. Nel caso in cui  $\xi = 1$  la (3.1) si annulla; la pulsazione è 0 ed il sistema non oscilla più. Non bisogna lasciarsi ingannare dal fatto che per  $\xi > 1$  la (3.1) abbia un valore immaginario. Non esiste nessun impedimento naturale a smorzare il nostro sistema a piacimento. Solo la formulazione diviene più complicata. Il sistema continua a non oscillare ed a rispondere con esponenziali sempre più lenti.

Il nostro scopo è quello di utilizzare le equazioni del geofono per inserirle in una simulazione e studiarne il comportamento. Per questo è utile usarne la trasformata di Laplace:

$$Y(s) = \frac{a \cdot \omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \cdot X(s) \quad (4)$$

La (4) descrive che cosa succede alla  $Y(s)$  quando il sistema  $\frac{a \cdot \omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}$  viene sollecitato da un'eccitazione  $X(s)$ . Possiamo scrivere la (4) come:

$$Y(s) = F(s) \cdot X(s) \quad (5)$$

Dove  $F(s)$  è la funzione di trasferimento del sistema e descrive la risposta in spostamento della posizione della massa ad un'eccitazione in accelerazione. Se vogliamo la risposta in velocità, come si usa in sismologia, possiamo riscrivere la (5) come:

$$Y(s) = s \cdot F(s) \cdot \frac{X(s)}{s} \quad (6)$$

e considerare che, rappresentando  $X(s)/s$  la velocità del terreno, allora  $s \cdot F(s)$  rappresenta la funzione di trasferimento per la velocità. Per un geofono dobbiamo considerare che il trasduttore elettromagnetico è sensibile alla velocità della massa, piuttosto che alla posizione, il che equivale ad una ulteriore derivazione della  $F(s)$ .

Il geofono utilizzato per gli esperimenti è il Teledyne Geotech S-13, una volta usato nella Rete Sismica Nazionale, presente in INGV in numerosi esemplari ed ancora in produzione. Le caratteristiche dell'S-13 utili per la costruzione del modello sono [Geotech instruments, 2000]:

Parametri dell'oscillatore meccanico:

Massa mobile	5 kg $\pm$ 1%
Frequenza propria di risonanza	regolabile da 0.75 a 1.1 Hz
Coefficiente di smorzamento (non smorzato)	0.03
Massimo spostamento della massa mobile	$\pm$ 3 mm

Parametri dei trasduttori

<u>Bobina generatrice (<i>pick-up coil</i>) (trasduttore velocità-tensione)</u>		
Costante di generazione	629 V/(m/s) $\pm$ 2%	
Resistenza	3.73 $\pm$ 0.01 k $\Omega$	
Induttanza	3.2 $\pm$ 0.2 H	
<u>Bobina motrice (<i>calibration coil</i>) (trasduttore corrente-forza)</u>		
Costante di mozione	0.1975 $\pm$ 2%	N/A
Resistenza	23 $\Omega$ $\pm$ 3%	
Induttanza	160 $\mu$ H $\pm$ 3%	

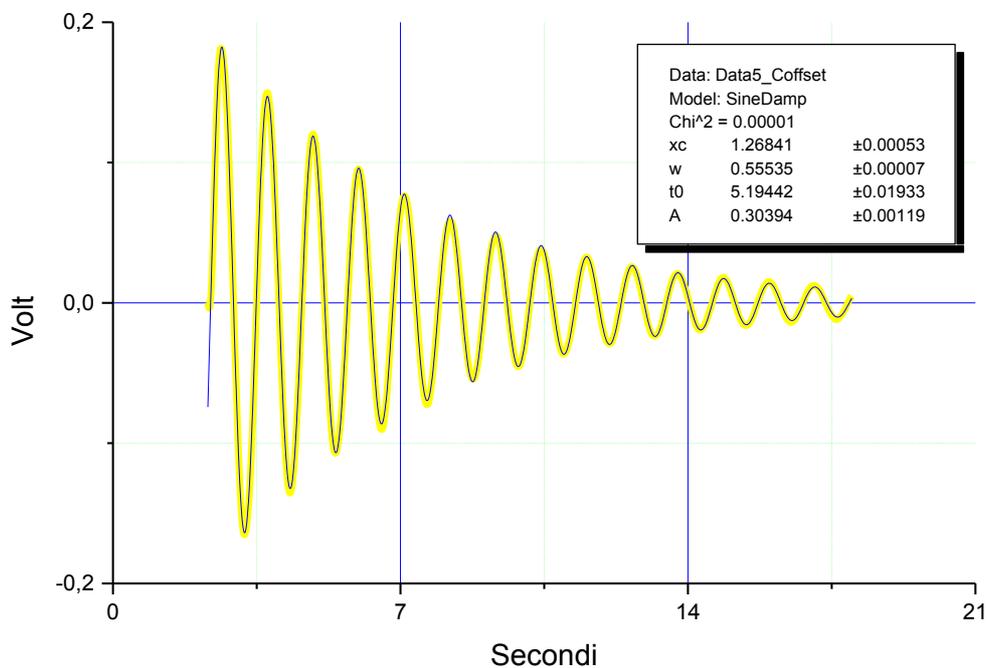
## 2. Determinazione sperimentale dei parametri dell'S-13

L'S-13 è un sistema aperto e ben documentato: l'operatore ha la possibilità di interagire direttamente con la massa mobile. Uno dei metodi di taratura è estremamente diretto: è possibile appoggiare (o rimuovere) un peso sulla (dalla) massa causandone un movimento, la cui analisi permette di ricavare le caratteristiche dello strumento. Questo è stato fatto per l'S-13 utilizzato per le sperimentazioni. Il sensore è stato sollecitato rimuovendo rapidamente un peso di 1g, sollecitandolo quindi con un gradino di ampiezza  $A = 0.001 \cdot 9.8 = 0.0098 \text{ m/s}^2$  e rilevando sulla bobina di pick-up del sensore le oscillazioni smorzate indotte. Le oscillazioni che misuriamo sono, in questo caso, la derivata dello spostamento della massa rispetto al telaio, che deve avere un andamento sinusoidale decrescente esponenzialmente (la massa oscilla in aria ed è magnetica: quindi le sue oscillazioni vengono smorzate sia dalla resistenza del mezzo che dalle correnti di Foucault).

Nella Figura 2 è indicata la regressione del segnale sulla bobina di pick-up con la curva:

$$y(t) = Ae^{-\frac{x}{t_0}} \sin\left(\pi \frac{x - x_c}{w}\right) \quad (7)$$

La curva mostra un buon accordo con i dati sperimentali: in giallo appaiono le misurazioni, in nero la curva di regressione.



**Figura 2.** Regressione del segnale di eccitazione a gradino indotto dalla forza esercitata dal peso di 1 g sulla massa dell'S-13 con la curva (7).

