

# Rapporti tecnici

# INGV

**Dispositivo di calibrazione per il  
digitalizzatore della Grotta Gigante**

# 240



## **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

## DISPOSITIVO DI CALIBRAZIONE PER IL DIGITALIZZATORE DELLA GROTTA GIGANTE

Giuseppe Spinelli<sup>1</sup>, Paolo Benedetti<sup>1</sup>, Carla Braitemberg<sup>2</sup>, Giovanni Romeo<sup>1</sup>, Quintilio Taccetti<sup>3</sup>

<sup>1</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Sismologia e Tettonofisica)

<sup>2</sup>UNIVERSITÀ DI TRIESTE (Dipartimento di Geoscienze - DIGeo, ex DST)

<sup>3</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Amministrazione Centrale)

# 240



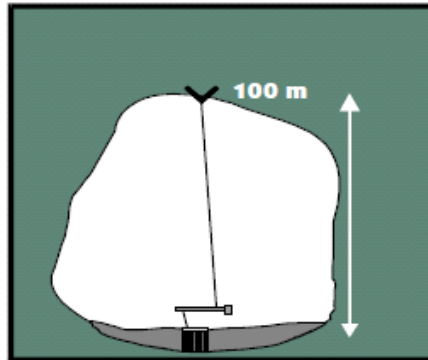
## **Indice**

Introduzione	5
1. Strumentazione presente all'interno della Grotta Gigante	6
2. Scopo del dispositivo montato nella grotta	7
3. Aggiornamento del sistema ottico per l'acquisizione digitale dei dati dei pendoli	8
4. Calibrazione e funzionamento a regime del rivelatore CCD	9
5. Principio di funzionamento del circuito elettronico	10
6. Schema elettrico e caratteristiche tecniche del circuito	12
7. Programmazione della MCU e comandi al dispositivo	13
8. Conclusioni	14
Bibliografia	15



## Introduzione

La Grotta Gigante nel Carso Triestino è una cavità naturale di eccezionali dimensioni. Ha una forma simile ad un ellissoide di 130 metri di lunghezza, 65 metri di larghezza e 107 metri di altezza, con un volume di 600 mila mc. Dalla sommità della volta due lunghi fili di tungsteno arrivano fino al suolo e rappresentano la sospensione dei più lunghi pendoli orizzontali di tipo Zöllner (95 m) esistenti, con un periodo proprio di 6 minuti ed un'amplificazione angolare di 5 ordini di grandezza [Marussi, 1960; Zöllner, 1872]. Questi pendoli, digitalizzati otticamente, sono utilizzabili per studi geodetici e sismologici [Braitenberg et al., 2006; Romeo, 2000].



**Figura 1A.** Rappresentazione schematica della grotta con uno dei due pendoli installati, naturalmente il disegno non è in scala.

