



Un generatore di impulso ad  
alta tensione per l'eccitazione  
di trasduttori piezoelettrici:  
un metodo per studiare la  
propagazione delle onde  
elastiche su campioni di rocce

# Quaderni di Geofisica

# 68



# Quaderni di Geofisica

## **Direttore**

Enzo Boschi

## **Editorial Board**

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Anna Grazia Chiodetti (AC)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Lucia Margheriti (CNT)

Simona Masina (BO)

Nicola Pagliuca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - coordinatore (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

# **Un generatore di impulso ad alta tensione per l'eccitazione di trasduttori piezoelettrici: un metodo per studiare la propagazione delle onde elastiche su campioni di rocce**

## **High Voltage Pulse Generator for Piezo-Electric Transducers Excitation: A Method for Studying Elastic Waves Propagation Through Rocks Samples**

Giuseppe Spinelli, Paolo Benedetti, Alessandro Iarocci,  
Giovanni Romeo, Sergio Vinciguerra

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 1)

# Un generatore di impulso ad alta tensione per l'eccitazione di trasduttori piezoelettrici: un metodo per studiare la propagazione delle onde elastiche su campioni di rocce

Il dispositivo qui presentato è stato realizzato per lo studio della propagazione di onde elastiche in campioni di roccia. Mediante tale tecnica si riescono a determinare alcune caratteristiche fisiche delle rocce. Si tratta di un generatore di impulsi ad alta tensione, necessario per l'eccitazione di trasduttori piezoelettrici. La durata dell'impulso generato è di  $1\mu\text{s}$ , l'ampiezza dell'ordine del kVolt. Il metodo utilizzato per effettuare la misura consiste nell'eccitare il trasduttore in trasmissione con un singolo impulso e quindi misurarne il tempo di volo con il trasduttore di ricezione. Il lavoro, oltre alla descrizione dello strumento, mostra alcuni esperimenti condotti su campioni di alluminio e diversi tipi di roccia. Tali esperimenti si sono resi necessari sia per il collaudo dello strumento che per la messa a punto del metodo.

*The instrument shown in this guide is designed to study elastic waves propagation in rock samples. This method is essential in Earth Sciences to determine some rocks physical characteristics. This instrument is a high voltage pulse generator, required for piezo-electric transducers excitation. The duration of the provided pulse is of  $1\mu\text{s}$ , the amplitude is up to 1 kV. The method used to perform measurements consists to excite the transmitting transducer with a single pulse and then to measure with the receiving transducer the flight time of the elastic wave. This guide, as well as a detailed description of the instrument, shows some experiments carried out on aluminium and different type of rocks samples. These experiments are needed for instrument testing and method tuning.*

## Introduzione

L'utilizzazione delle onde sismiche per la determinazione delle proprietà fisiche delle rocce è uno strumento indispensabile in diversi ambiti delle geoscienze [Wood et al. 1955]. Informazioni provenienti da studi sismici indicano inequivocabilmente che le proprietà fisiche delle rocce cristalline sono anisotrope. La velocità e la attenuazione delle onde sismiche sono determinate da un numero elevato di variabili, dipendente sia dalle forti eterogeneità [Willie et al. 1956] sia dalla dimensione, dall'orientazione, dal grado di allineamento, dai rapporti relativi delle fratture presenti e crucialmente dal contenuto in fluidi e dalla permeabilità [Wulff et al. 1997] [O'Connell and Budianski, 1974].

L'anisotropia sismica [Crampin, 1981] [Zheng, 2000] determina la direzione della deformazione di volumi cristallini e delle manifestazioni di rottura fragile quali l'accadimento di terremoti di media e grande magnitudo, i movimenti franosi ad essi associati e l'apertura di sistemi di fratture durante le eruzioni vulcaniche. Ciò perché l'anisotropia è intimamente correlata con la dilatanza, che definisce una relazione fondamentale tra gli stress agenti, l'espansione delle fratture esistenti, le eterogeneità strutturali dell'ammasso roccioso, il contenuto, la migrazione e le variazioni di pressione dei fluidi.

Il dispositivo presentato è stato progettato per lo studio della propagazione di onde elastiche in campioni di roccia. Il sistema di misura, concettualmente semplice, consiste

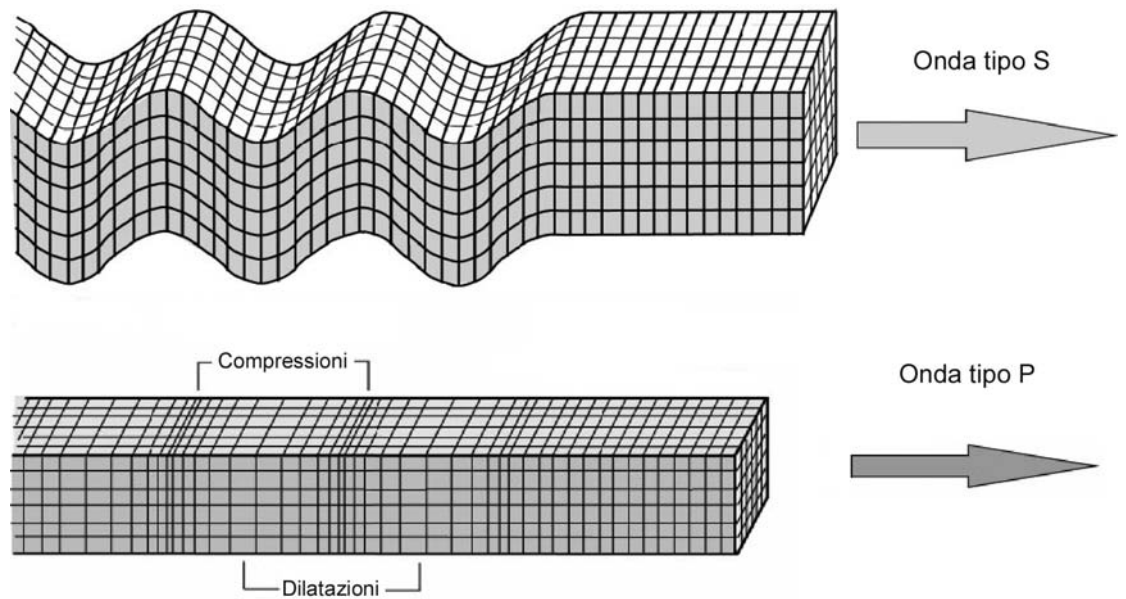
nell'applicazione di una coppia di trasduttori con la relativa elettronica ad un campione di roccia. In questo modo è possibile misurare il tempo che intercorre tra lo stimolo applicato sul primo trasduttore e la risposta prelevata dal secondo trasduttore. I campioni di roccia sono generalmente di dimensioni dell'ordine dei centimetri in modo da poter essere manipolati in laboratorio. La velocità delle onde sismiche nella roccia si stima nell'ordine delle migliaia di m/s. Quindi l'onda impiega circa 10  $\mu$ s ad attraversare un campione di laboratorio. I trasduttori da applicare al campione da misurare

dovranno essere in grado di lavorare con tempi trascurabili rispetto a 10  $\mu$ s. Il modo più semplice per effettuare la misura è quello di fornire un singolo impulso e misurare il tempo di volo. L'uso del singolo impulso permette di trascurare i segnali dovuti alla riflessione sulle superfici del campione. I trasduttori piezoelettrici [Panametrics-NDT, 2008] offrono le caratteristiche acustiche richieste. Questi trasduttori sono di due tipi, uno per rivelare le onde di tipo S (modello V152) e uno per le onde di tipo P (modello V102). Nei trasduttori di tipo S l'asse di sensibilità è parallelo alla superficie di contatto sensore-campione, mentre nei trasduttori di tipo P l'asse di sensibilità è ortogonale alla superficie di contatto. La figura 1 mostra il modo di propagazione delle onde dei due tipi in un campione.