Da questo possiamo dedurre le caratteristiche meccaniche:

$$\omega_d = \pi / w = 5.661 \pm 0.001 \text{ s}^{-1} \quad (7.1)$$

$$f_d = \frac{\omega_d}{2\pi} = 0.9010 \pm 0.0001 \text{ s}^{-1} \quad (7.2)$$

$$\alpha = \frac{1}{t_0} = 0.193 \pm 0.001 \text{ s}^{-1} \quad (7.3)$$

$$\alpha = \xi \omega_0 \quad (7.4)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{\alpha^2}{\omega_d^2 - \alpha^2}} = 0.034 \pm 0.002 \quad (7.5)$$

$$\omega_0 = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \xi^2}} = 5.664 \pm 0.002 \text{ s}^{-1} \quad (7.6)$$

$$k = \omega_0^2 m = 163 \pm 2 \text{ N/m} \quad (7.7)$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 0.9015 \pm 0.0003 \text{ s}^{-1} \quad (7.8)$$

Ricaviamo inoltre le caratteristiche elettriche. Le resistenze della bobina di pick-up e di calibrazione possono semplicemente essere misurate con un ohmetro:

$$R_{pick-up} = 3.73 \pm 0.01 \text{ k}\Omega \quad (8)$$

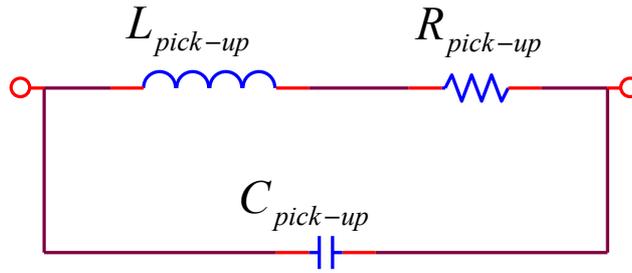
$$R_{cal} = 23 \pm 2 \text{ }\Omega \quad (8.1)$$

L'induttanza della bobina di calibrazione può essere misurata con un induttanzimetro:

$$L_{cal} = 161 \pm 2 \text{ }\mu\text{H} \quad (8.2)$$

L'induttanza della bobina di pick-up è stata misurata indirettamente perché il valore misurato sembrava incongruente con la frequenza di risonanza.

Schematizzando la bobina di pick-up come in Figura 3, la capacità  $C_{pick-up}$  e l'induttanza  $L_{pick-up}$  possono essere calcolate ponendo in parallelo alla bobina di pick-up differenti condensatori e misurando come ciascuno di essi modifica la frequenza di risonanza.



**Figura 3.** Schema equivalente di un induttore reale. La frequenza di risonanza dipende principalmente da  $L_{pick-up}$  ( $L_{pu}$ ) e da  $C_{pick-up}$  ( $C_{pu}$ ) mentre  $R_{pick-up}$  ( $R_{pu}$ ) ha effetto sul fattore di merito<sup>1</sup>.

Il risultato del calcolo condotto con una regressione su 7 frequenze di risonanza ha rilevato i valori:

$$L_{pick-up} = 3.2 \pm 0.2 \quad \text{H} \quad (8.3)$$

$$C_{pick-up} = 1.3 \pm 0.1 \quad \text{nF} \quad (8.4)$$

<sup>1</sup> Il circuito equivalente della bobina di Figura 3 rappresenta una variante serie-parallelo del circuito risonante parallelo classico [Biondo e Sacchi, 2000] e per la precisione la condizione di risonanza dipende anche da  $R_{pick-up}$ , che abbiamo trascurato, non aspettandoci significativa influenza per gli scopi del modello.

Più approfonditamente la formula si ottiene scrivendo l'ammettenza totale del circuito e uguagliandone a zero la parte immaginaria per realizzare la condizione di risonanza.

Formula non approssimata per la frequenza di risonanza della bobina: 
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{pu}C_{pu}}} \sqrt{1 - \frac{C_{pu}R_{pu}^2}{L_{pu}}}$$

Questa può essere semplificata fino alla formula classica se nel circuito risulta  $L_{pu} \gg C_{pu}R_{pu}^2$ , cioè la radice a destra tende a 1.

### 3. Modello pSPICE del sismografo

La funzione di trasferimento spostamento/accelerazione, descritta dalla (4) e/o (5):

$$F(s) = \frac{a \cdot \omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (9)$$

ci dice che, per tempi lunghi (teorema del valore finale), un'eccitazione con un gradino di accelerazione  $E\Phi(t)$  porta ad una risposta:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E\Phi(t) f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s F(s) \frac{E}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{E}{s} \frac{a \cdot \omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} = E a \quad (9.1)$$

Dove  $a$  ha il significato di rapporto spostamento/accelerazione.

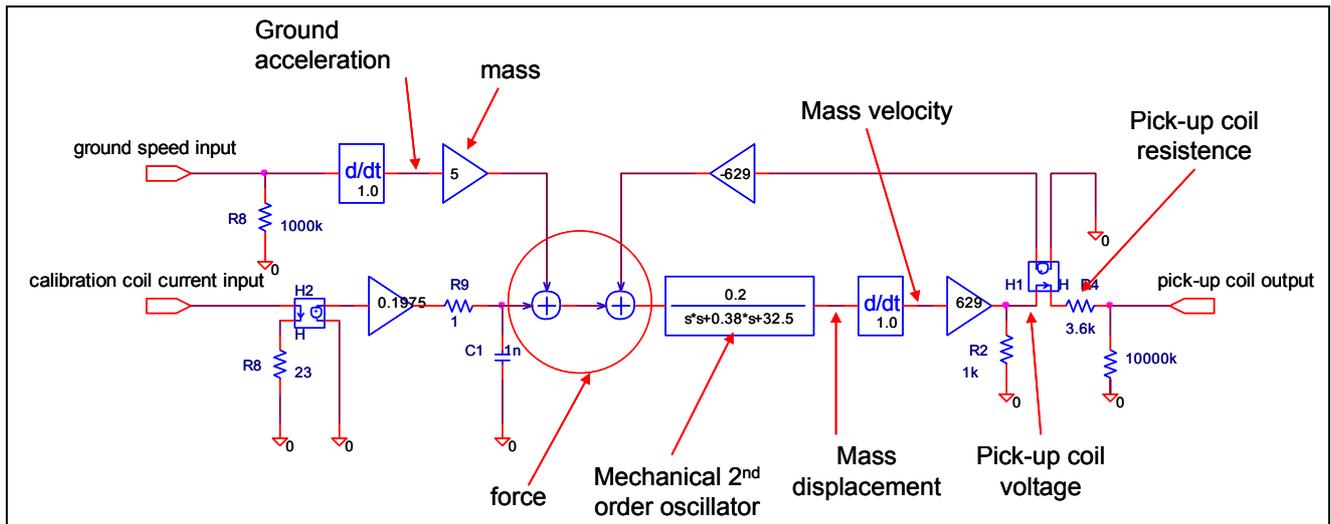
$$k = 4 \cdot \pi^2 \cdot 5 \approx 200 \quad N/m \quad (9.2)$$

$$a = \frac{m}{k} = \frac{5 \pm 0.05 kg}{163 \pm 2 N/m} = 0.0307 \pm 0.0007 \quad m/(m/s^2) \quad (9.3)$$