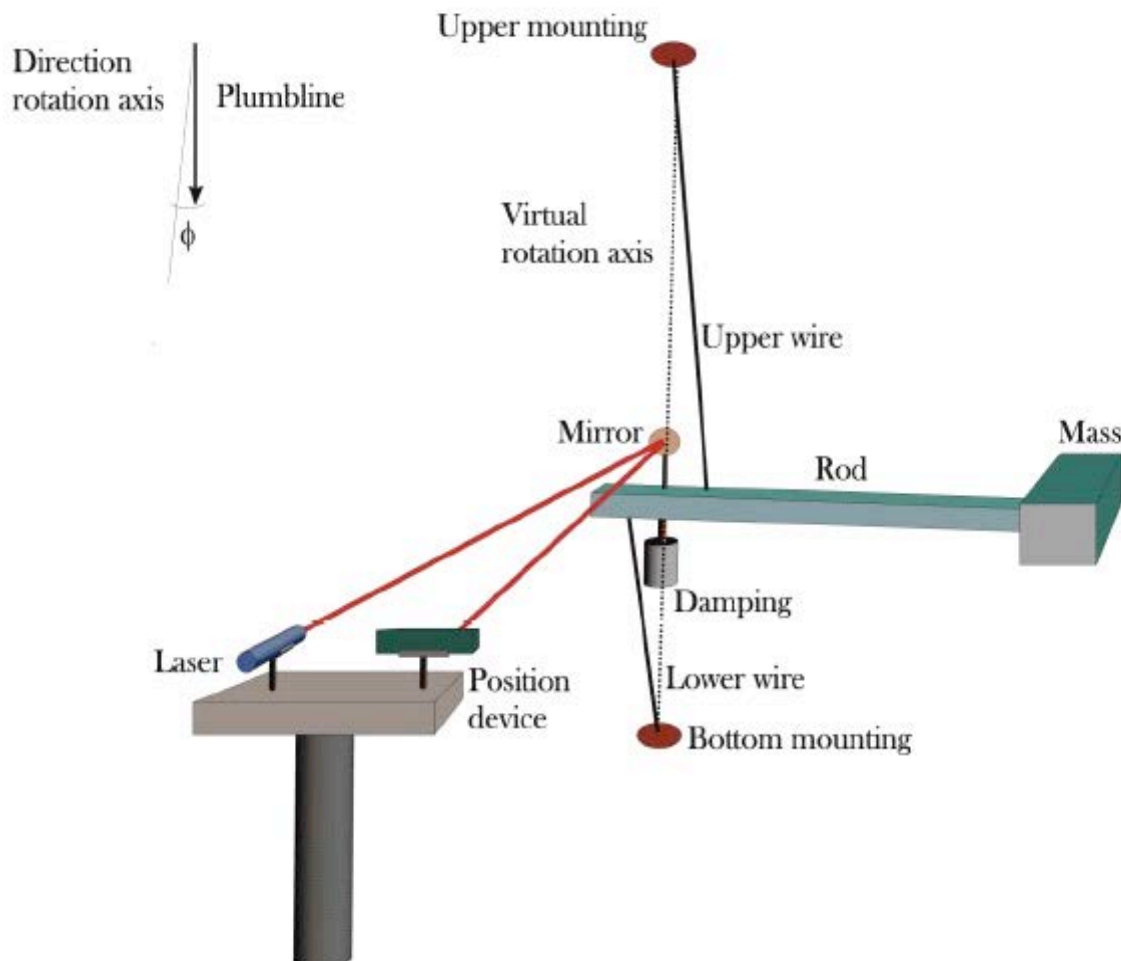


**Figura 1B.** Scorcio della grotta in cui sono visibili le due lunghe camicie di protezione che circondano le sospensioni dei pendoli.

## 1. Strumentazione presente all'interno della Grotta Gigante

Il pendolo è uno strumento per mezzo del quale possiamo misurare i movimenti della crosta terrestre. Questi movimenti possono essere sia estremamente lenti (movimenti secolari) che estremamente veloci (deformazioni sismiche). La misura è effettuata misurando lo spostamento di una massa rispetto alla verticale che unisce due punti di riferimento fissati alla crosta terrestre.

Il pendolo Zöllner è costituito da un'asta orizzontale su cui, ad una estremità, è attaccata una massa. A poca distanza dall'altra estremità sono attaccati 2 fili di tungsteno che connettono l'asta a due punti fissi nella roccia: il primo (*upper mounting*) è fissato nella volta della grotta, il secondo (*bottom mounting*) è fissato nella base. Questi due punti sono scelti in modo da essere sulla verticale uno sopra l'altro. Supponiamo che il punto fisso in alto si sposti rispetto al punto fisso in basso. Ne consegue che l'asta avrà una nuova posizione di equilibrio e, di conseguenza, i due fili che connettono l'asta con i due punti fissi nella roccia formeranno un angolo  $\varphi$  con la verticale che connette i due punti fissi. Il movimento dell'asta è registrato da un dispositivo ottico che registra il raggio di luce riflesso da uno specchio montato sull'asta [Braitenberg et al., 2010]. La figura seguente chiarisce quanto detto.



**Figura 2.** Schema di installazione dei pendoli Zöllner. L'asta con la massa ruota nel piano orizzontale intorno all'asse di rotazione virtuale. L'angolo  $\varphi$  tra l'asse di rotazione virtuale e la verticale è collegato al movimento che vogliamo studiare.

I pendoli geofisici della Grotta Gigante sono la più grande installazione di pendoli Zöllner finora realizzata. Con una distanza totale di 95 m tra *upper* e *bottom mounting* (figura 2) ed un momento di inerzia di  $306 \cdot 10^6 \text{ g/cm}^2$  i pendoli offrono un'amplificazione angolare statica (rapporto tra l'angolo assunto



dall'asta del pendolo in funzione dell'angolo di amplificazione del terreno) dell'ordine di 25000, mentre il periodo proprio di oscillazione è dell'ordine di 360 s. Queste caratteristiche mostrano come questi strumenti possano essere usati indifferentemente sia per uso sismologico che geodetico. Al fine di avere uno strumento sensibile ai movimenti che avvengono sia in direzione NS che in direzione EW, nella grotta è stata installata una coppia di pendoli montati in posizione ortogonale uno rispetto all'altro. Quindi i due pendoli hanno caratteristiche paragonabili e sono disposti in modo da registrare sollecitazioni nelle direzioni NS e EW.

Dal 2004 la posizione del singolo pendolo è rilevata otticamente da un rivelatore PSD (*Position Sensitive Detector*), un sensore di posizione ottico in grado di misurare la posizione di un punto di luce. Tramite il rivelatore PSD è possibile misurare il movimento del pendolo tramite un raggio laser riflesso da uno specchio (figura 2, figura 3) che ruota insieme all'asta del pendolo. Il segnale digitale così ottenuto viene registrato localmente su un PC accessibile in rete. La figura 3 mostra uno dei due rivelatori PSD presenti all'interno della grotta. Si intravede il riflesso rosso del raggio laser che lo colpisce.



**Figura 3.** Rivelatore PSD e laser di misura. Il raggio di luce emesso dal laser di misura, a sinistra del rivelatore, viene riflesso dallo specchio montato sull'asta del pendolo. La feritoia nera del rivelatore è l'ingresso ottico dove incide la luce laser riflessa. Il rivelatore, in una scatola stagna, contiene un processore che condiziona l'uscita e produce un segnale seriale per il calcolatore d'acquisizione.