L'eccitazione adeguata di questi trasduttori richiede una tensione di 1 kV su un'impedenza di 50  $\Omega$ . L'impulso che deve alimentare il trasduttore ha, quindi, la ragguardevole potenza di 20 kW, ma grazie alla breve durata dell'impulso, trasporta solo un'energia di 20 mJ. Questa nota mostra il generatore in grado di fornire un impulso della durata di 1  $\mu$ s per tensioni dell'ordine del kV. Mostra anche alcuni esperimenti condotti sull'alluminio e su diversi tipi di roccia per il collaudo dello strumento e la messa a punto del metodo.

## 1. Principio di funzionamento

Il generatore, in grado di fornire un impulso della durata di 1  $\mu$ s per tensioni dell'ordine del kV, è formato da due circuiti, nel seguito chiamati Alimentatore e Sagomatore.



**Figura 1** Onde S e P che si propagano in un parallelepipedo. Le onde S si propagano come un colpo di frusta; le onde P, come le onde acustiche in aria, si propagano come una sequenza di compressioni e dilatazioni.  
**Figure 1** S and P waves travelling through a parallelepiped. S waves travel as a whiplash; P waves travel as acoustic waves through air: they travel as a sequence of compressions and expansions.

Lo scopo principale dell'Alimentatore è la produzione dell'alta tensione continua, variabile fino a 1kV, per alimentare lo stadio finale del circuito Sagomatore; l'Alimentatore fornisce anche la bassa tensione continua per l'alimentazione dei vari circuiti integrati.

Il circuito Sagomatore produce, controllato da un *trigger* esterno, un impulso della durata di 800ns e di ampiezza variabile, dipendente dall'alta tensione fornita dall'Alimentatore.

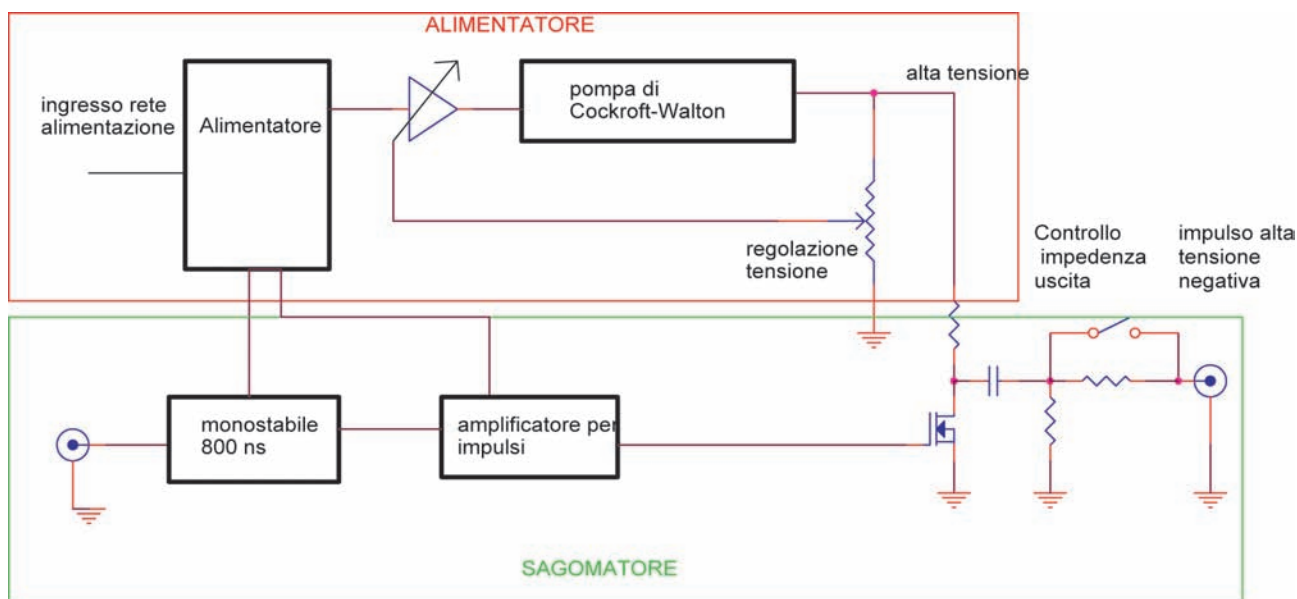
Lo schema a blocchi dello strumento è riportato in figura 2. La figura 3 mostra il dispositivo nel suo complesso. Possiamo distinguere il circuito Alimentatore nella parte anteriore della scatola ed il circuito Sagomatore nella parte posteriore.

### 1.1 Principio di funzionamento del circuito Alimentatore

Nel circuito Alimentatore la bassa tensione è prodotta con due regolatori in serie. L'alta tensione usa un moltiplicatore di tensione a diodi e condensatori. La tensione di uscita viene regolata dal *feed-back* formato da Q1, U3B, e da un potenziometro collegato a J4. La stabilità a breve termine (decine di minuti) di questa regolazione è migliore di 1/1000.

Un indicatore a barra di LED permette di avere un'indicazione grossolana (un LED corrisponde a circa 100V) dell'alta tensione. Il LED D31 indica che la tensione di uscita è maggiore di quella impostata (si verifica nella fase di scarica dei condensatori del moltiplicatore).

La figura 4 mostra il circuito Alimentatore nel suo complesso.



**Figura 2** Schema a blocchi del generatore di impulsi. In alto, delimitato dal rettangolo tratteggiato rosso, il circuito Alimentatore. Un moltiplicatore a diodi e condensatori (pompa di *Cockroft-Walton*) produce l'alta tensione; la tensione viene stabilizzata controllando l'ingresso alla pompa. L'uscita della pompa alimenta direttamente un MOS per alta tensione, utilizzato come interruttore; in questo modo l'ampiezza dell'impulso ad alta tensione è direttamente legato all'uscita dell'alimentatore. In basso, delimitato dal rettangolo tratteggiato verde, il circuito Sagomatore, che rileva la presenza di un impulso all'ingresso ed attiva la stadio di uscita per 800 ns.

**Figure 2** The pulse generator block diagram. In the upper side, delimited by red line, there is the Power Supply circuit. A diodes and capacitors multiplier (*Cockroft-Walton* pump) produces the high voltage; the voltage is stabilized by controlling the input pump. The pump output supplies directly a high voltage MOS, used as a switch; so the high voltage pulse amplitude is related to the Supplier output. In the lower side, delimited by a green line, the Shaper stage detects a driving pulse and operates the output stage for 800 ns.

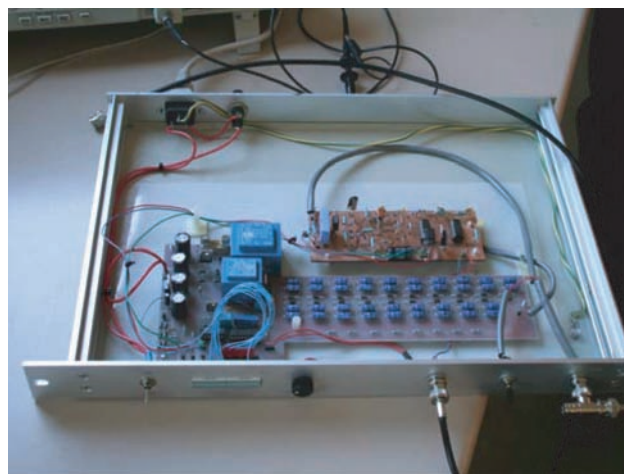
## 1.2 Principio di funzionamento del circuito Sagomatore

Il circuito Sagomatore è formato da un monostabile (U1 ed U17) che per ogni fronte di salita (livello *TTL*) presentato all'ingresso (*BNC* sul pannello) produce un impulso di circa 800 ns. L'amplificatore per impulsi formato da Q2..Q5 amplifica l'uscita del monostabile, producendo un impulso sufficientemente robusto per pilotare il *gate* del MOS di potenza M2 [International Rectifier, 2007] che produce l'impulso ad alta tensione. L'uso di una circuitazione così complessa è necessaria a causa dell'effetto Miller sulla capacità *gate-drain* del MOS.

## 2. Collaudo

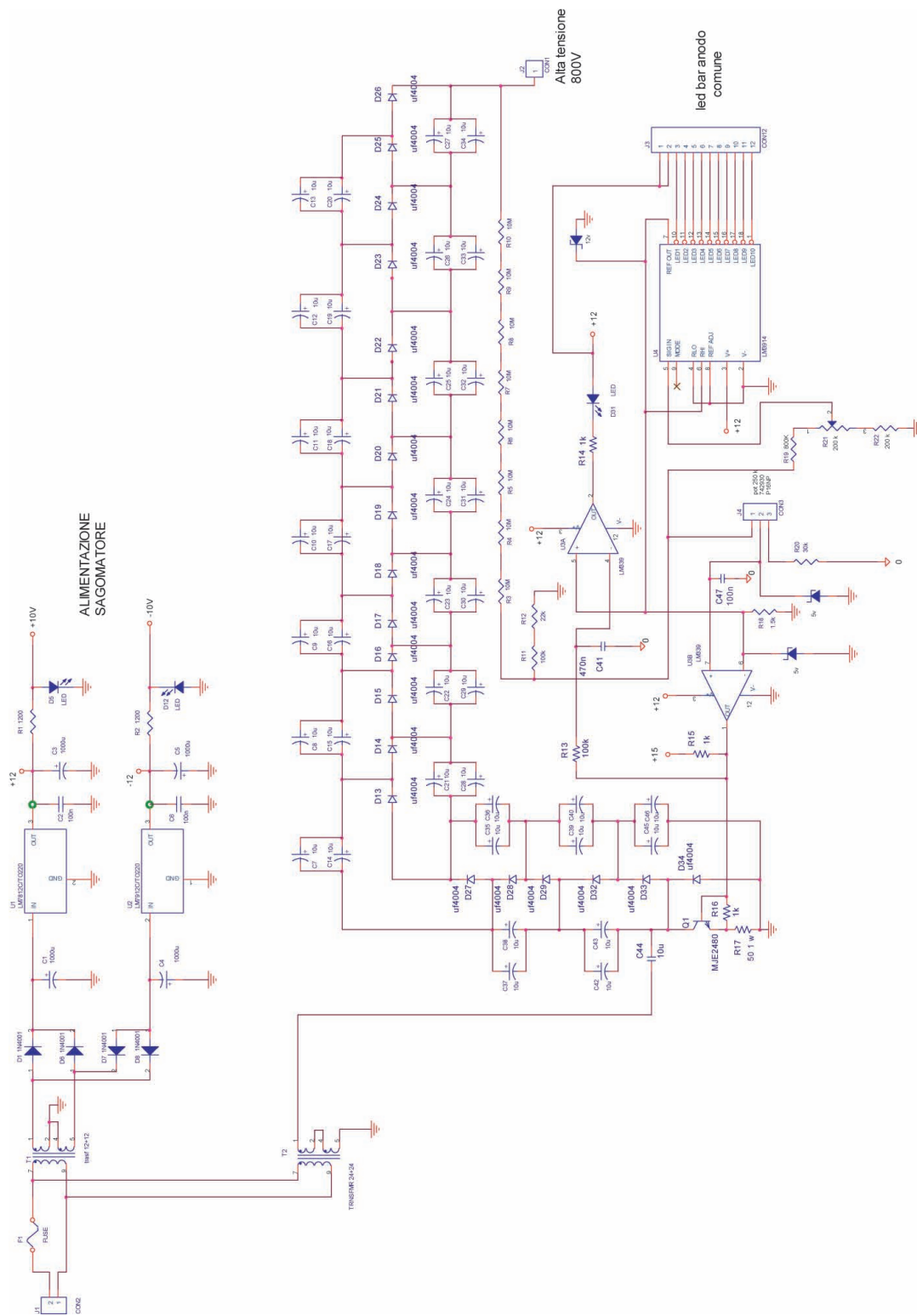
Il prototipo è stato collaudato cercando di prevedere tutte le possibili condizioni operative.

Per tutti i test riportati si fa riferimento ad una resistenza di *damping* di 200  $\Omega$  sia per i trasduttori di tipo P che di tipo S. Questa resistenza è consigliata dal produttore del trasduttore. Si distinguono due casi a seconda della presenza o meno di una resistenza di 50  $\Omega$  in serie sull'uscita. Non ci sono effetti rilevanti per l'uso di questa resistenza, prevista per l'adattamento d'impedenza del cavo per collegamenti lunghi, a