Inserendo i valori numerici nella (9) abbiamo il modello dell'oscillatore meccanico del sistema massa-molla dell'S-13.

$$F(s) = \frac{0.2}{s^2 + 0.38s + 32.5} \quad (10)$$

Questa equazione può essere direttamente usata per costruire il modello pSPICE dell'S-13 in Figura 4. Il circuito rappresenta un S-13, completo di bobina di calibrazione e di generatore. Descriviamolo, da sinistra verso destra. Il segnale può essere proposto allo strumento attraverso due ingressi: uno elettrico (*calibration coil*) ed uno meccanico (*ground speed input*). *Calibration coil* è collegato ad un convertitore corrente-tensione (H2) connesso al riferimento attraverso R8, che rappresenta la resistenza della bobina di calibrazione. All'uscita di H2 troviamo il blocco con amplificazione di 0.1975, che rappresenta il fattore di conversione corrente-forza della bobina di calibrazione.



**Figura 4.** Schema pSPICE di un geofono elettromagnetico S-13, utilizzando un blocco di Laplace per la simulazione della meccanica [Romeo G., 2011].

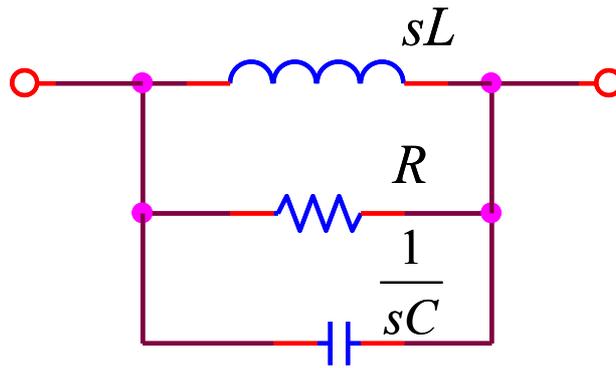
L'ingresso *ground speed input* è direttamente collegato ad un blocco derivatore, che trasforma la velocità del terreno in accelerazione. Il blocco subito dopo, di guadagno 5, rappresenta la massa del sismometro che, moltiplicata per l'accelerazione, produce una forza.

Tutte queste forze si sommano nei due blocchi sommatore (*force*) ed entrano all'ingresso del blocco di Laplace (*mechanical 2<sup>nd</sup> order oscillator*) che abbiamo ripreso dalla (10). All'uscita di questo blocco abbiamo lo spostamento della massa rispetto al telaio. Siccome la trasduzione del geofono è elettromagnetica il *pick-up* è sensibile alla velocità della massa (per questo viene inserito il derivatore successivo) con un guadagno che dipende dalla bobina ed è pari a 629. L'uscita di questo blocco rappresenta l'uscita dello strumento.

In serie all'uscita c'è la *pick-up coil resistance* (3.6 kΩ) ed il trasduttore corrente-tensione misura la corrente attraverso la bobina. La coppia bobina-magnete è sia un motore che un generatore. Da notare che il coefficiente del generatore (tensione/velocità) è uguale al coefficiente motore (forza/corrente) [Romeo G., 2011]. Il coefficiente motore (-629) simboleggia la forza che la corrente che fluisce sulla bobina esercita sulla massa. Questa corrente può essere semplicemente quella che fluisce nella bobina a causa della resistenza di smorzamento, ma può anche essere quella indotta da un sistema *single-coil* di reazione di velocità (come nel metodo di Lippmann [Lippman E., Gebrande H., 1983] descritto anche nel paragrafo successivo).

Questo modello è ottimo per esperimenti semplici, ma possiede il difetto di usare un blocco di Laplace. Il metodo che pSPICE usa per risolvere il blocco di Laplace introduce in alcuni casi problemi di non causalità: l'operazione di convoluzione richiesta dalla trasformazione inversa di Laplace richiede anche i dati futuri, che, in alcune condizioni (segnale di eccitazione arbitraria da file) il simulatore non può avere. Questi problemi possono essere superati utilizzando macromodelli elettrici che sfruttino le analogie elettromeccaniche di resistenze, condensatori ed induttori. L'uso di modelli come induttanze e condensatori non soffre di problemi di non causalità.

La Figura 5 rappresenta il parallelo di tre componenti di impedenza rispettivamente pari a  $sL$ ,  $R$ ,  $1/sC$  nel dominio di Laplace.



**Figura 5.** Il parallelo dei componenti nella figura rappresenta un sistema elettrico smorzato del secondo ordine.

L'impedenza complessa di questo parallelo è:  $Z(s) = V(s)/I(s)$

$$Z(s) = \frac{s}{s^2 C + \frac{s}{R} + \frac{1}{L}} \quad (11)$$

Questa espressione può essere pensata come una funzione di trasferimento che trasformi la corrente ai capi del bipolo in una tensione. Se confrontiamo la (10) e la (11) possiamo trovare i valori che attribuiti ai componenti della (11) riproducono la (10):

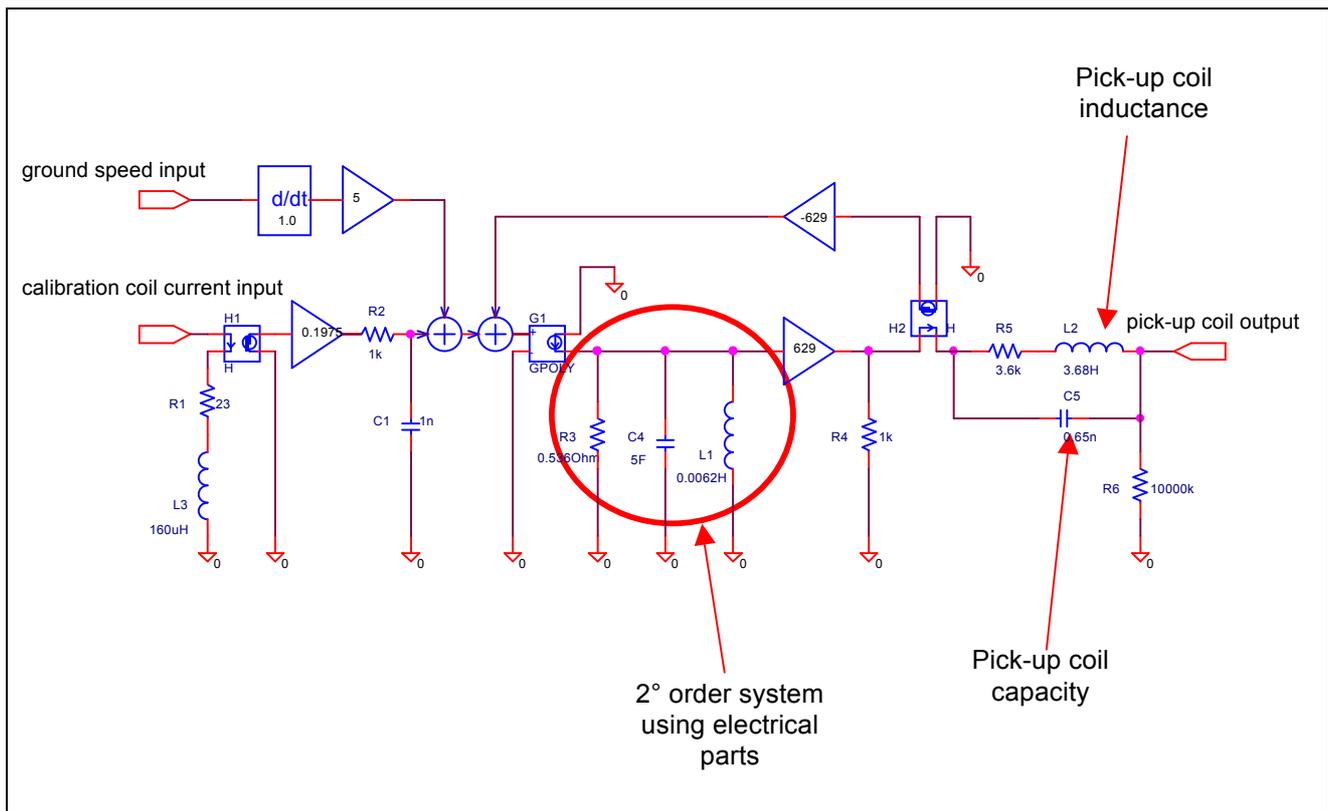
$$\frac{1}{s^2 C + \frac{s}{R} + \frac{1}{L}} s \Leftrightarrow \frac{0.2}{s^2 + 0.38s + 32.5} s \quad (12)$$