## 2. Scopo del dispositivo montato nella grotta

Questo rapporto tecnico presenta il dispositivo con cui è stata integrata la strumentazione già presente all'interno della grotta al fine di rendere possibile sia la calibrazione dei dati digitali acquisiti che il reset da remoto del sistema di acquisizione. Questo garantisce la validità dei dati per le lunghe serie temporali durante le quali ci si può attendere una deriva dei componenti elettronici (parte dell'elettronica dei PSD è analogica). Ciò appare particolarmente utile se si considera che, a causa della loro locazione, gli strumenti non sono facilmente accessibili.

Il dispositivo in questione è costituito essenzialmente da due parti:

- un generatore di marche ottiche, ottenuto con quattro laser la cui distanza reciproca è fissata meccanicamente, per la calibrazione dei dati digitali acquisiti;
- un circuito elettronico, dotato di microcontrollore, che gestisce tutte le operazioni di calibrazione e di reset.

### 3. Aggiornamento del sistema ottico per l'acquisizione digitale dei dati dei pendoli

È importante sottolineare che il dispositivo ottico introdotto non calibra i pendoli, ma solo il sistema ottico di acquisizione. La calibrazione si rende necessaria a causa di fenomeni di deriva dei componenti elettronici causati da vari fattori tra cui possiamo considerare variazioni casuali della conduttività dei semiconduttori, l'invecchiamento dei materiali, l'umidità, le vibrazioni meccaniche, le variazioni della tensione di alimentazione, l'oscillazione dei parametri con la temperatura. Tutto ciò determina un deterioramento dei dati relativi al movimento dei pendoli.

L'aggiornamento del sistema ottico è stato ottenuto interponendo un sistema di calibrazione tra il laser di misura e l'acquisitore digitale. Questo sistema di calibrazione viene attivato da remoto ed permette di monitorare la stabilità del sistema digitale di acquisizione dei dati.

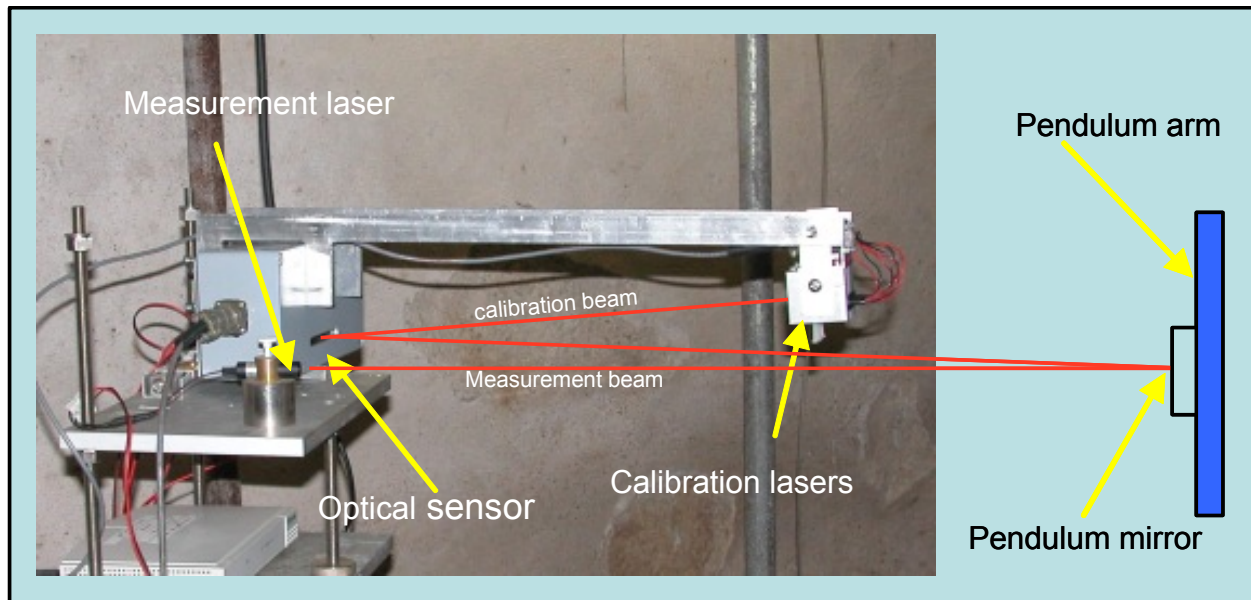
La calibrazione avviene nel modo seguente. A ciascuna delle due componenti NS e EW compete una quaterna di laser di calibrazione, a distanza reciproca rigorosamente costante, vengono accesi in sequenza per colpire, ognuno con il proprio punto di luce, la feritoia nera del rivelatore PSD. La posizione di ogni punto luminoso viene acquisito e le distanze reciproche sono misurate e usate per produrre un riferimento fisso e determinato per i dati provenienti dal pendolo. Naturalmente è necessario lo spegnimento del laser di misura (NS o EW) durante l'accensione sequenziale dei laser di calibrazione relativi (NS e EW). A questo provvede, come vedremo nel paragrafo successivo, il circuito elettronico introdotto contemporaneamente al dispositivo ottico. Inoltre questo circuito permette, e anche questo lo vedremo nel paragrafo successivo, di rimuovere l'alimentazione dai rivelatori, nel caso si presenti la necessità di un reset da remoto.

La figura 4 completa il sistema ottico di acquisizione della figura 3 mostrando i quattro laser di calibrazione.