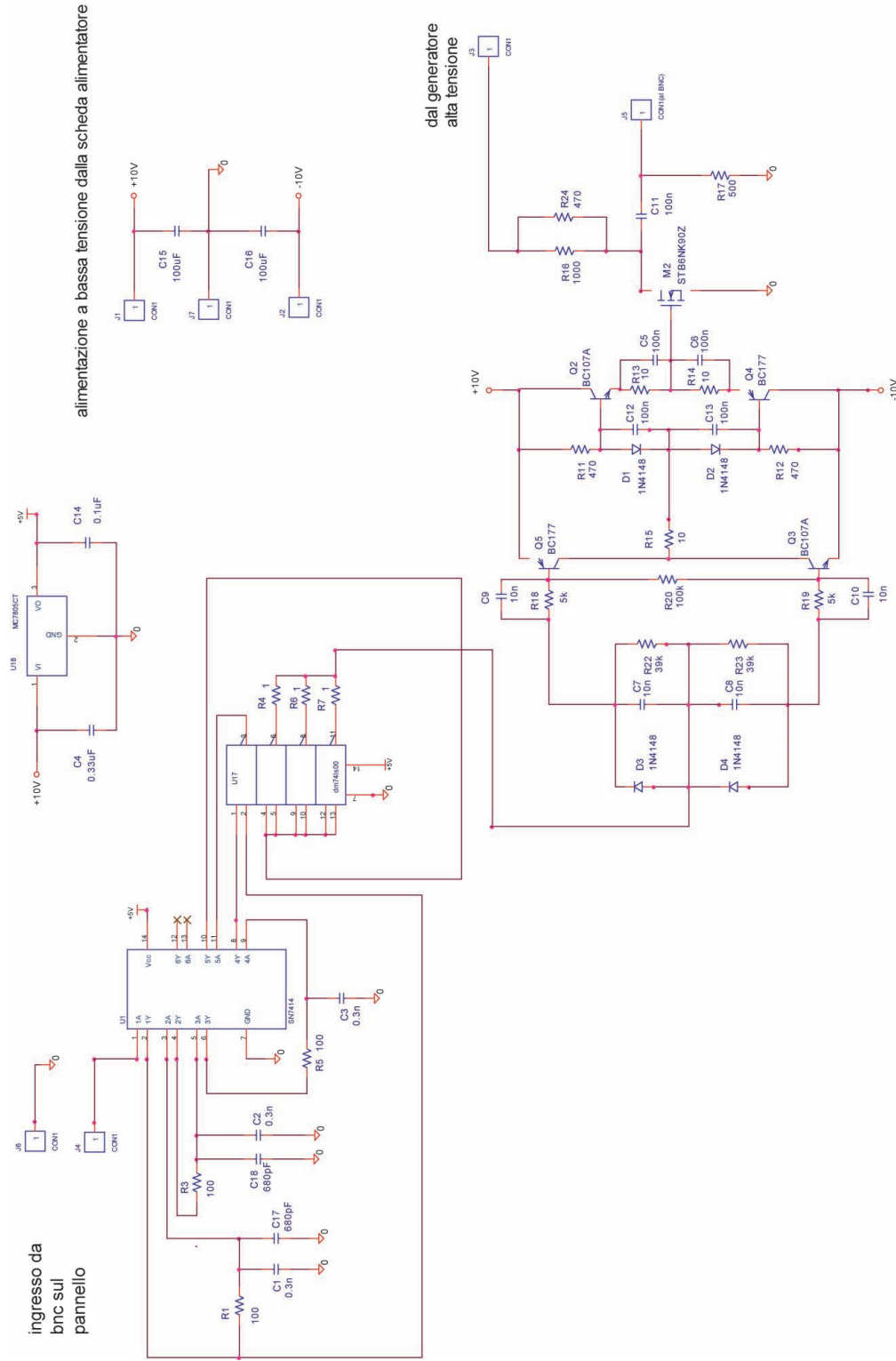


**Figura 3** Il generatore di impulsi assemblato.  
**Figure 3** The pulse generator assembled.

parte una prevedibile attenuazione del segnale. Il collegamento del trasduttore non influisce sensibilmente sull'ampiezza del segnale e sembra introdurre solo un effetto capacitivo.



**Figure 4** Alimentatore. Il dispositivo è alimentato dalla rete attraverso due trasformatori di cui uno produce, attraverso dei regolatori in serie, l'alimentazione per i vari circuiti integrati; l'altro, con uscita a 60 V, alimenta la pompa a diodi e condensatori. Il transistor Q1, controllato da un feed-back sull'uscita ad alta tensione, regola l'alimentazione della pompa. U4 fornisce una grossolana indicazione della tensione di uscita attraverso una barra di LED (1 LED = 100V).  
**Figure 4** Power Supply. This device is powered by the mains through two transformers; one produces, through linear regulators, the power supply for the ICs; the other, 60V output, supplies the diodes and capacitors pump. Q1, feedback controlled by the high voltage output, regulates the pump power supply. U4 gives information about the output voltage level through a bar led (1 LED = 100V).

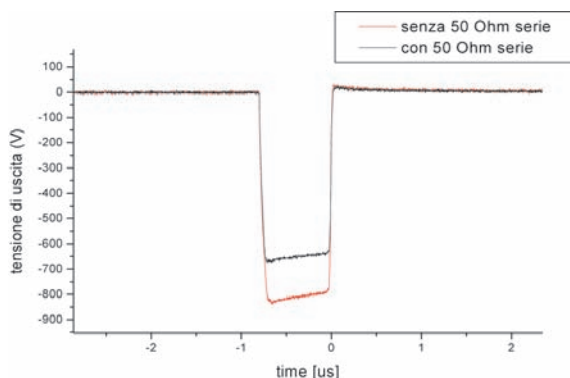


**Figure 5** Schema elettrico del circuito Sagomatore. U1 ed U17 formano il monostabile da 800 ns. L'apparente complicazione è dettata dal desiderio di ottenere un impulso con fronti brevi rispetto alla durata dell'impulso (800 ns). I quattro transistor-bipolari formano un amplificatore per impulsi [Chudobiak, 1995], con un'impedenza di uscita sufficientemente bassa da cambiare rapidamente il potenziale del gate del MOS vincendo l'effetto Miller.  
**Figure 5** Shaper circuit electrical design. The 800 ns one-shot is necessary to obtain a pulse with edges shorter than the duration (800 ns). The four bipolar transistors produce a pulse amplifier, capable of changing quickly the MOS gate voltage, overcoming the Miller effect.



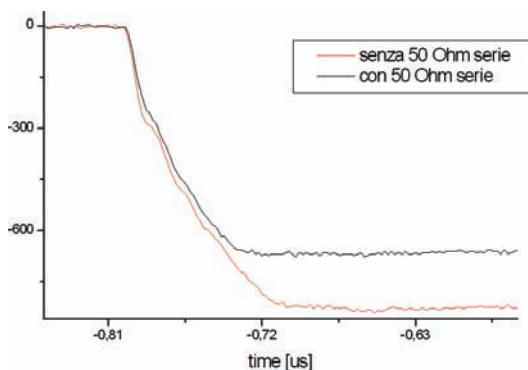
## 2.1 Segnale prelevato a vuoto sull'uscita

La figura 6 mostra il segnale in uscita, con e senza inserimento della resistenza da 50  $\Omega$  in serie, caricato esclusivamente dalla resistenza di smorzamento da 200  $\Omega$ .



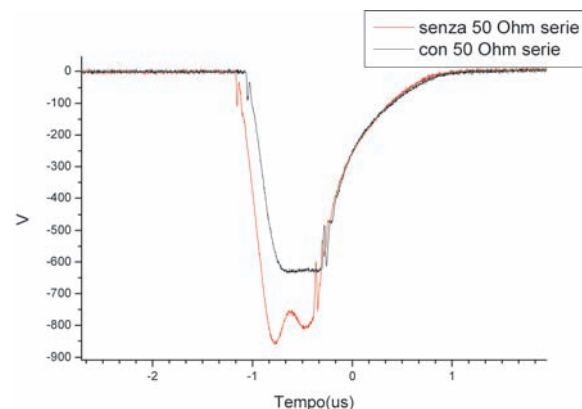
**Figura 6** Uscita dello strumento collegata esclusivamente al dumper da 200  $\Omega$ .

**Figure 6** Instrument output, loaded with a 200  $\Omega$  dumping resistor.



**Figura 7** Il fronte di discesa della figura 6 evidenziato.

**Figure 7** A particular of the falling edge in figure 6.



**Figura 8** A sinistra il segnale dello strumento con il trasduttore collegato.

A destra un segmento del fronte di salita (in nero) e la regressione con la curva di carica di un condensatore (in rosso).

**Figure 8** On the left, the output loaded with the transducer. On the right, a particular of the rising edge (black trace) fitted with the charge curve of a capacitor (red trace).

La figura 7 evidenzia il fronte di discesa, inferiore a 100 ns.

## 2.2 Funzionamento con trasduttori

Riteniamo utile evidenziare, per evitare eventuali dubbi, che i due trasduttori utilizzati sono identici e che sono chiamati Tx e Rx solo per distinguerli nel corso degli esperimenti proposti.

### 2.2.1 Trasduttore Tx di tipo P in uscita

La figura 8 mostra che cosa succede collegando il trasduttore Tx di tipo P all'uscita dello strumento. Il diagramma di sinistra mostra il segnale con e senza il resistore da 50  $\Omega$ . Il diagramma di destra mostra un segmento del fronte di salita (in nero) e la regressione (in rosso) con l'esponenziale:

$$y(t) = V_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$

che rappresenta la curva di carica di un condensatore. Con le resistenze usate la curva si giustifica per una capacità del trasduttore di circa 2.5 nF.

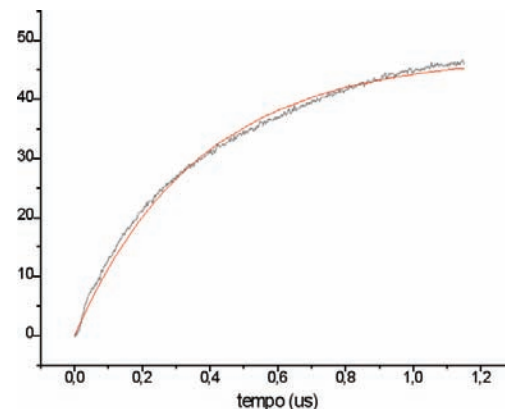
### 2.2.2 Trasduttore Tx di tipo S in uscita

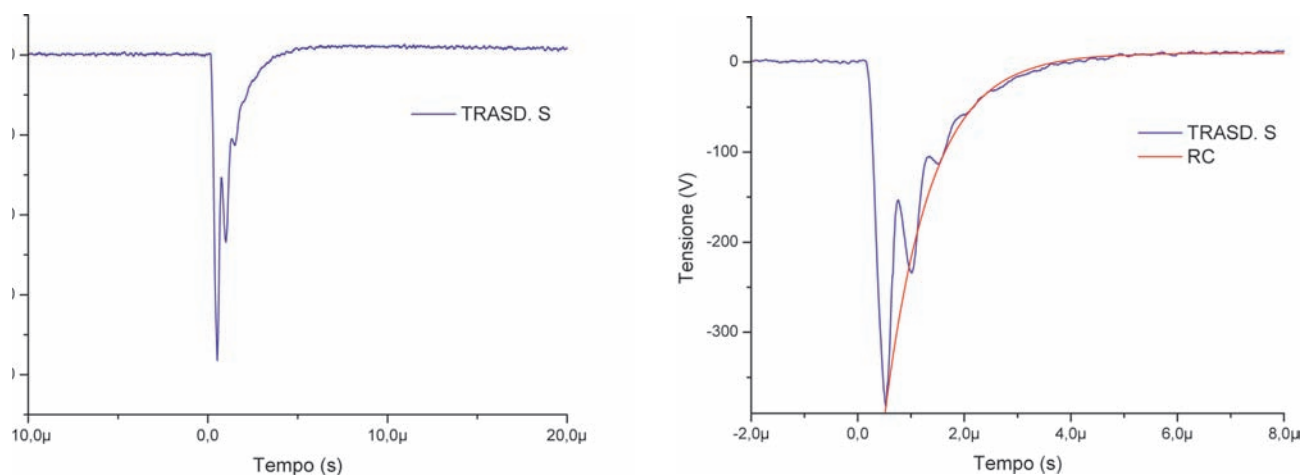
La figura 9 (sinistra) mostra che cosa succede collegando il trasduttore Tx di tipo S all'uscita dello strumento.

La misura è condotta con la resistenza interna da 50  $\Omega$  inserita ed il dumper da 200  $\Omega$ . Per il trasduttore di tipo S si può assumere, con una discreta approssimazione, un valore di capacità di circa 4.35 nF. Si giunge a questa conclusione comparando la carica di un condensatore in un circuito RC, figura 9 (destra), con il segnale sul trasduttore di tipo S.

### 2.2.3 Trasduttore Tx e Trasduttore Rx in uscita separati da un cilindro di alluminio

La figura 10 mostra il segnale ottenuto separando due trasduttori di tipo P con un cilindro di alluminio [Auld 1990]; il





**Figura 9** A sinistra il segnale in uscita con il trasduttore di tipo S collegato.

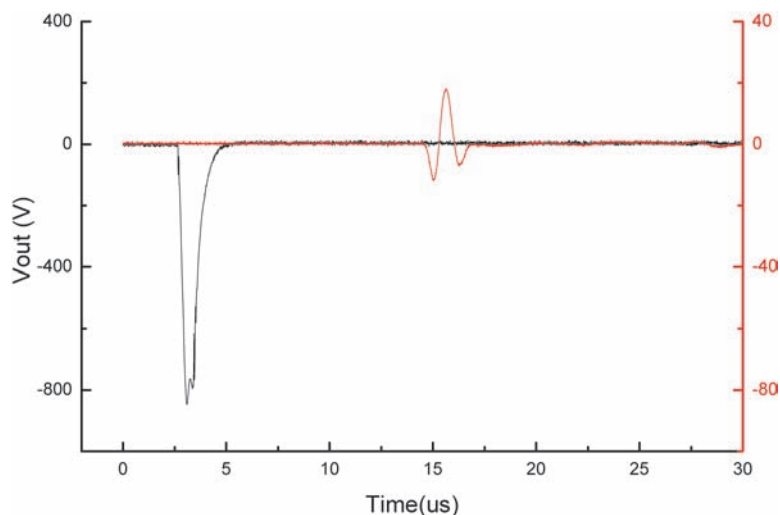
A destra un particolare della carica di un condensatore in un circuito RC ( $R = 200 \Omega$ ,  $C = 4.35 \text{ nF}$ ) sovrapposto al segnale sul trasduttore S.

**Figure 9** On the left, the output connected to the S type transducer.

On the right, a particular of the charge of a capacitor, in a RC circuit ( $R = 200 \Omega$ ,  $C = 4.35 \text{ nF}$ ), compared with the S type transducer signal.

diametro del cilindro di alluminio è sufficientemente grande da permettere di trascurare i rimbalzi sulle pareti. La peculiare forma d'onda in uscita è simile a quella riportata sulla documentazione del trasduttore.

Abbiamo cercato di dare una giustificazione alla forma d'onda in uscita.



**Figura 10** Segnali di eccitazione (in nero) e di risposta (in rosso) per una coppia di trasduttori di tipo P separati da un cilindro di alluminio.

**Figure 10** Excitation (black trace) and response (red trace) signals for a couple of P type transducers, separated by an aluminium cylinder.

Un trasduttore piezo è un convertitore tensione-posizione con una propria frequenza di risonanza che possiamo schematizzare come un sistema del secondo ordine. Trascurando l'amplificazione in continua del sistema possiamo scrivere la

funzione di trasferimento del sistema dei due trasduttori accoppiati come:

$$F(s) = T1(s) \cdot Sample(s) \cdot T2(s) \quad (1)$$

Se, come nel nostro caso, i trasduttori sono identici e il loro funzionamento reversibile allora  $T1(s) = T2(s)$ .

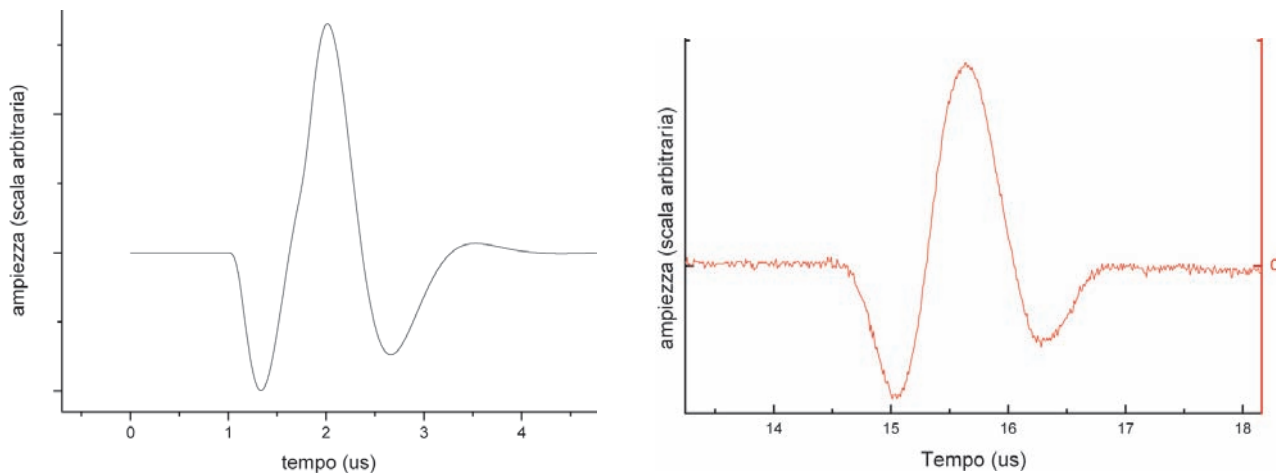
La funzione  $Sample(s)$  deve contenere l'accoppiamento acustico ed il ritardo temporale dovuto al campione. L'accoppiamento acustico porta il modello ad essere sensibile alla variazione del segnale d'ingresso, piuttosto che al suo valore statico, e può essere schematizzato con una derivata seconda temporale. La funzione di trasferimento, trascurando il ritardo irrilevante per lo studio della forma d'onda, può essere scritta come:

$$F(s) = A \cdot \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2} \cdot s^2 \cdot \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2} \quad (2)$$

dove  $A$  rappresenta l'attenuazione,  $\omega_0$  la pulsazione e  $\xi$  lo smorzamento.

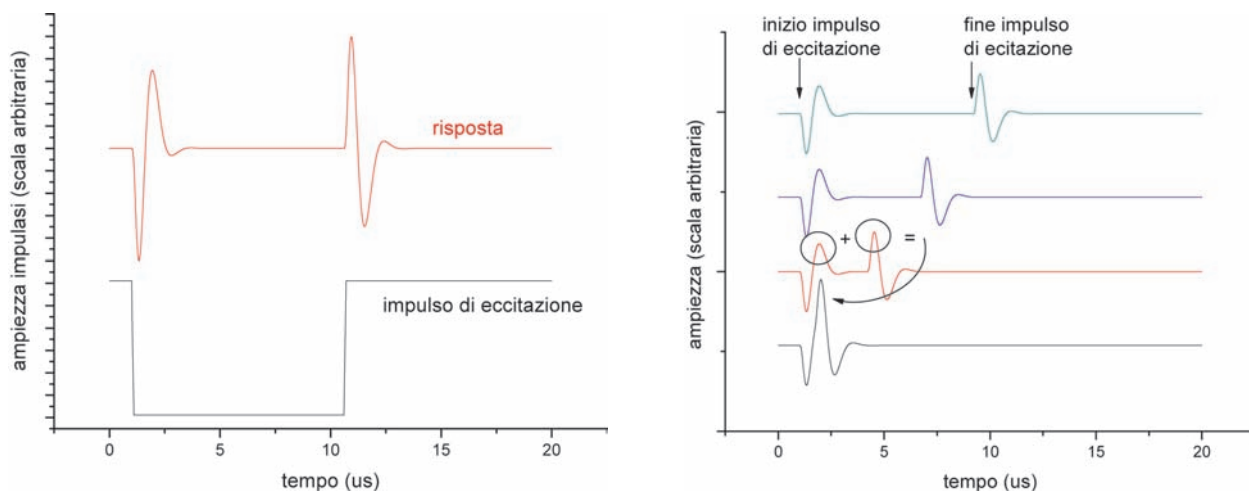
Sostituendo ad  $\omega_0$  il valore (800 kHz) misurato in laboratorio, imponendo uno smorzamento supercritico, ed eccitando il modello con un impulso rettangolare, otteniamo la forma d'onda rappresentata in figura 11.

La produzione di questa bizzarra uscita (in cui il segnale massimo ha il segno opposto al segnale di eccitazione) può essere meglio compreso analizzando il diagramma di figura 12. Impulsi lunghi producono effetti separati, uno corrispondente al fronte di salita, l'altro al fronte di discesa.



**Figura 11** A sinistra il segnale prodotto dalla funzione di trasferimento (2), a destra il segnale della coppia di trasduttori reali accoppiati attraverso un cilindro di alluminio.

**Figure 11** On the left the signal produced by the transfer function (2), on the right the signal of the couple of the real transducers, separated by an aluminium cylinder.



**Figura 12** Il diagramma di sinistra mostra un segnale di eccitazione lungo (traccia nera) ed il segnale sul trasduttore di ricezione. Il diagramma di destra mostra come impulsi di eccitazione via via più corti portano a combinare le risposte corrispondenti ai fronti di salita e discesa dell'eccitazione fino a produrre la forma d'onda di figura 11.

**Figure 12** On the left, the black trace shows a long excitation signal, the red trace shows the output transducer signal.

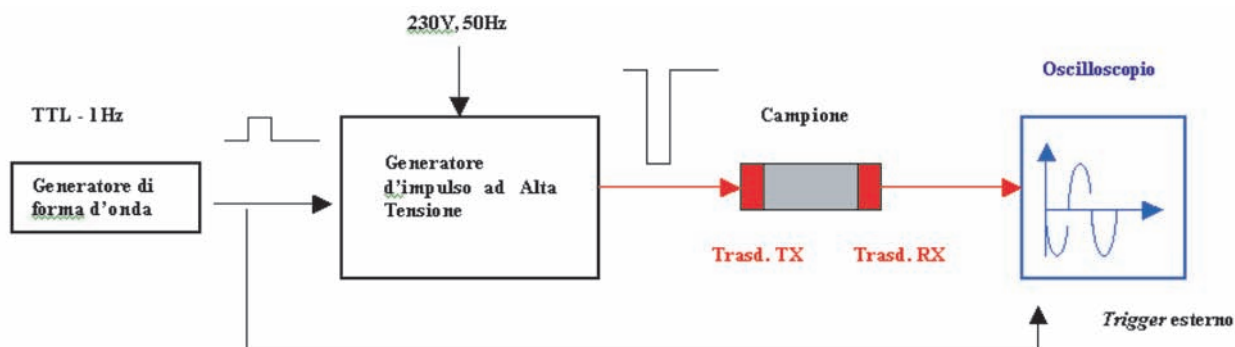
The plot on the right shows that with the decreasing of the excitation pulse duration there is a combination of the two separate waveforms: the output transducer signal becomes that plotted in figure 11.

Nel momento in cui l'impulso si accorcia (diagramma di destra, figura 12) le due forme d'onda si combinano fino ad ottenere il segnale della traccia nera (in basso), che è lo stesso che appare ingrandito in figura 11 e in rosso in figura 10.

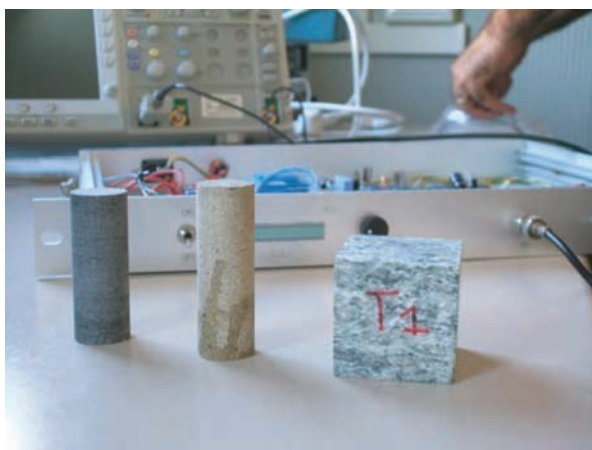
### 3. Test con campioni di roccia

Il comportamento della scheda è stato provato su tre campioni di roccia indicati con T1 (milonite), S5 (arenaria) e C3 (basalto). I trasduttori Tx e Rx vengono ricoperti da un sottile strato di

gel per ultrasuoni per migliorare l'accoppiamento acustico. Il gel per ultrasuoni, essendo a base acquosa, è soggetto ad evaporazione e perde con il tempo la sua capacità di migliorare l'accoppiamento acustico. Inoltre, per quanto riguarda S5, il gel viene assorbito rapidamente dalla roccia vanificando rapidamente l'incremento di accoppiamento acustico. Questo inconveniente è dovuto alla elevata porosità dell'arenaria ed è una caratteristica di molte rocce sedimentarie. Il problema è stato superato ricoprendo la roccia con un sottile strato di lacca che impermeabilizza la superficie e consente, quindi, di rendere il segnale stabile nel tempo.



**Figura 13** Schema a blocchi del sistema di misura.  
**Figure 13** Measurement system block diagram.



**Figura 14** A sinistra i tre campioni di roccia utilizzati negli esperimenti di collaudo: da sinistra C3 (basalto), S5 (arenaria), T1 (milonite). A destra il campione di basalto attrezzato con i trasduttori.  
**Figure 14** On the left, the three rock samples used in the experiments: from the left: C3 (basalt), S5 (sandstone), T1 (milonite). On the right a particular of the basalt sample equipped with the transducers.