Il numeratore della (11) rappresenta un derivatore. Nella Figura 4, dopo il blocco di Laplace è stato introdotto un blocco derivatore per simulare il pick-up elettromagnetico. Questo effetto di derivazione è intrinseco nella (11).

Il confronto (12) porta ai seguenti valori per i componenti:

$$C = 5 \text{ F} \quad R = 0.536 \text{ } \Omega \quad L = 0.0061 \text{ H.} \quad (12.1)$$

Questi valori possono essere utilizzati per ottenere un modello pSPICE da utilizzare anche con segnali arbitrari (Figura 6).



**Figura 6.** Modello pSPICE utilizzabile con segnali arbitrari. Il blocco di Laplace di Figura 4 ed il derivatore che lo segue sono stati rappresentati attraverso il parallelo di R3, C4 ed L1, pilotati dal convertitore tensione-corrente G1.

Nel circuito di Figura 6 il blocco di Laplace ed il successivo derivatore che appaiono in Figura 4 sono stati sostituiti con G1 ed il parallelo di R3, C4 ed L1 (con i valori desunti dalla (12)).

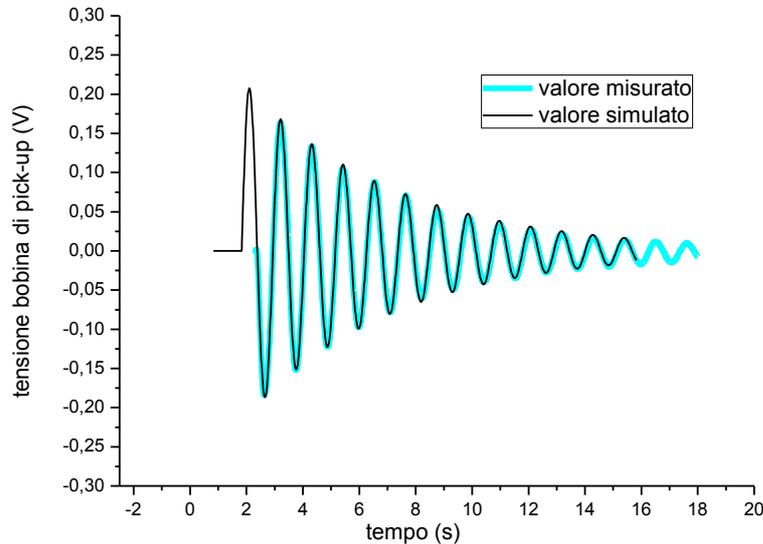
Il blocco G1 è un convertitore tensione-corrente perché la (11), che descrive il parallelo di componenti della Figura 5 rappresenta un'impedenza, ed associa, ad una corrente che la percorre una tensione ai capi.

All'uscita dei blocchi sommatore di Figura 6 la forza esercitata sulla massa viene rappresentata con una tensione, che deve essere convertita in corrente per il corretto uso del circuito formato da R3, C4 ed L1. Questa nuova rappresentazione comprende anche le induttanze della bobina di calibrazione di ingresso L3 e di pick-up di uscita L2.

## 4. Qualche esperimento con il modello

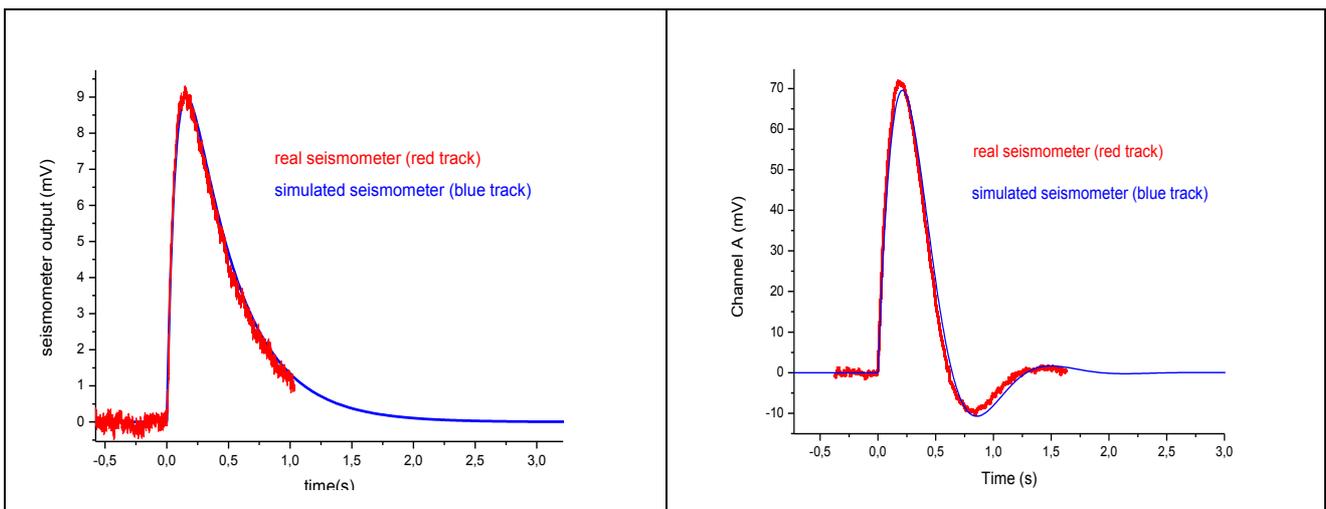
### 4.1 Oscillazioni smorzate con pick-up coil non caricato

Eccitando il modello con un gradino di 50 mA si ottiene un'oscillazione smorzata decrescente. Questa oscillazione, sovrapposta ai dati misurati sul geofono (Figura 2) è presentata in Figura 7, e mostra un buon accordo con la misura.