**Figura 4.** Il dispositivo di calibrazione con i quattro laser di calibrazione.

Nella figura successiva i segmenti rossi simboleggiano il percorso della luce dei laser di calibrazione all'interno del sistema ottico integrato con i laser di calibrazione. In condizioni di funzionamento normale il *measurement laser* emette un fascio che incide sullo specchio del pendolo (*pendulum mirror*) e viene riflesso verso il PSD (*optical sensor*). In condizioni di calibrazione il laser di misura viene spento e vengono accesi e spenti, consecutivamente i quattro laser di calibrazione. Le distanze reciproche dei laser sono determinate meccanicamente. Non è necessaria una precisione assoluta di queste distanze, quanto la loro stabilità nel tempo.

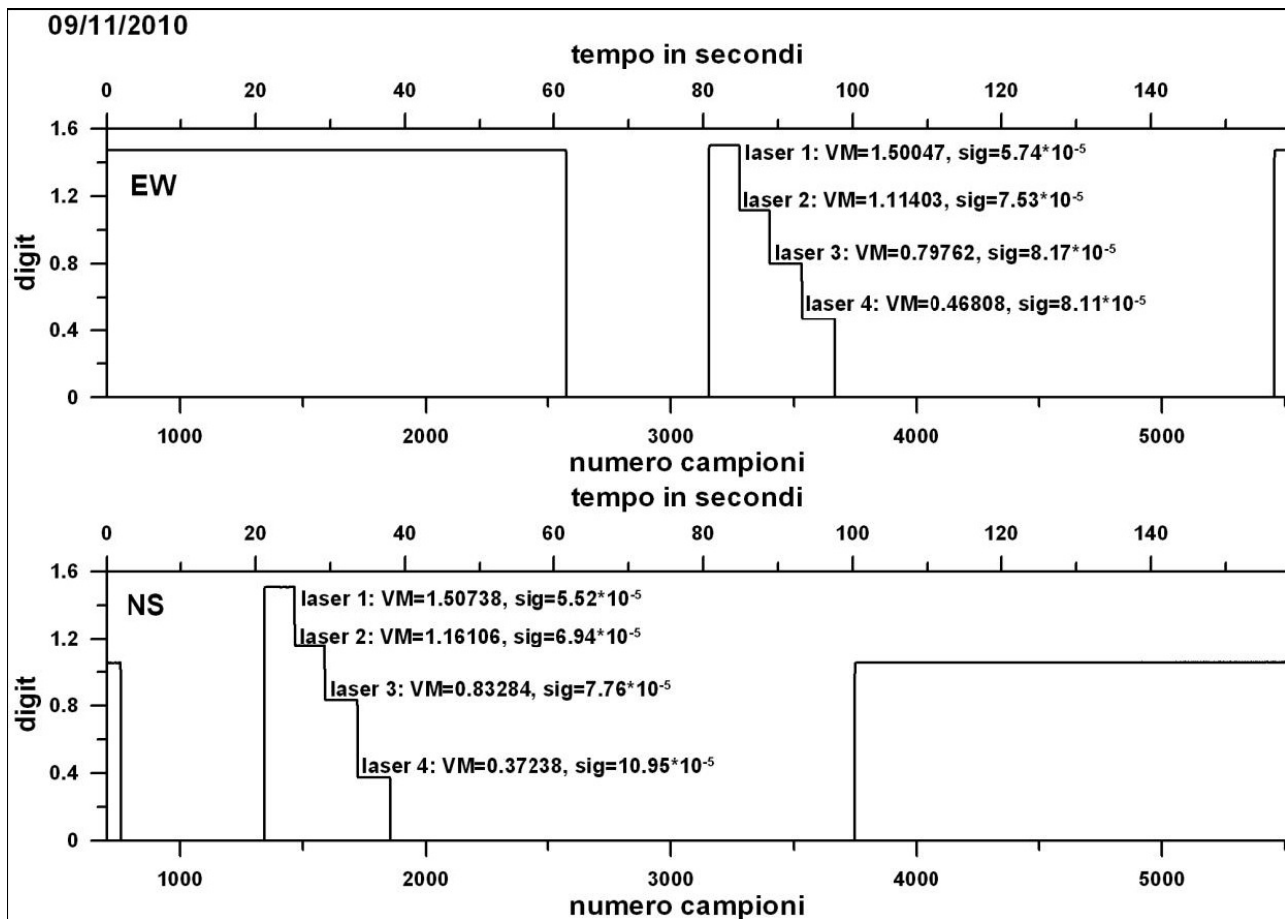


**Figura 5.** Percorso della luce dei laser di calibrazione.

#### 4. Calibrazione e funzionamento a regime del rivelatore PSD

Durante la calibrazione i laser di misura vengono spenti e vengono accesi in sequenza i laser di calibrazione che producono 4 letture fisse. La distanza tra le marche dipende dalla costruzione meccanica e dalla costruzione dei laser, ma è comunque costante nel tempo e, una volta presa come riferimento la prima lettura, eventuali variazioni nelle letture successive saranno da imputare ad una variazione della risposta del digitalizzatore. In figura 6 sono mostrati due diagrammi relativi alla calibrazione nelle direzioni EW ed NS.