È evidente che il prodotto utilizzato per l'accoppiamento acustico influenza il test. Altre sostanze possono essere usate al posto del gel per migliorare l'accoppiamento. È stata condotta una misura usando al posto del gel un olio lubrificante. I risultati ottenuti utilizzando l'olio lubrificante sono migliori rispetto a quelli ottenuti utilizzando il gel.

In figura 13 è mostrato lo schema a blocchi dell'attrezzatura sperimentale. Un generatore di funzioni fornisce una serie di impulsi adeguatamente spaziat ( $> 1$  s) che servono per il pilotaggio del Sagomatore e per il *trigger* dell'oscilloscopio usato per l'acquisizione.

L'acquisizione è stata affidata ad un oscilloscopio digitale TEKTRONIX (MOD. DPO4032). Il *trigger* per l'acquisizione è stato derivato dall'uscita del generatore di funzioni. Le foto che seguono mostrano l'attrezzatura sperimentale per lo svolgimento dei test.

### 3.1 Risultati sperimentali ottenuti

Nella tabella 1 sono presentati i test effettuati sui tre campioni di roccia, con trasduttori di tipo P e di tipo S, in differenti

modalità di accoppiamento.

Nelle figure seguenti sono mostrati i risultati elencati nella tabella 1.

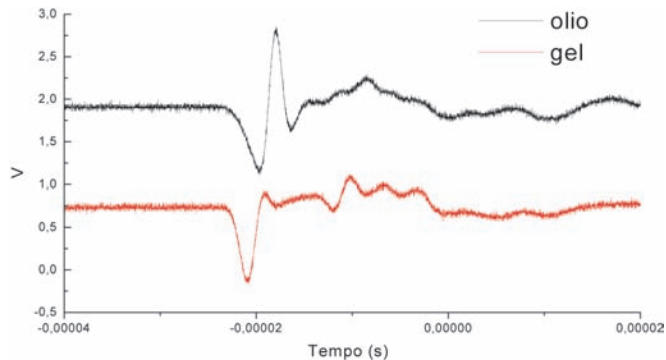
### 4. Test di linearità sul campione S5 laccato, trasduttore di tipo P

Il campione S5 laccato è stato sottoposto ad un esperimento per controllare la risposta ad eccitazioni di differente ampiezza. Nel diagramma di figura 20 (sinistra) sono riportati i diagrammi temporali, traslati per evidenziarli, della risposta del sistema trasduttore-campione-trasduttore a differenti tensioni di pilotaggio. A destra sono riportate le ampiezze picco-picco in funzione della tensione di eccitazione. Si nota come la retta di regressione si trovi all'interno degli errori di misura. Nell'intervallo di tensione usato non appaiono saturazioni.

P	S	lacca	gel	olio	T1	S5	C3	Fig.
X			X		X			15
X			X			X		16
X		X	X			X		
X		X		X		X		17
	X	X	X			X		
X		X	X				X	18
X		X		X			X	
	X	X		X			X	19

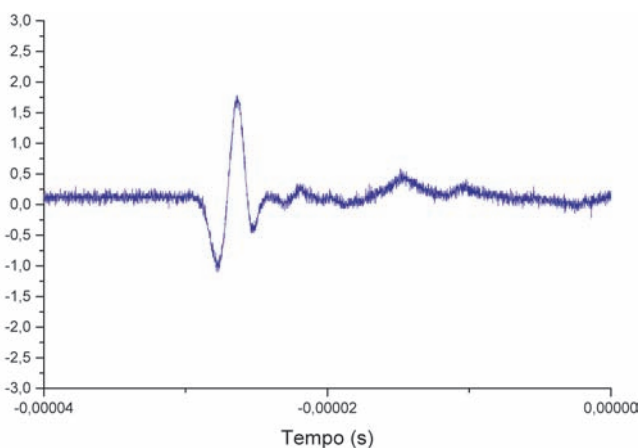
**Tabella 1** Elenco degli esperimenti effettuati sui campioni di roccia.

**Table 1** List of the experiments performed on rock samples.



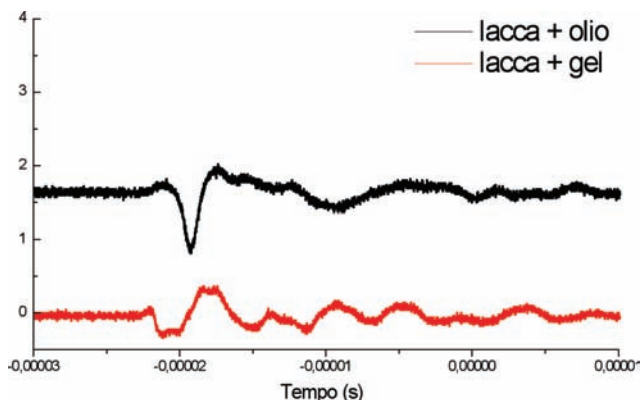
**Figura 17** Campione S5, trasduttore di tipo S, accoppiamento tramite lacca + olio, lacca + gel.

**Figure 17** S5 sample, S type transducer, coupling with varnish + oil, varnish + gel.



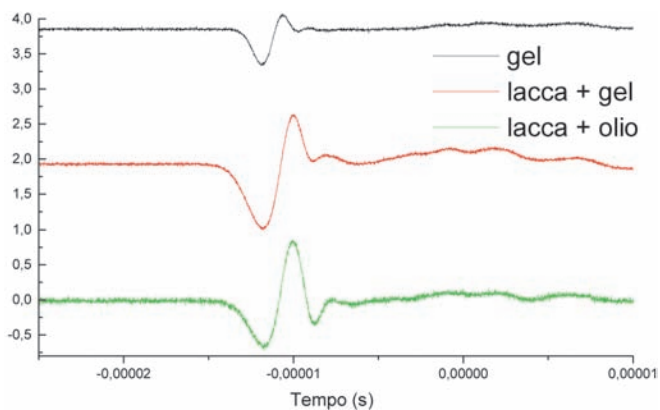
**Figura 15** Campione T1, trasduttore di tipo P, accoppiamento tramite gel.

**Figure 15** T1 sample, P type transducer, coupling with gel.



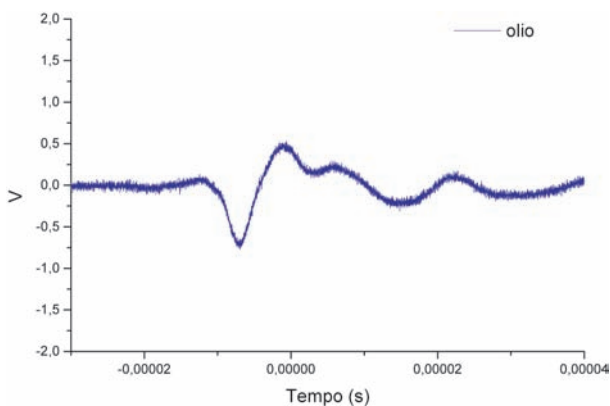
**Figura 18** Campione C3, trasduttore di tipo P, accoppiamento tramite lacca + gel, lacca + olio.