**Figura 7.** Risposta del modello di Figura 6 eccitato con un gradino di corrente di 50 mA sulla bobina di calibrazione. La traccia ciano, misurata sul sismometro reale, mostra un buon accordo tra il modello ed il dispositivo fisico.

Anche le simulazioni fatte con il resistore di carico (damper) inserito mostrano che il modello funziona bene.



**Figura 8.** Risposta al gradino con sismografo supersmorzato (damper 0.7 kΩ) a sinistra e sismografo sottosmorzato (damper 8.2 kΩ) a destra. La differenza nei diagrammi è imputabile al fatto che in questa prova è stato utilizzato un sismografo diverso da quello sul quale era stato costruito il modello.

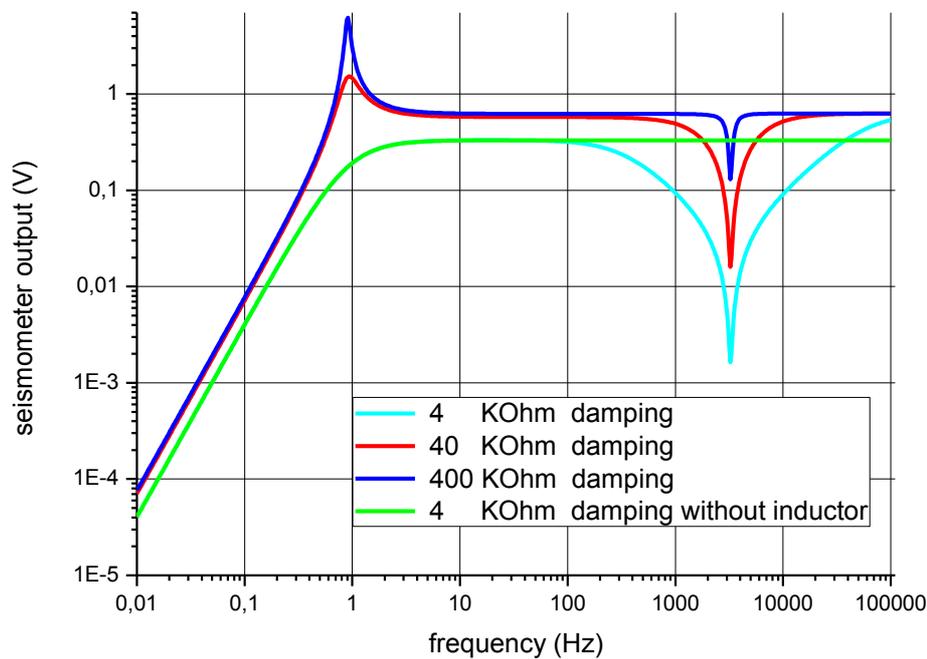
#### 4.2 Effetto dell'induttanza della bobina di pick-up

Evidentemente l'induttanza presentata dalla bobina di pick-up deve avere un effetto sul segnale di uscita. Ci aspettiamo che le frequenze per cui sia rilevabile un effetto siano dell'ordine di:

$$f(L, C) = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

cioè circa 3 kHz.

La Figura 9 riporta un diagramma della risposta in frequenza del sensore parametrizzato con la resistenza di smorzamento (4 kΩ, 40 kΩ, 400 kΩ).



**Figura 9.** La risposta del modello, eccitato con una velocità di 1 mV/(m/s), parametrizzato con damping di 4 kΩ, 40 kΩ e 400 kΩ. La traccia verde rappresenta la risposta del modello senza induttore in uscita (come in Figura 4).

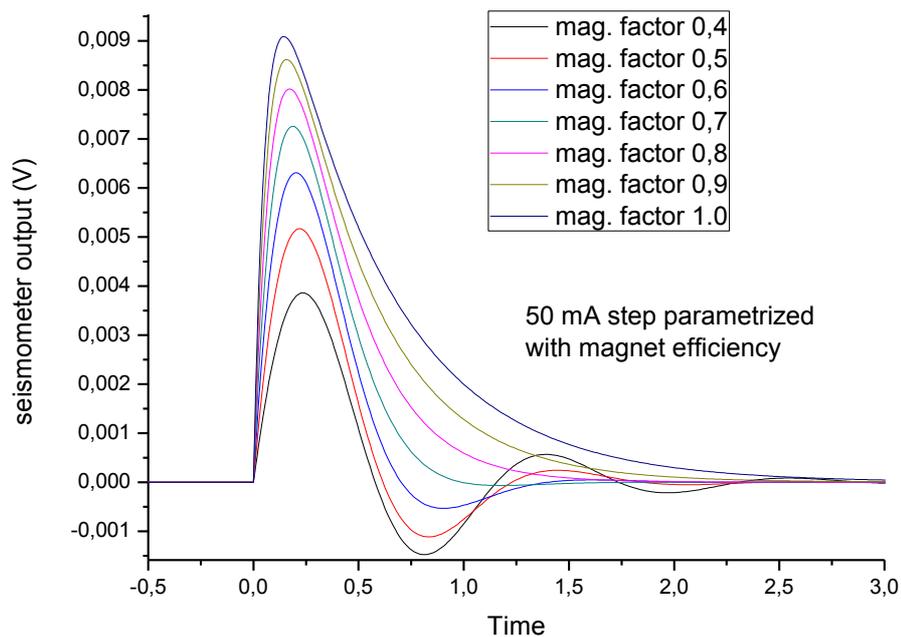
L'induttore e la sua capacità parassita contribuiscono, assieme alla resistenza di smorzamento, a formare un *notch* a circa 3 kHz, tanto più evidente quanto più bassa è la resistenza di smorzamento.

Il fenomeno comincia ed essere percepito al di sopra dei 100 Hz, abbastanza lontano dalle frequenze di interesse sismologico.

### 4.3 Effetto dell'invecchiamento del magnete

L'invecchiamento del magnete permanente porta ad un cambiamento delle caratteristiche del sismometro. Non si tratta soltanto di una variazione della tensione di uscita, ma anche dello smorzamento, essendo parte di questo indotto magneticamente. Quindi, a parità di segnale, ad una minore uscita si associa uno smorzamento minore. In caso di uso della bobina di calibrazione la deviazione diviene ancora più evidente, essendo la forza indotta sulla massa dipendente anch'essa dal campo magnetico.

La Figura 10 riporta il diagramma dell'uscita di un S-13 caricato su una resistenza da 700  $\Omega$  (quindi con smorzamento supercritico) ed eccitato con 50 mA sulla bobina di calibrazione.