I grafici mostrano il segnale digitale trasmesso dal rispettivo rivelatore PSD prima, dopo e durante la calibrazione. In condizioni normali (senza forti terremoti in corso) nella scala del diagramma il segnale dei pendoli appare come un segmento orizzontale: troppo breve per evidenziare le maree e troppo poco risoluto per evidenziare il segnale sismico. Il segnale cambia invece durante la calibrazione che viene ottenuta accendendo in sequenza quattro laser ognuno dei quali colpisce il rivelatore in un punto diverso da quello dove lo colpiscono gli altri tre laser. Ciò viene evidenziato dai quattro scalini presenti sul grafico in quanto ogni scalino corrisponde al punto in cui ciascuno dei quattro laser colpisce il rivelatore.



**Figura 6.** Segnale digitale trasmesso dai due Rivelatori PSD. In alto: tempo in secondi; in basso: numero campioni del file. VM: Valor medio; sig: deviazione standard.

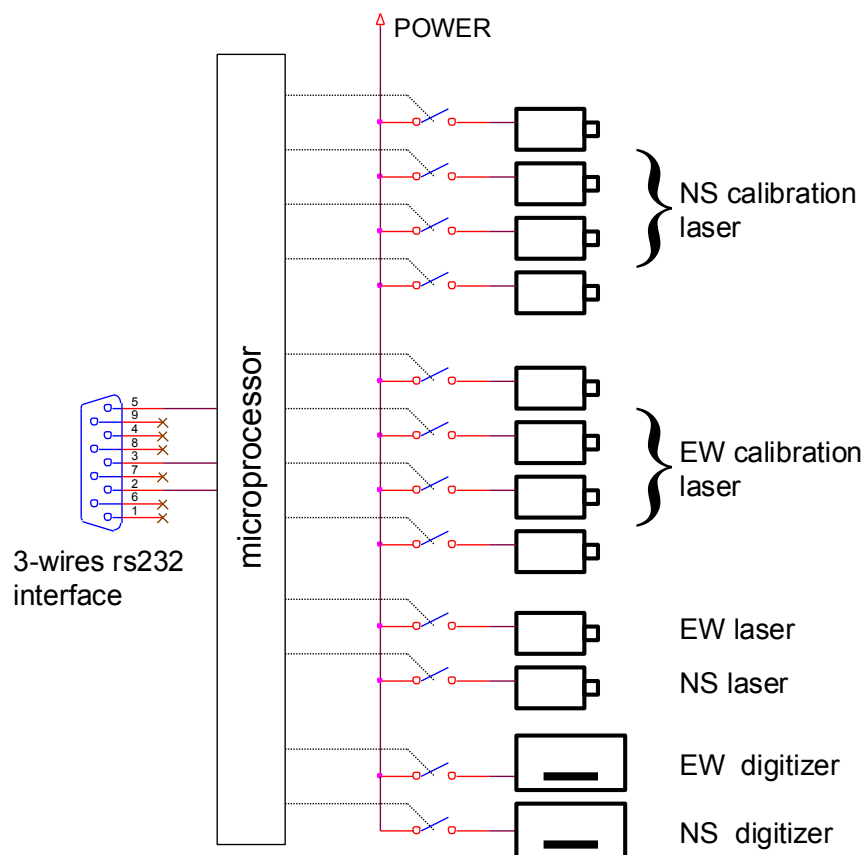
## 5. Principio di funzionamento del circuito elettronico

Lo schema a blocchi del circuito è rappresentato in figura 7. Esso opera essenzialmente interpretando i comandi provenienti dalla linea seriale ed attivando l'alimentazione di 12 dispositivi: 4 laser di calibrazione NS, 4 laser di calibrazione EW, due laser di misura NS e WS, due relé per l'interruzione dell'alimentazione dei digitalizzatori ottici, i rivelatori. La calibrazione di ogni digitalizzatore avviene spegnendo il laser di misura corrispondente e accendendo consecutivamente i quattro laser di calibrazione.

Gli interruttori usati per i laser sono dei transistor bipolari, mentre per l'interruzione dell'alimentazione dei digitalizzatori sono stati preferiti dei relé per motivi di isolamento galvanico. Il processore che governa il dispositivo è un PIC16F877A, programmato con un compilatore Pascal. La linea seriale è collegata al computer di acquisizione, già in rete, e permette ad un operatore remoto di controllare il dispositivo.

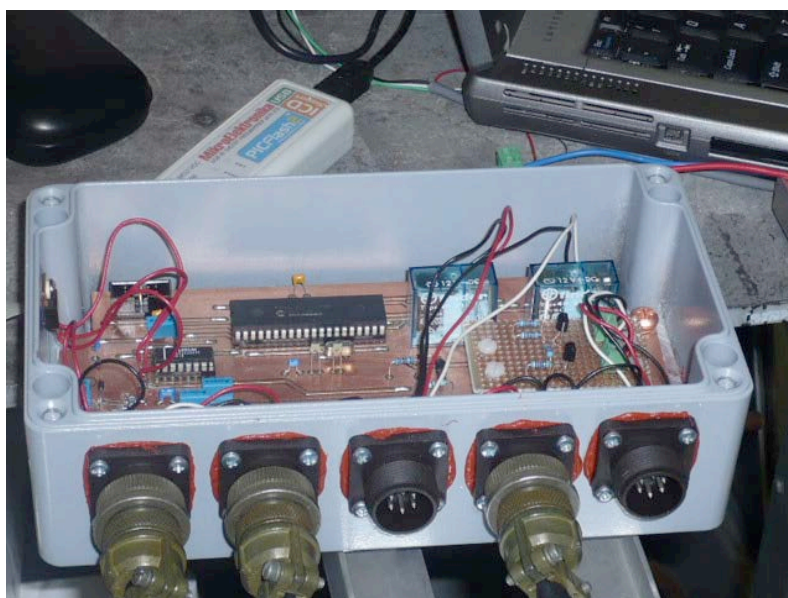
Il computer trasmette il comando (di calibrazione e/o di reset). Questo comando viene interpretato dal microcontrollore (*MicroController Unit*, MCU) che a sua volta comanda i laser di calibrazione e/o i relé di reset. La MCU, inoltre, trasmette al computer un messaggio che il computer visualizza sullo schermo. Questo messaggio informa l'utente sul buon esito o meno del comando da lui lanciato. La MCU è un dispositivo elettronico integrato su singolo chip che viene utilizzato in sistemi cosiddetti "embedded", cioè per applicazioni specifiche (*special purpose*) di controllo digitale. È progettato per interagire direttamente con il mondo esterno tramite un programma residente nella propria memoria interna e mediante l'uso di pin specializzati o configurabili dal programmatore.





**Figura 7.** Lo schema a blocchi del sistema di calibrazione. Un microprocessore interpreta dei comandi attraverso un'interfaccia seriale (RS-232) ed aziona opportunamente una serie di interruttori (a relé o a stato solido).

La figura 8 presenta una foto del circuito in esame. In primo piano si notano il microcontrollore ed i due relé. All'esterno della scatola si possono vedere i cinque connettori utilizzati per raggruppare azioni e comandi dello stesso tipo. A partire da sinistra abbiamo: il connettore 1 per alimentazione ed interfaccia seriale, il connettore 2 per i laser di calibrazione NS, il connettore 3 per i relé, il connettore 4 per i laser di calibrazione EW, il connettore 5 per i laser di misura.



**Figura 8.** Circuito che gestisce la calibrazione ed il reset dei digitalizzatori da remoto.

## 6. Schema elettrico e caratteristiche tecniche del circuito

Nella figura 9 viene riportato lo schema elettrico del circuito in esame. Il regolatore di tensione U17 fornisce i livelli di alimentazione per il microcontrollore PIC16F877A (U9) e per tutti i componenti elettronici del circuito. Il regolatore riceve in ingresso, attraverso il connettore J1, una sorgente di tensione esterna di 12V e fornisce in uscita i 5V necessari per il corretto funzionamento del circuito. Il connettore JP7 consente la programmazione del microcontrollore; il connettore JP8, insieme con il MAX3232, viene utilizzato per la comunicazione bi-direzionale MCU-PC. Il microcontrollore PIC16F877A utilizza i pin 19, 20, 21, 22 per comandare il gruppo laser 2; i pin 35, 36, 37, 38 per comandare il gruppo laser 1; i pin 27, 28 per comandare il laser di misura 1 ed il laser di misura 2; i pin 33, 34 per interrompere l'alimentazione tramite il relé 1 ed il relé 2.

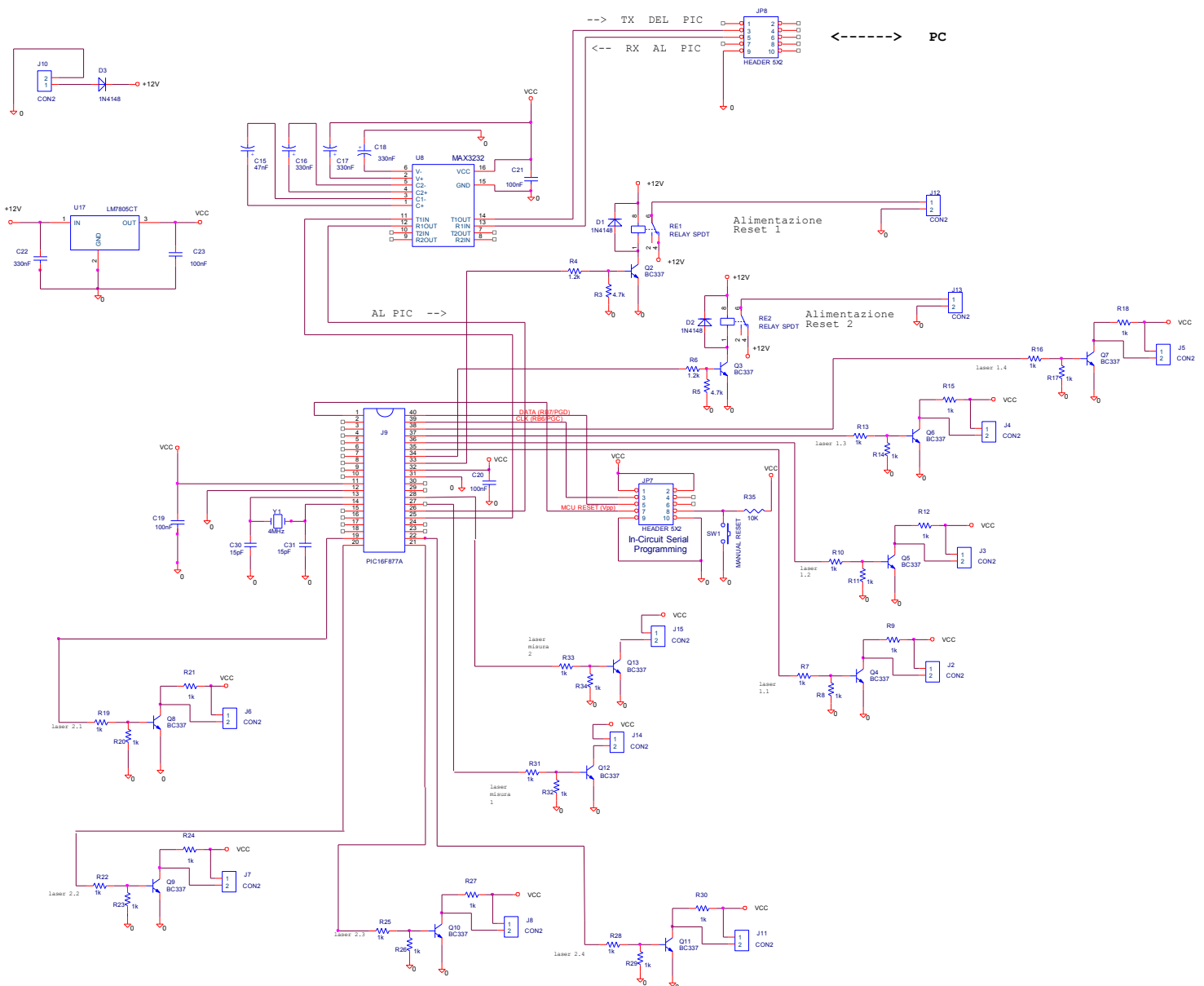
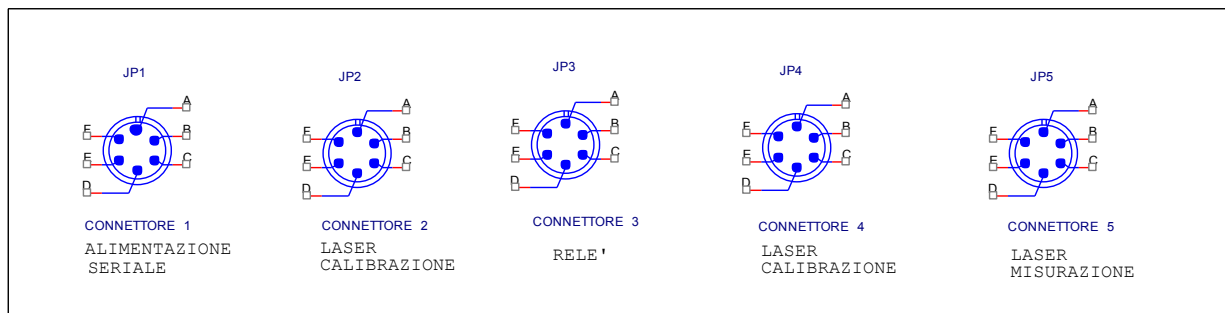


Figura 9. Schema elettrico del circuito.

La figura 10 lega le due figure precedenti perché chiarisce, in dettaglio, come avvengono le connessioni tra i connettori presenti all'esterno della scatola di figura 8 e i connettori presenti nello schema elettrico di figura 9.

DISPOSIZIONE FRONTALE SCATOLA



A alimentazione	A negativo laser 2.1	A	A negativo laser 1.1	A positivo laser 1
B massa	B negativo laser 2.2	B	B negativo laser 1.2	B negativo laser 1
C RS-232 tx	C negativo laser 2.3	C	C negativo laser 1.3	C positivo laser 2
D RS-232 rx	D negativo laser 2.4	D	D negativo laser 1.4	D negativo laser 2
E RS-232 massa	E positivo laser		E positivo laser	

**Figura 10.** Collegamento connettori interni e connettori esterni alla scatola.

Il connettore JP2 è collegato al gruppo di laser di calibrazione NS tramite i connettori J6, J7, J8, J9. Il connettore JP3 è collegato ai due relé tramite i connettori J12 e J13. Il connettore JP4 è collegato al gruppo di laser di calibrazione EW tramite i connettori J2, J3, J4, J5. Il connettore JP5 è collegato ai due laser di misura tramite i connettori J14 e J15. Abbiamo lasciato per ultimo il connettore JP1 perché è collegato a due tipi di connettori differenti: J1 e JP8. J1 è identico ai Jx visti in precedenza e tramite di esso viene fornita l'alimentazione e la massa al circuito; JP8, invece, è usato per la comunicazione bi-direzionale da remoto PC-MCU.

## 7. Programmazione della MCU e comandi al dispositivo

I due connettori JP7 e JP8 sono entrambi utilizzati per le comunicazioni con l'esterno, ma svolgono funzioni differenti.

Il microcontrollore può essere programmato attraverso un *PICflash2 programmer* collegato al connettore JP7. Il *PICflash programmer* si comporta sia come ICSP (*In-Circuit Serial Programmer*) che come ICD (*In-Circuit Debugger*). JP7, quindi, è usato esclusivamente in fase di programmazione del microprocessore per connettere il computer, dove il programma è stato scritto e testato, con il microprocessore su cui il programma sarà installato. Si tratta di una comunicazione che avviene una singola volta per ogni trasferimento del programma nella memoria del microprocessore. È bene sottolineare che questo trasferimento non avviene da remoto, ma, per quanto ci riguarda, è stato effettuato direttamente nella grotta durante il montaggio del dispositivo. La sorgente in Pascal del programma è disponibile (<http://www.earth-prints.org/bitstream/2122/8375/2/grotta.ppas>).

JP8, invece, è usato durante la comunicazione PC-MCU. Questa comunicazione avviene ogni volta che la persona addetta a verificare le condizioni dei digitalizzatori ottici invia, tramite PC, un comando al MCU ed è di tipo bi-direzionale perché al comando inviato dal PC segue la risposta del MCU. Inoltre questa comunicazione avviene da remoto: gli strumenti collocati all'interno della Grotta Gigante non sono facilmente accessibili e, per questo motivo, è importante che chi è addetto alle operazioni di calibrazione e di

reset dei digitalizzatori possa effettuarle da remoto evitando di scendere all'interno della Grotta. Una volta lanciato, il programma si pone in attesa di comandi dalla seriale (9600baud, nessuna parità, 8 bit, 1 stop bit). Il comando accettato dalla tastiera è del tipo: @k#, dove @ è il carattere di inizio stringa; # il carattere di fine stringa; k determina il tipo di azione e può assumere i seguenti valori:

- a: rele\_1
- b: rele\_2
- c: rele\_1 e rele\_2
- 1: laser\_1\_1 on e off
- 2: laser\_1\_2 on e off
- 3: laser\_1\_3 on e off
- 4: laser\_1\_4 on e off
- 5: laser\_2\_1 on e off
- 6: laser\_2\_2 on e off
- 7: laser\_2\_3 on e off
- 8: laser\_2\_4 on e off
- m: laser di calibrazione 1\_1 e 2\_1 on e off
- n: laser di calibrazione 1 in sequenza on e off
- o: laser di calibrazione 2 in sequenza on e off
- p: laser di calibrazione in sequenza on e off
- q: laser di calibrazione on
- r: laser di calibrazione off
- s: laser di misura 1 off
- t: laser di misura 2 off
- u: laser di misura 1 on
- v: laser di misura 2 on

Il programma ha un tempo massimo per la ricezione di un comando corretto. Una stringa non chiusa in un tempo ragionevole viene ignorata. Se viene ricevuto un comando non corretto il dispositivo lo segnala e scrive la legenda dei comandi possibili e del loro significato. Il programma tiene al corrente l'operatore del buon esito dell'operazione.

Di seguito il log di una seduta per la calibrazione di un digitalizzatore (in nero il comando lanciato dall'operatore tramite linea seriale, in rosso l'eco ricevuto sul terminale con cui l'operatore viene informato sul comando da lui lanciato):

@s#

Spegni il laser di misura 1

@n#

In sequenza laser calibrazione: laser 1.1, laser 1.2, laser 1.3, laser 1.4

@u#

Accendi il laser di misura 1

Facciamo notare che il comando @n#, che determina l'accensione in sequenza dei quattro laser di calibrazione, produce il grafico che abbiamo visto nella figura 6.

## 8. Conclusioni

Rispetto al sistema precedente, il segnale laser in entrata ha maggiore luminosità e non presenta problemi di rumore a livello di registrazione. I dati acquisiti vengono salvati su file orari che hanno approssimativamente 109366 campioni; questo corrisponde ad una frequenza di campionamento di 30.3794 campioni al secondo, e un intervallo di campionamento di 0.0329 sec. Il rilevatore viene esposto al laser di calibrazione per un intervallo di tempo intorno ai 4 secondi, che corrisponde a circa 130 campioni. Nella figura 6 abbiamo riportato la registrazione dei dati di una calibrazione. Il valore medio rilevato nella



calibrazione è stabile entro un errore di poche unità sulla quarta cifra significativa. L'aggiornamento del sistema ha portato ad una riduzione notevole dell'errore sul valore di calibrazione, che è di due ordini di grandezza migliore rispetto a quello ottenuto prima dell'intervento, e a una frequenza di campionamento doppia, approssimativamente 30 campioni al secondo rispetto a 15.

## **Bibliografia**

Braitenberg C., Romeo G., Taccetti Q., Nagy I., (2006). *The very-broad-band long-base tiltmeters of Grotta Gigante (Trieste, Italy): Secular term tilting and the great Sumatra-Andaman islands earthquake of December 26, 2004*. Journal of Geodynamics 41 (2006) 164–174.

Braitenberg C. et al., (2010). *La Stazione Geofisica Ipogea Della Grotta Gigante (Carso Triestino)*. Unpubl. Annual Report, DIGeo, Trieste, 53 pp.

Marussi A., (1960). *The University of Trieste station for the study of the tides of the vertical in the Grotta Gigante*. Proceedings of the III Int. Symposium on Earth Tides, Trieste, 1960, 45-52.

Romeo G., (2000). *Digitization of optical lever instruments*. Annali di Geofisica vol. 43 n. 3 June 2000.

Zöllner F., (1872). *Zur Geschichte des Horizontalpendels*.  
Ber Verh Königl Sächs Ges Wiss Leipzig Math-Phys Cl 24:183–192, Reprinted in Ann Phys Chem (1873) 150:140–150.



**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**