**Figure 18** C3 sample, P type transducer, coupling with varnish + gel, varnish + oil.



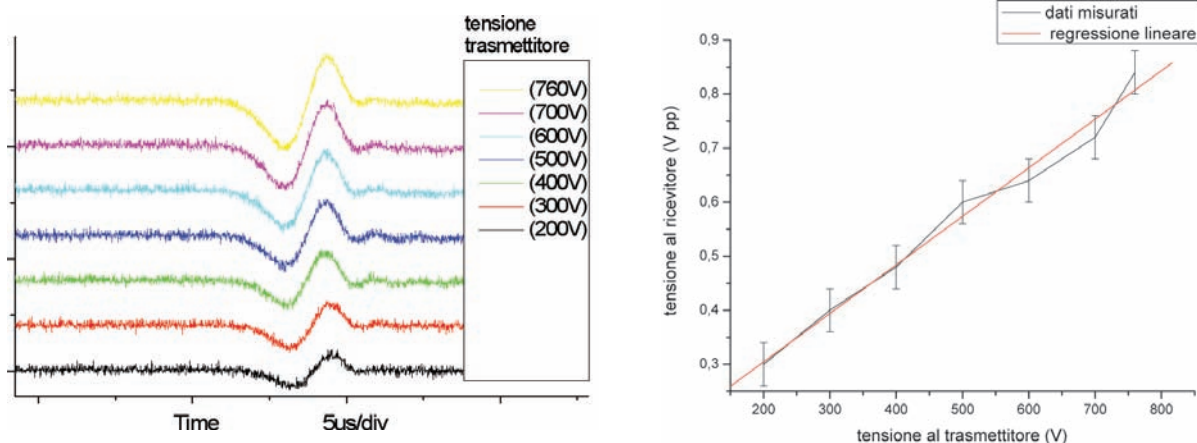
**Figura 16** Campione S5, trasduttore di tipo P, accoppiamento tramite gel, lacca + gel, lacca + olio.

**Figure 16** S5 sample, P type transducer, coupling with black gel, varnish + red gel, green varnish + oil.



**Figura 19** Campione C3, trasduttore di tipo S, accoppiamento tramite lacca + olio.

**Figure 19** C3 sample, S type transducer, coupling with varnish + oil.



**Figura 20** Test sulla linearità del sistema di eccitazione. A sinistra il diagramma a cascata del segnale sul ricevitore per eccitazioni a diversa ampiezza. A destra la regressione lineare delle tensioni in uscita confrontate con le tensioni di eccitazione.  
**Figure 20** Linearity test of the excitation system. On the left the output transducer signal waterfall plot related to different amplitude levels, on the right the output voltage linear fit compared with the excitation voltage.

## 5. Conclusioni

Pur esistendo in commercio dispositivi dello stesso genere, il dispositivo proposto presenta due caratteristiche importanti che lo fanno preferire agli altri:

- facilità di utilizzo da parte dell'utente in quanto il dispositivo è stato modellato e calibrato a partire dalle sue richieste;
- notevole risparmio economico rispetto ai dispositivi in commercio.

Il lavoro ha mostrato le funzionalità del metodo e dell'attrezzatura approntata per lo studio della propagazione di onde acustiche in campioni di roccia. Il metodo sembra adeguato per la maggior parte dei problemi ipotizzabili in laboratorio, ma si possono immaginare dei miglioramenti.

### 1. Miglioramento delle forma d'onda

I fronti di salita e discesa del dispositivo mostrano differenti durate, evidenziate dalla presenza di un carico capacitivo (paragrafo 2.2). Questo è dovuto all'asimmetria dello stadio di uscita, che si traduce in una differenza di impedenza tra i due stati di uscita (alta tensione o tensione di riferimento). È attualmente in costruzione uno stadio di uscita modificato per garantire un'impedenza stabile.

### 2. Modifica della durata dell'impulso

Il prototipo produce un segnale di lunghezza fissa. La scelta della lunghezza del segnale può essere utile per migliorarne il trasferimento al trasduttore. In questo caso bisogna tener presente che il contenuto in frequenza di un impulso è dato da:

$$Fou(f, T) = \left| \int_{-T/2}^{T/2} e^{-i2\pi ft} dt \right| = \left| \frac{\sin(\pi f T)}{\pi f} \right|$$

dove  $f$  rappresenta la frequenza e  $T$  il periodo.  $Fou(f, T)$  ha un massimo per  $T=1/(2f)$  e, quindi, la regolazione di  $T$  può migliorare l'accoppiamento del segnale ai trasduttori. Naturalmente se l'interesse è concentrato sul primo arrivo sia la presente modifica (2) che la precedente (1), perdono di importanza.

### 3. Integrazione dell'impulso

Questa non è una sostanziale modifica del circuito, quanto un metodo per utilizzarlo.

In campioni particolarmente attenuanti sarà necessaria una tecnica di ripetizione ed integrazione delle misure, in modo da riuscire ad estrarre segnali immersi nel rumore. Questo può essere ottenuto includendo nel dispositivo un generatore di *trigger* in grado di sincronizzare un sistema di acquisizione ed azionare l'emissione dell'impulso. L'acquisitore dovrà produrre un'acquisizione diversa per ogni impulso di *trigger*; l'integrazione sarà fatta in differita sui dati acquisiti.

### 4. Preparazione del campione

Gli esperimenti preliminari descritti hanno mostrato che l'interfacciamento del campione ai trasduttori è fondamentale, e che le caratteristiche del gel per ultrasuoni variano rapidamente, dal momento della applicazione sul campione, con l'evaporazione del solvente. Il materiale ideale non deve evaporare e non deve penetrare troppo profondamente nel campione per evitare di modificarne le caratteristiche. Le resine epossidiche (non ancora sperimentate) hanno le proprietà volute.

### 5. Arricchimento dell'elettronica con un generatore di *trigger* interno

Lo strumento può facilmente essere munito di un generatore di *trigger* interno in modo da non richiedere un generato-

re di segnali esterno. Questo non inficia assolutamente le caratteristiche del dispositivo e permette di ridurre l'attrezzatura sperimentale impegnata.

## Bibliografia

- Auld B.A., (1990). *Acoustic fields and waves in solids*. Volumes 1,2. R.E. Krieger Editor, Malabar, Florida, 856 pp.
- Chudobiak M.J., (1995). *A high speed, medium voltage pulse amplifier for diode reverse transient measurements*. Review of Scientific Instruments, Volume 66, 5352 pp. <http://www.avtechpulse.com/papers/classd/>.
- Crampin S., (1981). *A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media*. Wave Motion, 3, pp 343-391.
- International Rectifier (2007). *Application Note AN-978: HV Floating MOS-Gate Driver ICs*. <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-978.pdf>
- O'Connell R.J. and Budianski B., (1974). *Seismic velocities in dry and saturated cracked solids*. Journal of Geophysical Research, 79, pp 4626-4627.
- Panametrics-NDT Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing (2008). <http://www.olympus-ims.com/data/File/panametrics/panametrics-UT.en.pdf>.
- Wood A.W., (1955). *A textbook of sound*. The MacMillan Company, New York, 360 pp.
- Wulff A.M. and Burkhardt H., (1997). *Dependence of seismic wave attenuations and velocities in rock and pore fluid properties*. Physics of the Chemistry and Earth, 22 (1-2), pp 69-73.
- Wyllie M.R.J., Gregory A.F. and Gardner G.H.F., (1956). *Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media*. Geophysics, 21, pp 41-70.
- Zheng Z.,(2000). *Seismic anisotropy due to stress-induced cracks*. International Journal Of Rock Mechanics and Mines Sciences, 37, pp 39-49.

# Indice

<b>Introduzione</b>	4
<b>1. Principio di funzionamento</b>	5
1.1 Principio di funzionamento del circuito Alimentatore	5
1.2 Principio di funzionamento del circuito Sagomatore	6
<b>2. Collaudo</b>	6
2.1 Segnale prelevato a vuoto sull'uscita	9
2.2 Funzionamento con trasduttori	9
2.2.1 Trasduttore Tx di tipo P in uscita	9
2.2.2 Trasduttore Tx di tipo S in uscita	9
2.2.3 Trasduttore Tx e Trasduttore Rx in uscita separati da un cilindro di alluminio	9
<b>3. Test con campioni di roccia</b>	11
3.1 Risultati sperimentali ottenuti	12
<b>4. Test di linearità sul campione S5 laccato, trasduttore di tipo P</b>	12
<b>5. Conclusioni</b>	14
<b>Bibliografia</b>	15





**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2008 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**