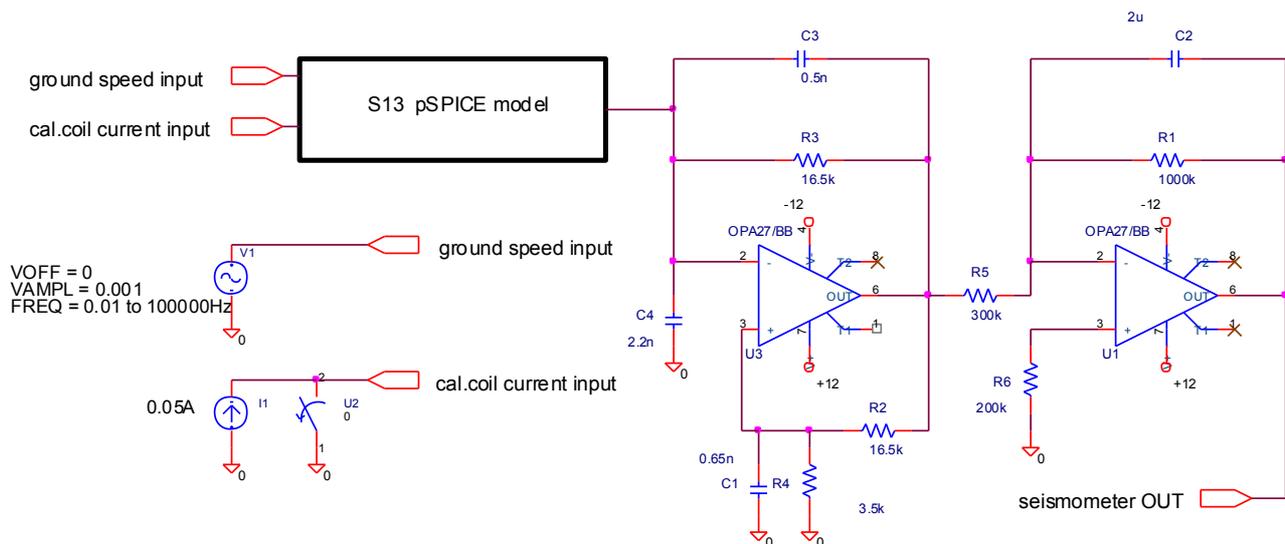


**Figura 10.** Uscita del sismometro S-13, caricato con 700  $\Omega$  ed eccitato con un gradino da 50 mA. La famiglia di curve è ottenuta parametrizzando l'intensità del magnete, con fattori da 0,4 (magnete vecchio) ad 1 (magnete in buono stato).

Esaminando la figura si vede come il comportamento dell'oscillatore passi dallo smorzamento supercritico (mag. factor = 1) allo smorzamento sottocritico (mag. factor = 0,4).

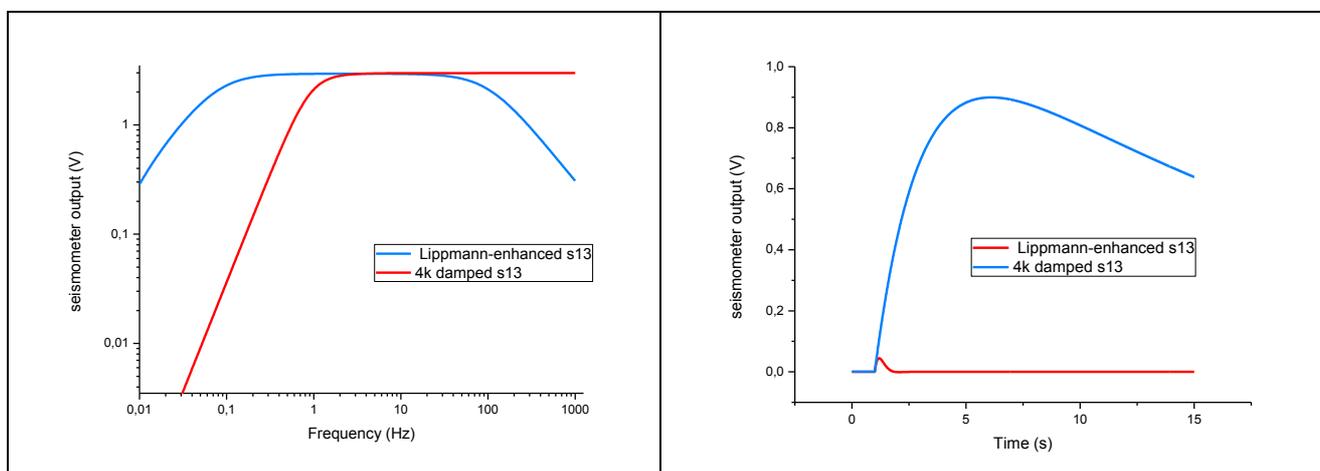
### 4.4 Studio dell'estensione della banda passante

Il modello pSPICE analizzato fu originariamente prodotto per estendere la banda dell'S-13, allora utilizzato nella Rete Sismica Nazionale. Il metodo di Lippmann [Lippman E., Gebrande H., 1983; Romeo G., Braun T., 2007] è una ricetta per l'estensione di banda che si adatta perfettamente ad un pendolo con trasduzione elettromagnetica. La Figura 11 riporta lo schema di un semplice dispositivo Lippman, collegato al modello del sensore S-13.



**Figura 11.** Il modello pSPICE del sensore S-13, collegato ad un semplice estensore di banda di tipo Lippmann. Il sensore viene eccitato nel dominio della frequenza da un generatore variabile (collegando il terminale *ground speed input*) e nel tempo (fornendo un gradino di corrente al terminale *cal.coil current input*).

Le risposte alla sollecitazione in frequenza e nel tempo sono presentate nella Figura 12.



**Figura 12.** Risposta in frequenza ed al gradino dell'estensore di banda di tipo Lippmann illustrato in Figura 11. A sinistra notiamo che il taglio alle basse frequenze che passa da 1 a 0.1 Hz. Questo si traduce in una notevole risposta al gradino (a destra), il cui contenuto in bassa frequenza viene esaltato dall'aumento della estensione di banda. In queste simulazioni è stata ignorata l'induttanza della bobina di pick-up.

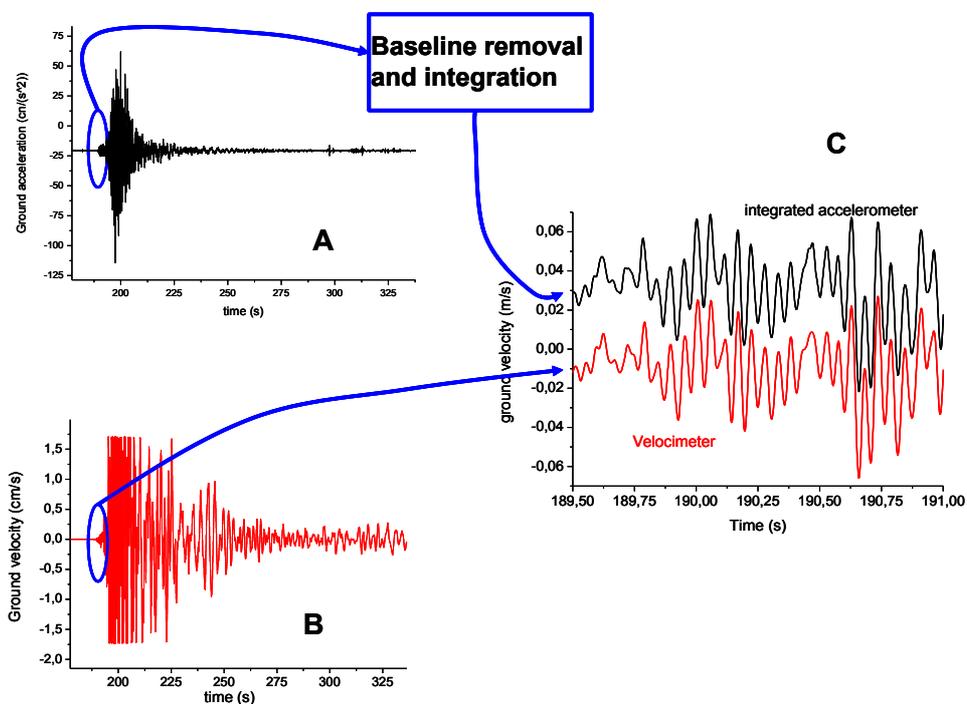
#### 4.5 Studio del modello in un caso reale

Il modello può essere usato per studiare il comportamento del sensore in casi reali. pSPICE accetta il segnale campionato con un riferimento temporale. In questo caso è preferibile usare il modello di Figura 6.

La Figura 13 rappresenta un evento registrato a Pieve di Coriano il 29/5/2012. Nella stazione erano presenti un Episensor (accelerometro) ed un Le-5s (velocimetro) . La traccia rossa del Le-5s appare saturata a 1.5 m/s (Figura 13 - B) mentre l'Episensor resiste disinvoltamente a oltre 1 m/(s<sup>2</sup>) (Figura 13 - A).

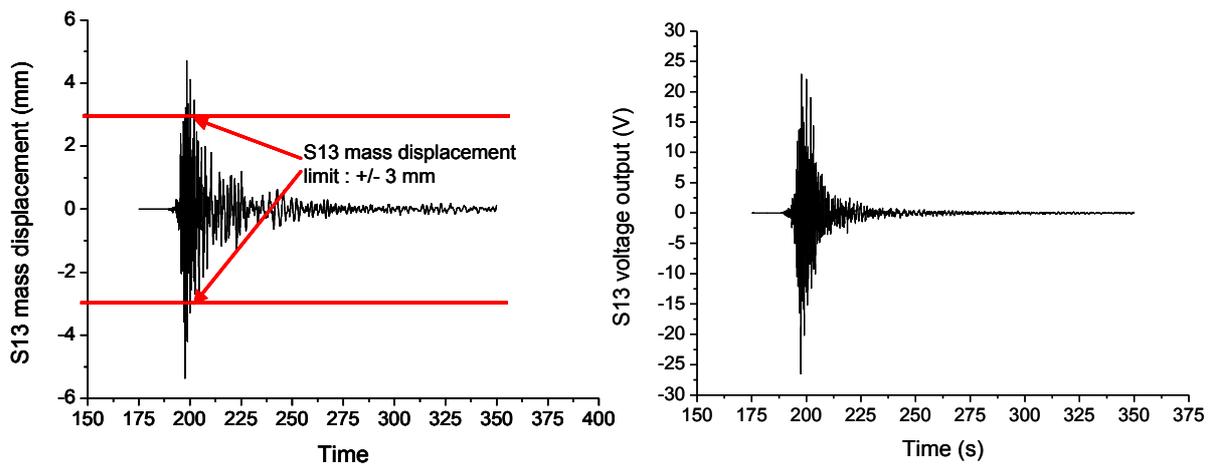
Il segnale dell'accelerometro è stato privato dell'offset ed integrato in modo da avere un segnale di velocità da paragonare a quello del velocimetro. Questo paragone è stato fatto con il segnale all'inizio dell'evento, quando il segnale del velocimetro non mostra tracce di saturazione.

Il risultato del paragone appare nella Figura 13 – C, che mostra due tracce molto simili. Questo rende confidenti sulla possibilità di usare il segnale integrato dell'accelerometro per eccitare il modello.



**Figura 13.** L'evento di Pieve di Coriano registrato dall'Episensor (A) e dal Le-5s (B). La registrazione del Le-5s mostra una ampia zona saturata. Il segnale dell'accelerometro è stato trattato rimuovendo l'offset ed integrandolo in modo da produrre un segnale di velocità paragonabile a quello del Le-5s. Il risultato del paragone è visibile in C.

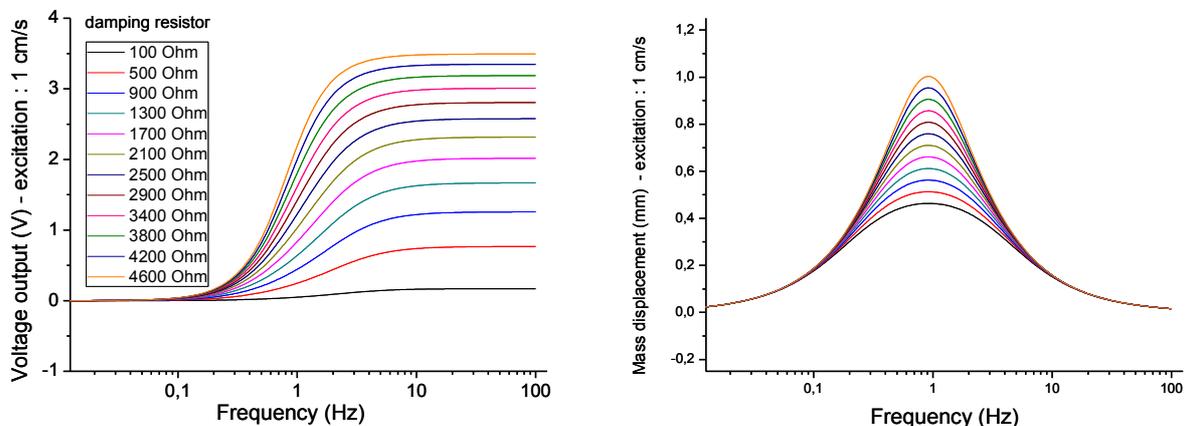
Che cosa sarebbe accaduto ad un S-13 a Pieve di Coriano? La risposta si può avere inserendo il segnale dell'accelerometro integrato nel modello. Il risultato è visibile nella Figura 14 dove a sinistra appare lo spostamento della massa dell'S-13, mentre a destra la tensione sulla bobina di pick-up.



**Figura 14.** L'evento di Pieve di Coriano come sarebbe apparso ad un S-13 con resistenza di smorzamento di 4.7 k $\Omega$ . A sinistra lo spostamento della massa, a destra la tensione di uscita.

Un geofono può saturare solo meccanicamente, quando il movimento della massa eccede la corsa prevista dalla meccanica. La saturazione elettrica dipende dal sistema di registrazione. Nella Figura 14 si vede che la corsa della massa indotta dall'evento avrebbe superato i 5 mm, mentre la corsa massima dichiarata per lo strumento è di 3 mm. La tensione in uscita supera i 50 Vpp. Quest'ultima affermazione non è del tutto vera, perché il modello non tiene conto della saturazione dello spostamento.

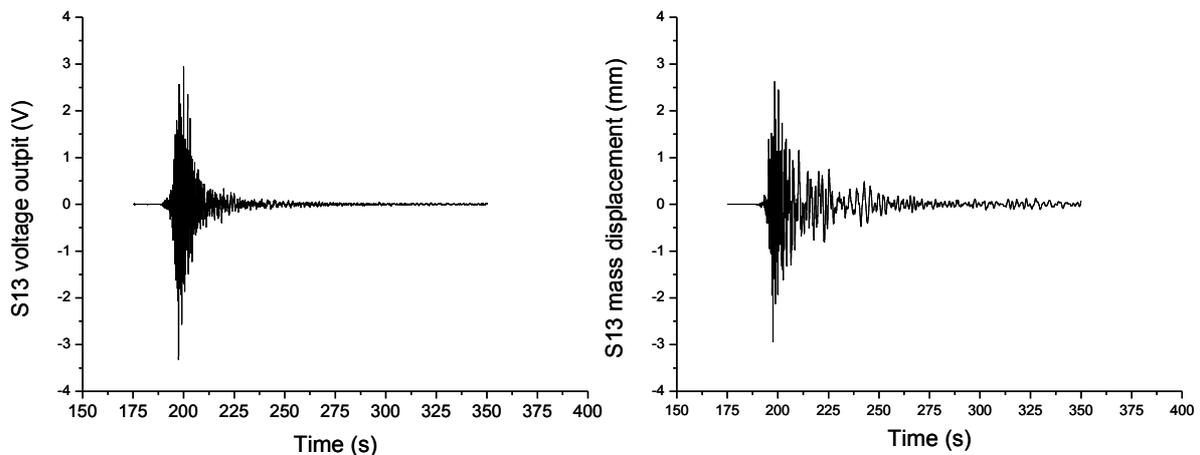
Sia la saturazione elettrica che quella meccanica possono essere evitate smorzando il sismografo con una resistenza inferiore a quella critica. L'effetto della resistenza è duplice: meccanicamente l'aumento della corrente indotta dal movimento si oppone allo spostamento della massa, mentre forma un partitore con la resistenza interna attenuando la tensione di uscita. La Figura 15 mostra il diagramma della risposta in ampiezza della tensione di uscita e dello spostamento della massa dell'S-13 al variare della frequenza (a velocità del terreno costante), parametrizzati con la resistenza di smorzamento.



**Figura 15.** Effetto della resistenza di smorzamento (parametrizzata da 100  $\Omega$  a 4600  $\Omega$ ) sulla risposta dello strumento e sullo spostamento della massa.

Il diagramma è stato ottenuto facendo variare il carico da 100 a 4600 Ohm, a passi di 400 Ohm. I diagrammi non appaiono come i tipici grafici di Bode perché, per evidenziare le piccole variazioni, è stato preferito mantenere lineare la scala verticale.

La velocità massima di Pieve di Coriano (ottenibile dal segnale di Figura 13A) risulta essere di 6 cm/s. La traccia corrispondente a 500 Ohm (a destra nella Figura 15) mostra uno spostamento di 0.5 mm della massa per un'eccitazione di 1 cm/s. In queste condizioni, per 6 cm/s lo spostamento della massa è di 3 mm, accettabile per l'S-13. Quindi una resistenza di smorzamento di 500  $\Omega$  avrebbe evitato la saturazione per l'evento di Pieve di Coriano (Figura 16). Ovviamente il sismografo ipersmorzato mostra una banda passante degradata rispetto a quella ottenibile con lo smorzamento critico (a sinistra in Figura 15).



**Figura 16.** L'evento di Pieve di Coriano come sarebbe stato registrato da un S-13 con resistenza di smorzamento di 500  $\Omega$ .

## Conclusioni

È stato mostrato come sia possibile simulare un geofono utilizzando un programma nato per lo studio di circuiti elettrici. Un sismometro è generalmente un sistema meccanico del secondo ordine, che è facile inglobare in un programma di simulazione elettrica, sia scrivendolo come un blocco di Laplace, sia assimilandolo ad un circuito risonante, utilizzando l'analogia tra le equazioni che descrivono risuonatori meccanici ed elettrici. Seguendo queste due strade sono stati prodotti due modelli di un sismografo commerciale e se ne è verificata la qualità con misure in laboratorio. I modelli hanno permesso di analizzare il comportamento dello strumento in condizioni difficilmente riproducibili (eccitazioni ad alta frequenza, analisi del comportamento per l'invecchiamento del magnete permanente) e la verifica dell'utilizzabilità con il metodo di Lippmann. In questo caso particolare un modello scritto per un simulatore elettrico mostra una grande semplicità d'uso perché, a fronte della fatica iniziale per l'uso delle analogie elettromeccaniche, permette lo studio di un sistema completo dell'elettronica definitiva utilizzando un unico programma di simulazione. È stato mostrato l'uso del modello per studiare il comportamento del sismometro con un segnale naturale. Il lavoro ha mostrato come questo tipo di simulazione sia una importante fase preliminare per affrontare il progetto di un sismometro a bilanciamento di forze.

## Riconoscimenti

Un ringraziamento a Paolo Benedetti per aver messo a disposizione la sua grande esperienza durante i test con gli S-13.

## Bibliografia

- Lippman E., Gebrande H., (1983). *Eine einfache Methode zur Erweiterung des Meßbereichs Elektrodynamischer Seismometer*. Annual meeting of the German Geophysical Society, Aachen.
- Giovanni Romeo, Thomas Braun, (2007). *Appunti di sismometria*. Quaderni di Geofisica 46. <http://istituto.ingv.it/1-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/archivio/quaderni-di-geofisica-2007/>.
- Geotech instruments LLC, (2000). *PORTABLE SHORT-PERIOD SEISMOMETER MODEL S-13 – Operation and maintenance manual*. <http://www.geoinstr.com/pub/manuals/s-13.pdf>
- Giovanni Romeo, (2011). *Whale watching: effects of strong signals on Lippmann style seismometer*. Journal of seismology, DOI: 2011, 10.1007/s10950-011-9246-7.
- Giuseppe Biondo, Enrico Sacchi, (2000). *Manuale di elettronica e telecomunicazioni*. IV edizione. Edizioni Hoepli. <http://www.manualihoepli.it/media/doc/biondo-induttori.pdf>

**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2012 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

**<http://www.ingv.it>**



**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia**