

Rapporti tecnici INGV

**Sistema di livellamento automatico
dei sismometri**

266



Istituto Nazionale di
Geofisica e Vulcanologia

Editorial Board

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (INGV - RM1)
Luigi Cucci (INGV - RM1)
Nicola Pagliuca (INGV - RM1)
Umberto Sciacca (INGV - RM1)
Alessandro Settimi (INGV - RM2)
Aldo Winkler (INGV - RM2)
Salvatore Stramondo (INGV - CNT)
Gaetano Zonno (INGV - MI)
Viviana Castelli (INGV - BO)
Marcello Vichi (INGV - BO)
Sara Barsotti (INGV - PI)
Mario Castellano (INGV - NA)
Mauro Di Vito (INGV - NA)
Raffaele Azzaro (INGV - CT)
Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)
Mario Mattia (INGV - CT)
Marcello Liotta (Seconda Università di Napoli, INGV - PA)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - coordinatore
Tel. +39 06 51860068
Fax +39 06 36915617
Rossella Celi
Tel. +39 095 7165851
redazionecen@ingv.it



Rapporti tecnici INGV

SISTEMA DI LIVELLAMENTO AUTOMATICO DEI SISMOMETRI

Danilo Contrafatto

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania - Osservatorio Etneo)

266

Indice

Introduzione	7
1. Principio di funzionamento	7
2. Programmazione del microcontrollore BX24P	10
2.1. La subroutine <i>ElabAccel</i>	11
3. Le funzioni del Sistema di Autolivellamento	15
3.1. Funzione n.1. Autolivellamento	15
3.2. Funzione n.2. Livellamento manuale	15
3.3. Funzione n.3. Errore orientamento	15
3.4. Funzione n.4. Dati accelerometrici	15
3.5. Funzione n.5. Riepilogo	15
3.6. Funzione n.6. Impostazioni sistema	16
3.7. Funzione n.7. Test motori	16
3.8. Funzione n.8. Settaggio data e ora	16
3.9. Funzione n.9. Calibrazione accelerometro	16
3.10. Funzione n.10. Calibrazione bussola	16
3.11. Funzione n.11. Retroilluminazione	17
3.12. Funzione n.12. Reset contatori	17
3.13. Funzione n.13. StandBy	17
4. Il prototipo	17
5. Conclusioni	21
Ringraziamenti	21
Bibliografia	21
Sitografia	21
Appendice	23
A1. Il microcontrollore <i>BX24P</i>	25
A2. L'accelerometro <i>DE-ACCM2G</i>	26
A3. La bussola elettronica <i>CMPS03</i>	27
A4. I motori passo-passo	27
A4.1 Il motore <i>SANYO-DENKI</i>	28
A5. Il controller motori <i>ES1000</i>	29
A6. Il modulo ricetrasmittitore <i>Easy-radio ER400TRS</i>	30
A7. Il Display <i>Devantech</i>	31

Introduzione

In seno all'attività interna di gestione, manutenzione e upgrade dei sistemi di monitoraggio sismico, svolta all'interno del gruppo tecnico *Rete Sismica Permanente Digitale Broadband Nanometrics* afferente alla Unità Funzionale Sismologia, presso l'Osservatorio etneo dell'INGV, si è progettato e realizzato un dispositivo che consente il livellamento automatico dei geofoni, nonché di conoscerne l'errore angolare nell'orientamento verso il nord, commesso in fase di installazione. Ciò è reso possibile sostanzialmente da una logica di controllo basata sul microcontrollore *BasicX*, interfacciato ad una coppia di motori passo-passo che agiscono sui piedini del geofono regolandone in modo del tutto automatico il livellamento.

L'idea di realizzare un Sistema di Auto-Livellamento (da questo momento in poi denominato SAL) nasce dalla necessità di ridurre i problemi derivanti dal posizionamento dei sensori in condizioni disagiate, come ad esempio nel caso di installazioni a fondo pozzo. Costituisce in definitiva una soluzione all'installazione di sensori in condizioni di non accessibilità da parte di operatori, in cui anche l'orientamento verso il nord diventa problematico.

1. Principio di funzionamento

Il sistema è stato concepito per lavorare con molti dei geofoni presenti in commercio, apportando il minor numero di modifiche ed adattamenti possibili.

I sismometri broad-band più recenti forniscono in genere un'informazione sull'accelerazione a cui esso è soggetto attraverso i segnali di *mass position*, che in linea di principio possono essere utilizzati come informazione necessaria ad annullare l'errore di livellamento del geofono stesso. Questa soluzione però deve far fronte ad alcune problematiche:

- Alcuni geofoni meno recenti ma ancora largamente in uso non dispongono di questi segnali in uscita. Altri, come ad esempio il Trillium 40s, forniscono i segnali di *mass position*, che però sono strettamente legati alla temperatura (pag. 8 del *Trillium Seismometer User Guide*). Di conseguenza un tentativo di livellamento basato sulla lettura delle *mass position*, ad una temperatura diversa da quella di fabbrica, porterebbe come risultato al solo centraggio delle masse e non all'effettivo livellamento del geofono. In pratica avremmo in tal caso realizzato un sistema di auto-centraggio masse che, in generale, non implica il livellamento del geofono. Questo problema potrebbe essere affrontato introducendo una compensazione in temperatura che eliminerebbe questo errore, ma che implicherebbe una maggiore complessità nonché un ulteriore errore (sistematico + aleatorio) che aumenta l'incertezza generale del sistema.
- È necessario attendere che il sismometro entri a regime dopo la messa in stazione, per evitare di avere letture delle *mass positions* differenti se effettuate immediatamente dopo la messa in stazione oppure qualora sia trascorso un certo tempo prima di effettuare la lettura stessa. Ciò eviterebbe di interpretare erroneamente i valori di inclinazione ricavati dalle *mass positions* durante la fase di assestamento, la cui durata è generalmente non nota e dipendente da diversi fattori. Resta peraltro il rischio di errori nel caso in cui il geofono sia soggetto a sollecitazioni sconosciute, soprattutto se a bassa frequenza, come ad es. la presenza nelle immediate vicinanze di un operatore oppure un telesisma.
- Si può facilmente verificare che per semplificare l'algoritmo di livellamento è preferibile fare riferimento ad un sistema di assi $[X,Y,Z]$ piuttosto che $[Z,N-S,E-W]$ (tranne quando questi siano sovrapponibili), con gli assi X,Y giacenti sul piano di livellamento (Figura 1) e orientati in modo che l'asse X intersechi gli assi di due dei tre piedini, uno dei quali è mantenuto fisso e l'altro è mobile, mentre l'asse Y intersechi l'asse dell'altro piedino mobile (Figura 2). Grazie a questa condizione è possibile livellare indipendentemente gli assi X,Y , attraverso due rotazioni successive, senza che la variazione di uno causi variazioni angolari dell'altro.

Per sfruttare questo accorgimento geometrico utilizzando i segnali di *mass positions* nel Trillium 40s, la terna di vettori $[U,V,W]$ a cui essi sono legati (Figura 1), deve essere ruotata applicando una matrice di rotazione, al fine di pervenire sempre alla terna $[X,Y,Z]$. Tale matrice non è nota e nel caso del Trillium il costruttore fornisce la matrice di rotazione tra la terna $[U,V,W]$ e $[Z,N-S,E-W]$, che però non torna utile, in quanto la terna $[Z,N-S,E-W]$ non soddisfa la condizione di intersezione prima citata. L'asse $N-S$ forma infatti un angolo $\beta \neq 0$ con l'asse X che interseca il piedino 2, come mostrato in Figura 2.

Poter disporre di un apposito sensore in grado di misurare direttamente l'inclinazione degli assi X ed Y costituisce quindi un grosso vantaggio pratico. Così facendo, inoltre, si rende il SAL indipendente dal tipo di sismometro utilizzato, senza cioè la necessità di calcolare di volta in volta la matrice di rotazione associata.

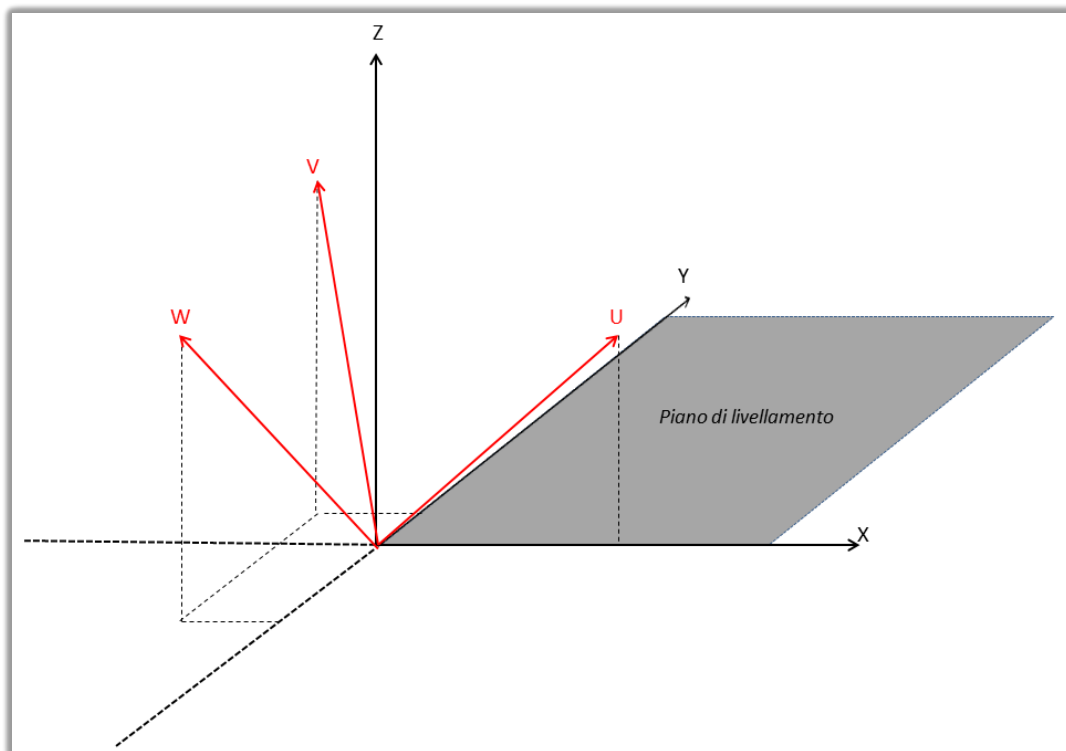


Figura 1. Orientamento terna sensore [U,V,W] rispetto al piano di livellamento [X,Y].

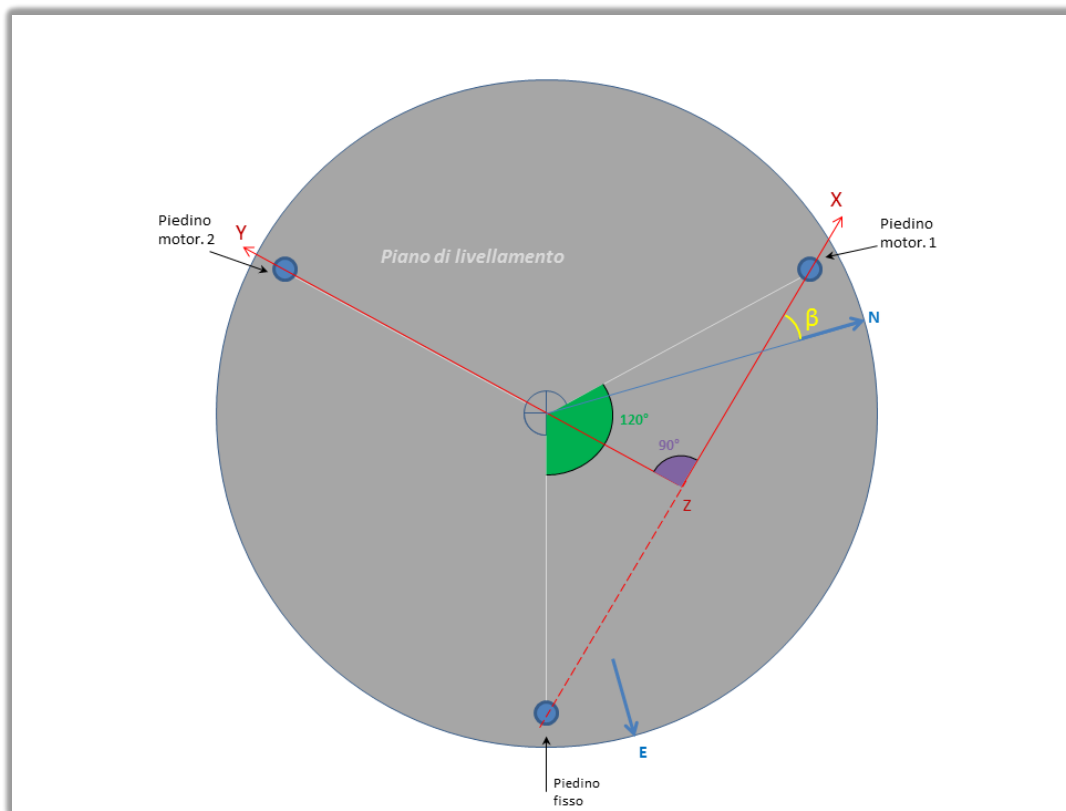


Figura 2. Geometria della base del Nanometrics Trillium 40s. Intersezione assi X,Y con gli assi dei piedini. Angolo β tra asse N-S e asse X.

Le difficoltà e gli svantaggi legati alla soluzione che sfrutta i segnali mass position, hanno portato in definitiva ad abbracciare la soluzione che adotta un accelerometro dedicato alla misura diretta dell'inclinazione del sismometro rispetto al suolo. La scelta di tale dispositivo è frutto naturalmente di un compromesso tra performance e costi sostenibili.

In Figura 3 è illustrato lo schema generale di funzionamento del SAL che, fondamentalmente, consta di una parte elettromeccanica ed una elettronica di controllo e sensori.

Mentre il geofono ed il digitalizzatore continuano a svolgere le loro normali funzioni, il SAL lavora autonomamente. Il microcontrollore *BasicX BX24P* elabora le informazioni fornite da un accelerometro biassiale, solidale al sismometro, per pilotare di conseguenza gli attuatori al fine di eseguire la correzione dell'inclinazione del geofono. La regolazione automatica è studiata in modo da interrompere la rotazione dei motori quando l'inclinazione dell'accelerometro raggiunge i valori memorizzati in fase di calibrazione (par. 3.1). I dati forniti dalla bussola elettronica consentono invece di effettuare una correzione manuale dell'azimut del geofono o ancora una correzione in post-processing del segnale sismico (vedi Appendice per maggiori dettagli sui componenti utilizzati).

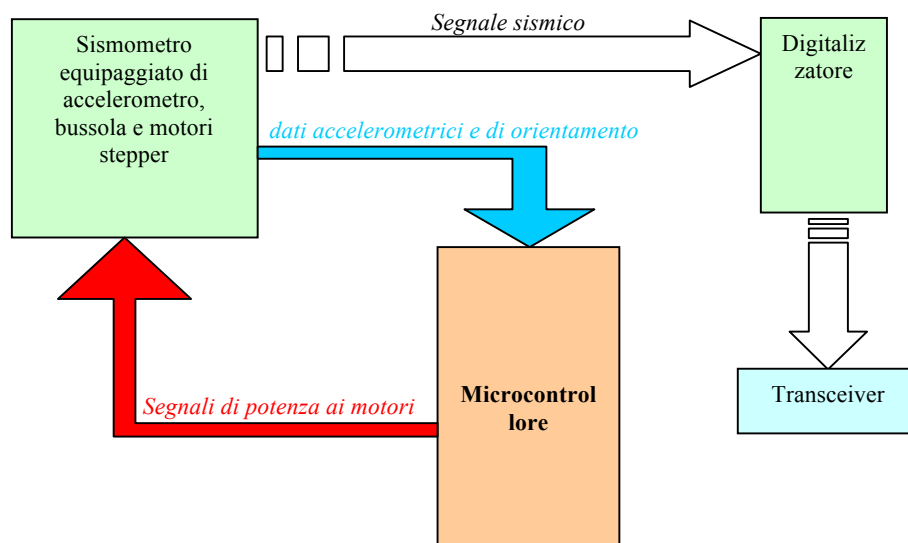


Figura 3. Schema generale di funzionamento del Sistema di Auto-Livellamento applicato ad un generico geofono.

Il microcontrollore, attraverso il software di gestione, mette a disposizione dell'utente diverse funzioni e opzioni, dal settaggio della data e ora alla visualizzazione in tempo reale dei campioni del segnale accelerometrico, dalla scelta di parametri legati al geofono utilizzato, al test motori. Il codice viene fatto girare sul processore *Atmel AT90S8535* dotato di una EEPROM da 32 KB, che rappresenta il cuore del microcontrollore *BasicX BX24P*. Il software di gestione è stato concepito in modo da permettere all'operatore di interfacciarsi al sistema nel modo più semplice e comodo possibile, fornendo allo stesso tempo diversi strumenti con i quali è possibile configurare il dispositivo, il tutto attraverso l'ausilio di un comodo radiocomando, costituito da un display monocromatico, da due pulsanti di controllo (denominati A e B) e da un radiomodem UHF.

In Figura 4 è illustrato uno schema a blocchi del SAL che, oltre ai componenti già enunciati, è costituito da due *motor-driver*, indispensabili a fornire la potenza necessaria ad azionare i motori, dato che il microcontrollore fornisce alle porte una corrente inadeguata allo scopo (20mA alla tensione di 5V).

La parte elettromeccanica è costituita essenzialmente da:

- due motori passo-passo ad elevata risoluzione (1.8° per step), che consentono la motorizzazione di due dei tre piedini del sensore, corredati di perni filettati e coni di contatto con il terreno;
- una piastra circolare che, fissata alla base del geofono, ha il compito di sostenere il contenitore che alloggia l'elettronica e consentire il corretto funzionamento dei motori passo-passo;
- un perno a punta conica, di lunghezza tale da compensare il rialzo dovuto all'inserzione dei motori, con lo scopo di conferire stabilità fornendo il terzo punto d'appoggio al geofono.

Le descrizioni dettagliate dei vari componenti che costituiscono la scheda di controllo e la parte meccanica del SAL sono consultabili in Appendice.

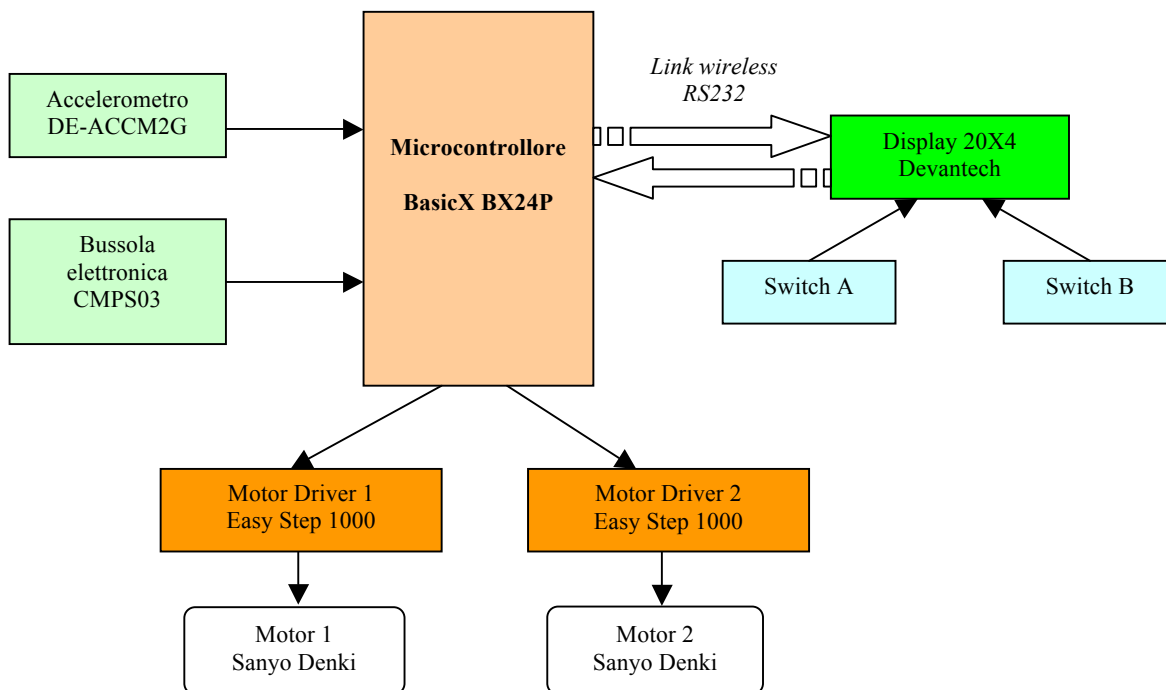


Figura 4. Schema a blocchi del SAL.

2. Programmazione del microcontrollore BX24P

La programmazione del microcontrollore BasicX è stata preceduta da una fase preliminare durante la quale è stato raggiunto un certo livello di “confidenza” con il linguaggio di programmazione dedicato. Per la fase di programmazione è stato determinante l’utilizzo di una scheda di sviluppo (*Development Board*, Figura 5), equipaggiata con un’interfaccia seriale dedicata alla programmazione dei BasicX, un connettore di alimentazione e un’area di prototipazione.

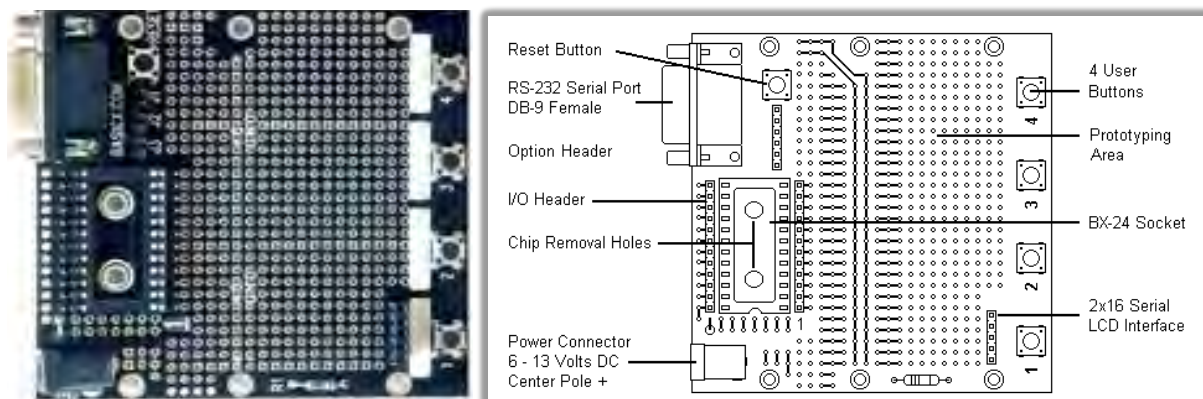


Figura 5. Development Board per BasicX.

Attraverso questa scheda e con l’ausilio di una breadboard, sono state realizzate le interconnessioni tra i vari dispositivi (microcontrollore, accelerometro, bussola elettronica, display...) per verificarne il funzionamento. In seguito, durante la fase di realizzazione del prototipo, tutti i componenti sono stati assemblati su una unica scheda millefori (par. 4).

Il codice è stato sviluppato nel linguaggio proprietario *BasicX*, simile al noto *VisualBasic*, con l'ausilio dell'editor/compiler BASICX Express ver.2.10, messo gratuitamente a disposizione direttamente sul sito internet www.basicx.com, di cui, in Figura 6, viene riportato un print-screen.

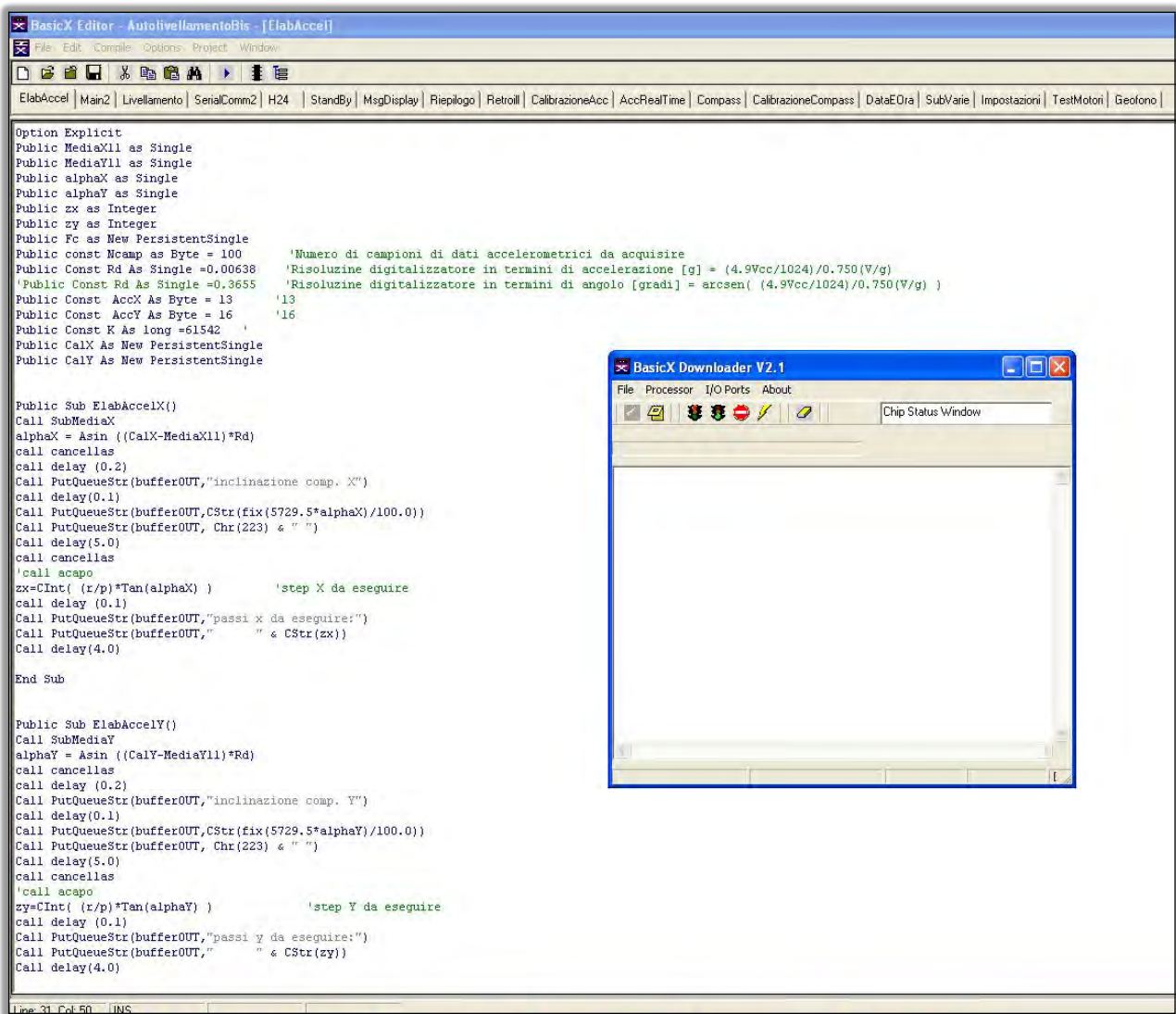


Figura 6. Print-screen della subroutine “*ElabAccel*” scritta con l’editor-compiler BasicX Express V.2.1.

Il programma è costituito da diversi moduli, ognuno dei quali a sua volta contiene le varie subroutine dedicate all’esecuzione delle varie funzioni implementate che vengono richiamate dal *main program*, su comando dell’operatore, attraverso l’ausilio della radiocomando per il telecontrollo. Nel par. 3 sono esplicitate in dettaglio le funzioni ad oggi implementate e messe a disposizione dal software.

Il software può comunque essere implementato da nuove funzioni in qualsiasi momento. Il microcontrollore BX24 infatti può essere riprogrammato senza essere rimosso dalla scheda di controllo in cui si trova inserito, poiché la programmazione avviene tramite la porta di comunicazione seriale Com1, con protocollo RS232 (9600, 8N1).

2.1 La subroutine *ElabAccel*

La subroutine *ElabAccel* (Figura 6) rappresenta la parte di codice più importante dell’intero software, poiché grazie ad essa il SAL è effettivamente in grado di valutare e quindi correggere l’inclinazione del sismometro rispetto al sistema di riferimento [X,Y,Z] solidale al terreno. L’accelerometro biassiale (X,Y), solidale al sismometro, fornisce in uscita due segnali analogici, V_x e V_y , proporzionali alle componenti gravitazionali che, una volta acquisiti attraverso l’ADC del microcontrollore, vengono associati rispettivamente a due variabili, chiamate $Valore_{attualeX}$ e $Valore_{attualeY}$. A seguito del loro processamento viene

determinato il numero di step $Nsteps$ per ognuno dei due motori (variabili Zx e Zy nel software), per ottenere l'annullamento dell'errore, definito come la differenza tra $Valore_{calibrazione}$ (assunto come riferimento, vedi par. 3.9) e $Valore_{attuale}$.

Da una osservazione della geometria del sistema, si ricava:

$$Nsteps = \left(\frac{r}{p}\right) * \text{Tan}\{\text{Arcsen}[(Valore_{calibrazione} - Valore_{attuale}) * Rdg]\} \quad (1)$$

dove Rdg [g] rappresenta la risoluzione del digitalizzatore del BX24 in termini di accelerazione, pari al rapporto tra Rdv [V], risoluzione del convertitore A/D del BX24, e S_{acc} [V/g], sensibilità dell'accelerometro (750mV/g se $V_{cc} = 5.0V$):

$$Rdg = \frac{Rdv}{S_{acc}} = [5.0 / (2^{10} - 1)] / 0.750 = 0.00651 [g] \quad (2)$$

e dove r è la mediana del triangolo equilatero di cui i tre piedini costituiscono i vertici, ovvero la distanza tra un piedino e l'asse che unisce gli altri due opposti, mentre p è la minima variazione verticale ottenibile da uno step di motore e dipende dall'angolo di step dei motori (α) e dal passo della filettatura (Δ) del piedino del geofono su cui è installato il dispositivo.

Nel caso dell'installazione del SAL sul Nanometrics Trillium, $r = 15,382$ cm.

Inoltre poiché:

$$\begin{aligned} \alpha_{min} &= 1.8^\circ && \text{(angolo di step dei motori Sanyo Denki)} \\ \Delta &= 0.5mm && \text{(passo filettatura piedini del Trillium 40)} \end{aligned}$$

si ricava:

$$p = \frac{\alpha_{min}}{360} * \Delta = \frac{1.8^\circ}{360} * 0.5 = 2.5\mu m$$

Qualora si voglia installare il dispositivo autolivellante su un geofono diverso bisognerà avere l'accortezza di modificare nel software i valori di r e p , misurandoli direttamente sul geofono in questione.

La risoluzione del digitalizzatore, in termini di inclinazione in gradi sessagesimali, è pari a:

$$Rd [^\circ] = \text{arcsen}(Rdg) = \text{arcsen}(0.00651) = 0.373 [^\circ] \quad (3)$$

La minima variazione dell'inclinazione di un asse del geofono $\theta_{min,mot}$, attuabile con uno step del motore, si ricava ponendo $Nsteps = 1$ nella (1):

$$\theta_{min,mot} = \text{arctan}\left(\frac{p}{r}\right) = 0.931 * 10^{-3} \cong 0.001 [^\circ] \quad (4)$$

Un ruolo fondamentale svolgono le due variabili $Valore_{calibrazione}$ e $Valore_{attuale}$. In un primo approccio al problema queste variabili sono state inserite in una routine di calcolo che svolgeva la funzione di inseguitore, ovvero un "feedback semplice" per l'azzeramento del segnale errore, ottenuto per differenza tra $Valore_{calibrazione}$ e $Valore_{attuale}$, come rappresentato dallo schema in Figura 7.

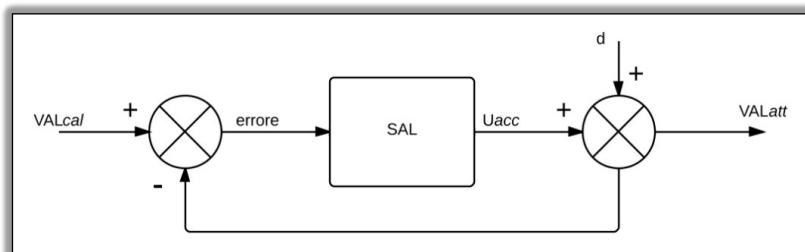


Figura 7. Schema a blocchi dell'inseguitore.

Sfortunatamente però l'informazione $Valore_{attuale}$ ottenuta direttamente dalla conversione A/D del segnale accelerometrico è caratterizzata da una variabilità tale da rendere instabile l'azzeramento dell'errore. Questo perché in realtà $Valore_{attuale}$ è il risultato della somma del segnale utile U_{acc} (uscita accelerometro) e di svariati ingressi indesiderati (disturbi), indicati con d , tra cui si distinguono sicuramente il rumore elettronico generato dallo stesso accelerometro, il rumore meccanico introdotto dall'ambiente circostante e l'errore di quantizzazione insito nell'ADC. Il dato $Valore_{attuale}$ può quindi essere rappresentato da una variabile aleatoria con distribuzione gaussiana, il cui valor medio rappresenta con buona approssimazione il valore cercato e la cui deviazione standard rappresenta lo scostamento da esso.

Il dato $Valore_{attuale}$ così ricavato risulta praticamente intrattabile per i nostri scopi, poiché l'instabilità dell'errore che ne scaturisce causa una continua oscillazione delle variabili Z_x e Z_y . Tale situazione ha di conseguenza portato ad abbandonare la soluzione del "feedback semplice", seppur molto snella dal punto di vista della programmazione e dal punto di vista computazionale. Al fine quindi di ottenere un sistema più stabile è necessario che il dato $Valore_{attuale}$ venga processato prima di essere retroazionato.

Com'è noto, quando si vogliono misurare segnali piccoli immersi in rumore casuale è possibile ricorrere a tecniche di filtraggio. L'informazione che a noi interessa conoscere è contenuta nella componente frequenziale a più bassa frequenza, teoricamente la componente continua, di conseguenza il filtraggio consiste in una semplice media temporale:

$$\frac{1}{T} * \int_0^T (segnale + rumore) dt = \frac{1}{T} * \int_0^T segnale dt + \frac{1}{T} * \int_0^T rumore dt$$

Poiché il rumore ha un valore medio pari a zero, il secondo integrale tenderà gradualmente a zero all'avanzare del tempo. Se il rumore ha un contenuto energetico elevato alle basse frequenze dovremo mediare per un lungo tempo prima di poter leggere in modo accurato il segnale desiderato. Il miglioramento della soglia si paga con una risposta in frequenza più lenta, fattore per noi trascurabile essendo interessati, come già detto, alla componente continua. In definitiva, mediando quanti più campioni possibili, si riesce di fatto ad incrementare l'accuratezza sul $Valore_{attuale}$.

Misura	Fc (Hz)	Comp. X																																			
1	100	503,94		Vmax1= 504,04																																	
2	100	504,04																																			
3	100	504,02		Vmin1= 503,94																																	
4	100	504,00																																			
5	100	503,98	$\Delta x1=(Vmax1-Vmin1)= 0,10$																																		
6	50	503,98		Vmax2= 504,06	Bit digitizer 10 →	Rd(V) 0,0048828																															
7	50	504,01																																			
8	50	503,96		Vmin2= 503,96																																	
9	50	504,06																																			
10	50	503,97	$\Delta x2=(Vmax2-Vmin2)= 0,10$			Rd(g) 0,0065104																															
11	10	503,98		Vmax3= 504,03																																	
12	10	503,96																																			
13	10	503,93		Vmin3= 503,93		Rd(°) 0,373022																															
14	10	503,96																																			
15	10	504,03	$\Delta x3=(Vmax3-Vmin3)= 0,10$																																		
16	1	503,97		Vmax4= 504,00																																	
17	1	503,96																																			
18	1	503,96		Vmin4= 503,96																																	
19	1	503,97																																			
20	1	504,00	$\Delta x4=(Vmax4-Vmin4)= 0,04$																																		
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Fc (Hz)</th> <th>Medie</th> <th>Δx</th> <th>Rd'(V)</th> <th>Bit equivalenti</th> <th>Minima variazione d'angolo risolvibile</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100</td> <td>503,996</td> <td>0,10</td> <td>0,0004883</td> <td>→ 13,32</td> <td>Rd'(°)= 0,0373019 10 volte superiore alla risoluzione Rd</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>503,996</td> <td>0,10</td> <td>0,0004883</td> <td>→ 13,32</td> <td>Rd'(°)= 0,0373019 10 volte superiore alla risoluzione Rd</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>503,972</td> <td>0,10</td> <td>0,0004883</td> <td>→ 13,32</td> <td>Rd'(°)= 0,0373019 10 volte superiore alla risoluzione Rd</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>503,972</td> <td>0,04</td> <td>0,0001953</td> <td>→ 14,64</td> <td>Rd'(°)= 0,0149208 25 volte superiore alla risoluzione Rd</td> </tr> </tbody> </table>								Fc (Hz)	Medie	Δx	Rd'(V)	Bit equivalenti	Minima variazione d'angolo risolvibile	100	503,996	0,10	0,0004883	→ 13,32	Rd'(°)= 0,0373019 10 volte superiore alla risoluzione Rd	50	503,996	0,10	0,0004883	→ 13,32	Rd'(°)= 0,0373019 10 volte superiore alla risoluzione Rd	10	503,972	0,10	0,0004883	→ 13,32	Rd'(°)= 0,0373019 10 volte superiore alla risoluzione Rd	1	503,972	0,04	0,0001953	→ 14,64	Rd'(°)= 0,0149208 25 volte superiore alla risoluzione Rd
Fc (Hz)	Medie	Δx	Rd'(V)	Bit equivalenti	Minima variazione d'angolo risolvibile																																
100	503,996	0,10	0,0004883	→ 13,32	Rd'(°)= 0,0373019 10 volte superiore alla risoluzione Rd																																
50	503,996	0,10	0,0004883	→ 13,32	Rd'(°)= 0,0373019 10 volte superiore alla risoluzione Rd																																
10	503,972	0,10	0,0004883	→ 13,32	Rd'(°)= 0,0373019 10 volte superiore alla risoluzione Rd																																
1	503,972	0,04	0,0001953	→ 14,64	Rd'(°)= 0,0149208 25 volte superiore alla risoluzione Rd																																

Tabella 1. Campionamento del segnale accelerometrico della componente X e confronto tra le risoluzioni equivalenti.

Frequenze di campionamento F_c maggiori assicurano una riproduzione più affidabile del segnale accelerometrico, mentre F_c più basse consentono di acquisire campioni scorrelati tra di loro (ovvero temporalmente lontani), che sommati algebricamente portano, a lungo termine, ad ottenere un dato $Valore_{attuale}$ sicuramente più fedele alla realtà, incrementando la risoluzione R_d [°] di almeno 10 volte.

Il risultato di tale operazione equivale come vedremo, “all’aggiunta di bit” al convertitore A/D, ottenendo così una “risoluzione equivalente” del microcontrollore, ricavabile per via sperimentale attraverso un’analisi statistica.

Nella tabella 1, realizzata con *Microsoft Excel*, sono riportate venti misurazioni del segnale accelerometrico della componente X, realizzate a quattro diverse F_c (100Hz, 50Hz, 10Hz, 1Hz), cinque misurazioni per ogni F_c . Sono inoltre riportate le medie dei suddetti cinque valori, le massime variazioni (Δx), le corrispondenti risoluzioni equivalenti ottenute e quindi i bit equivalenti. Per finire vengono riportati i minimi angoli che il sistema è in grado di risolvere.

Come si può notare osservando la tabella, il miglior risultato si ottiene campionando più lentamente possibile. Nella fattispecie durante l’esperimento si è applicata una F_c minima pari a 1Hz, condizione a cui corrisponde una “risoluzione equivalente” R_d [°] ben 25 volte maggiore a quella insita al digitalizzatore del BasicX. In altre parole, si ottiene un sistema equivalente a quello che si otterrebbe impiegando un digitalizzatore a “14.64” bit, piuttosto che a 10 bit.

A titolo esemplificativo supponiamo di avere 2.513V all’uscita della componente X dell’accelerometro. Sapendo che (alimentando a 5V e in assenza di offset interni) a 0g corrisponde una tensione d’uscita pari a $V_{cc}/2 = 2.50V$, si ha:

$$2.513 - 2.50 = +0.013 [V] \quad (5)$$

Quindi leggeremo sul display il valore espresso in count relativamente alla comp.X, ottenuto dalla digitalizzazione del segnale:

$$Comp.X = 2.513 * \left(\frac{1024}{5.0}\right) \approx 515 [count] \quad (6)$$

Poiché la sensibilità dell’accelerometro (alimentando sempre a 5V) è pari a 0.750 [V/g], si ottiene la componente verticale dell’accelerazione gravitazionale:

$$g(vert) = \frac{0.013}{0.750} = 0.0174 [g] \quad (7)$$

di conseguenza l’inclinazione del geofono indicata sul display (rispetto alla sola comp.X) sarà pari a:

$$Tilt(X) = arcsen(0.0174) = 1.00 [°] \quad (8)$$

Applicando il risultato della (6) nella (1) si ricava il numero di steps che il motore X deve eseguire allo scopo di portare a zero la componente X dell’accelerometro, annullandone l’inclinazione di 1°:

$$\begin{aligned} Nsteps(X) &= \left(\frac{r}{p}\right) * Tan\{Arcsen[(Valore_{calibrazione} - Valore_{attuale}) * Rd]\} = \\ &= \left(\frac{0.15382}{0.000025}\right) * Tan\{Arcsen[(512 - 515) * 0.00638]\} \approx -1178 \end{aligned}$$

Il segno meno sta ad indicare il verso antiorario nella rotazione del motore. Durante la rotazione dei motori, due contatori chiamati N_x ed N_y , vengono incrementati o decrementati (in funzione del verso di rotazione) della quantità di steps eseguiti. Il microcontrollore ha il compito di verificare che questi non superino le soglie sotto 0 e sopra N_{max} (definito in fase di *selezione geofono*, vedi par. 9.6), allo scopo di controllare che non vengano superati i limiti di “fine corsa” delle viti.

La corretta esecuzione della procedura di autolivellamento è subordinata ad una preliminare e corretta calibrazione dell’accelerometro (vedi par. 3.9).

3. Le funzioni del Sistema di Autolivellamento

All'avvio del sistema, sul display del radiocomando viene visualizzata una prima schermata principale di presentazione, a cui segue il messaggio di richiesta di attivazione retroilluminazione display. Il programma quindi visualizza sul display le varie funzioni disponibili, in maniera sequenziale e ciclica, ad ogni pressione del tasto B. Per accedere ad ogni funzione è richiesta la pressione del tasto A. Nei paragrafi di seguito sono riportate le funzioni messe a disposizione dal programma attualmente caricato sul micro BasicX.

3.1. Funzione n.1. *Autolivellamento*

La prima e più importante funzione messa a disposizione dal software e visualizzabile sul display del radiocomando è l'*autolivellamento*, che consente appunto la “messa in bolla” automatica del geofono.

Una volta avviata questa funzione, viene richiesto se impostare il sistema in *Singolo livellamento* o *Controllo H24*:

- *Singolo livellamento*: esegue un semplice autolivellamento del geofono.
- *Controllo H24*: il sistema effettua, 24 ore su 24, un controllo periodico (l'intervallo è settabile con la funz. 3.6) sullo stato dell'inclinazione del geofono, cosicché, al superamento della soglia di trigger preimpostata (funz. n.6), viene automaticamente effettuato un tentativo di correzione del livellamento. Alla fine dell'operazione il sistema memorizza sulla EEPROM data e ora dell'avvenuto autolivellamento (fino ad un massimo di due livellamenti). E' inoltre possibile scegliere l'opzione “*Livellamento su richiesta*”, che permette all'operatore di decidere se effettuare o meno l'autolivellamento a seguito del superamento della soglia di trigger (utile ad esempio a non inficiare la registrazione di un evento sismico in corso).

3.2. Funzione n.2. *Livellamento manuale*

Questa funzione consente di effettuare un livellamento manuale, ovvero mettendo in rotazione i motori attraverso l'ausilio del radiocomando. Sul display vengono visualizzate le informazioni necessarie all'attivazione dei motori. Anche in questo caso la posizione dei motori è controllata continuamente attraverso l'incremento/decremento dei contatori Nx ed Ny.

3.3. Funzione n.3. *Errore orientamento*

Il sistema è progettato per consentire la messa in stazione del geofono senza curarsi troppo dell'orientamento a nord dello stesso, purché in fase di processamento vengano apportate le dovute correzioni sul segnale sismico, attraverso l'ausilio del dato *errore orientamento* fornito da questa funzione. L'errore angolare è visualizzato sul display in gradi sessagesimali, con la risoluzione di 1 grado. La corretta esecuzione della procedura è subordinata ad una preliminare calibrazione della bussola elettronica (vedi par. 3.10).

3.4. Funzione n.4. *Dati accelerometrici*

Questa funzione permette di visualizzare sul display i dati accelerometrici in real-time espressi in count, ovvero i due segnali relativi alle componenti orizzontali X ed Y campionati e quantizzati, assumendo valori compresi tra 0 e 1023 (la risoluzione dell'ADC è infatti di 10bit, vedi Appendice), nonché l'inclinazione del geofono espressa in gradi sessagesimali.

3.5. Funzione n.5. *Riepilogo*

Questa funzione consente di riepilogare sul display una varietà di dati e parametri, accessibili attraverso le seguenti voci:

- *info livellamento*: visualizza l'esito dell'ultimo livellamento ed eventualmente il numero di steps eseguiti dai motori per giungere al livellamento.
- *info orientamento*: visualizza l'ultimo *errore angolare* acquisito, espresso in gradi.
- *modello geofono installato*: indica il modello selezionato tra quelli disponibili.
- *dati calibrazione accelerometro*: restituisce le quantità associate ai registri *CalX* e *CalY*, determinati in fase di calibrazione.
- *data e ora attuale e dell'installazione*: visualizza la “data e ora attuale”, che si resetta a “1999/01/01, 00:00:00” ogni qualvolta venga disinserita l'alimentazione.
- *Versione software display*: restituisce la versione software del display.

3.6. Funzione n.6. *Impostazioni sistema*

Questa funzione è sicuramente tra le più importanti, poiché consente di definire diversi parametri necessari al corretto funzionamento del sistema. È possibile caricare i parametri preimpostati al momento della programmazione, richiamandoli dalla voce “Load Default setting”, oppure è possibile impostarli manualmente, accedendo alle seguenti sezioni:

- *Selezione geofono*: consente di definire alcuni importanti parametri, quali r , p , la lunghezza della filettatura del piedino motorizzato e il passo della filettatura (e di conseguenza il numero N_{max} di steps ammessi).
- *Attesa controllo 24h*: definisce l’intervallo temporale che intercorre tra due test di livellamento. I valori possibili sono: 1 min, 15 min, 60 min, 1 giorno, 7 giorni.
- *Frequenza di Campionamento*: definisce la frequenza di campionamento del segnale accelerometrico durante la conversione A/D da parte del microcontrollore. Da questa dipende la precisione con cui viene determinata l’inclinazione del geofono, ottenuta come media aritmetica dei campioni acquisiti, in un dato intervallo. Di conseguenza da essa dipende la precisione con cui viene effettuata la calibrazione dello stesso accelerometro, nonché la precisione con cui viene effettuato un livellamento automatico. I valori possibili sono: 1 Hz, 10 Hz, 50 Hz, 100Hz.
- *Velocità motori*: definisce la velocità di rotazione dei motori, in termini di “giri al minuto” (rpm). I valori possibili sono: 5 rpm, 10 rpm, 20 rpm, 40 rpm.
- *Passi da eseguire per il test motori*: definisce il numero di step che i motori devono eseguire durante il test di funzionamento degli stessi. I valori possibili sono: 50, 100, 200, 400.
- *N. test da eseguire dopo il trigger*: definisce il numero di verifiche che il sistema deve eseguire dopo che il livello di trigger è stato superato, al fine di eliminare ogni possibile dubbio su eventuali falsi allarmi di “slivellamento”. I valori possibili sono: 1, 3, 5, 7.
Se per più della metà dei test il risultato è affermativo, il sistema provvederà ad effettuare un autolivellamento.
- *Livello di trigger in modalità controllo 24h/24h*: definisce il livello di trigger, in termini di count, da superare affinché si verifichi un evento di “slivellamento”. Questo parametro è fondamentale al fine di filtrare spiacevoli falsi allarmi e di conseguenza inutili tentativi di livellamento. I valori possibili sono: 3, 6, 10, 15.

3.7. Funzione n.7. *Test motori*

Questa funzione consente di effettuare una verifica di funzionamento dei motori, attivando entrambe i motori prima in un senso e poi nell’altro, uno alla volta. La velocità di rotazione dei motori e il numero di steps da effettuare sono definiti nella funz. n.6 (par. 3.6).

3.8. Funzione n.8. *Settaggio data e ora*

Questa funzione può essere tralasciata se si intende effettuare semplicemente un singolo livellamento. Risulta invece importante, come già spiegato nel par. 3.1, nel caso in cui si seleziona l’opzione *Controllo 24H*. Può comunque risultare utile per memorizzare semplicemente la data e l’ora della messa in stazione.

3.9. Funzione n.9. *Calibrazione accelerometro*

L’accelerometro biassiale ACCM2G in verità non necessita di alcuna calibrazione. Esso infatti fornisce in uscita un segnale analogico proporzionale all’accelerazione. Per calibrazione quindi si intende l’assunzione dello “zero” da parte microcontrollore, ovvero dei valori (in count) di accelerazione acquisiti in corrispondenza del reale livellamento del geofono, eseguito manualmente da un operatore. Grazie a questa operazione si riesce ad eliminare l’errore sistematico eventualmente prodotto, sotto forma di *offset*, all’uscita dell’accelerometro.

3.10. Funzione n.10. *Calibrazione bussola*

La procedura di *calibrazione bussola* costituisce un fattore fondamentale per il suo corretto funzionamento. Tale procedura deve essere eseguita soltanto una volta, ad esempio in laboratorio prima della messa in stazione. Viene eseguita semplicemente seguendo le istruzioni visualizzate sul display, ovvero orientando la bussola sui quattro punti cardinali e procedendo con la pressione del tasto A per convalidare e quindi salvare sulla EEPROM il dato visualizzato sul display.

3.11. Funzione n.11. *Retroilluminazione*

Come già accennato il display è dotato di retroilluminazione. Tale funzione può essere abilitata o disabilitata anche all'avvio del programma attraverso la pressione del tasto A, durante la visualizzazione della schermata di presentazione iniziale.

3.12. Funzione n.12. *Reset contatori*

Questa funzione permette di “resettare” a zero i contatori Nx ed Ny (registri per l'autolivellamento). Tale operazione è necessaria e viene eseguita in automatico ogniqualvolta si avvia la procedura di calibrazione dell'accelerometro del SAL.

3.13. Funzione n.13. *StandBy*

La funzione StandBy consente al microcontrollore di passare alla modalità “Power Down”, allo scopo di limitare gli assorbimenti di energia. Non è invece possibile limitare gli assorbimento dei restanti componenti circuitali, che restano comunque attivi.

4. Il prototipo

Per la realizzazione ed il collaudo del prototipo del SAL è stato scelto il geofono *Nanometrics Trillium 40*, un sensore molto diffuso nella rete sismica dell'Osservatorio Etno dell'INGV, che con i suoi 11 kg di peso ha rappresentato una bella sfida per il sistema proposto.

Lo schema elettrico della scheda di controllo è illustrato in Figura 8 mentre nella foto di Figura 9 è possibile identificare i vari componenti così come alloggiati sulla scheda.

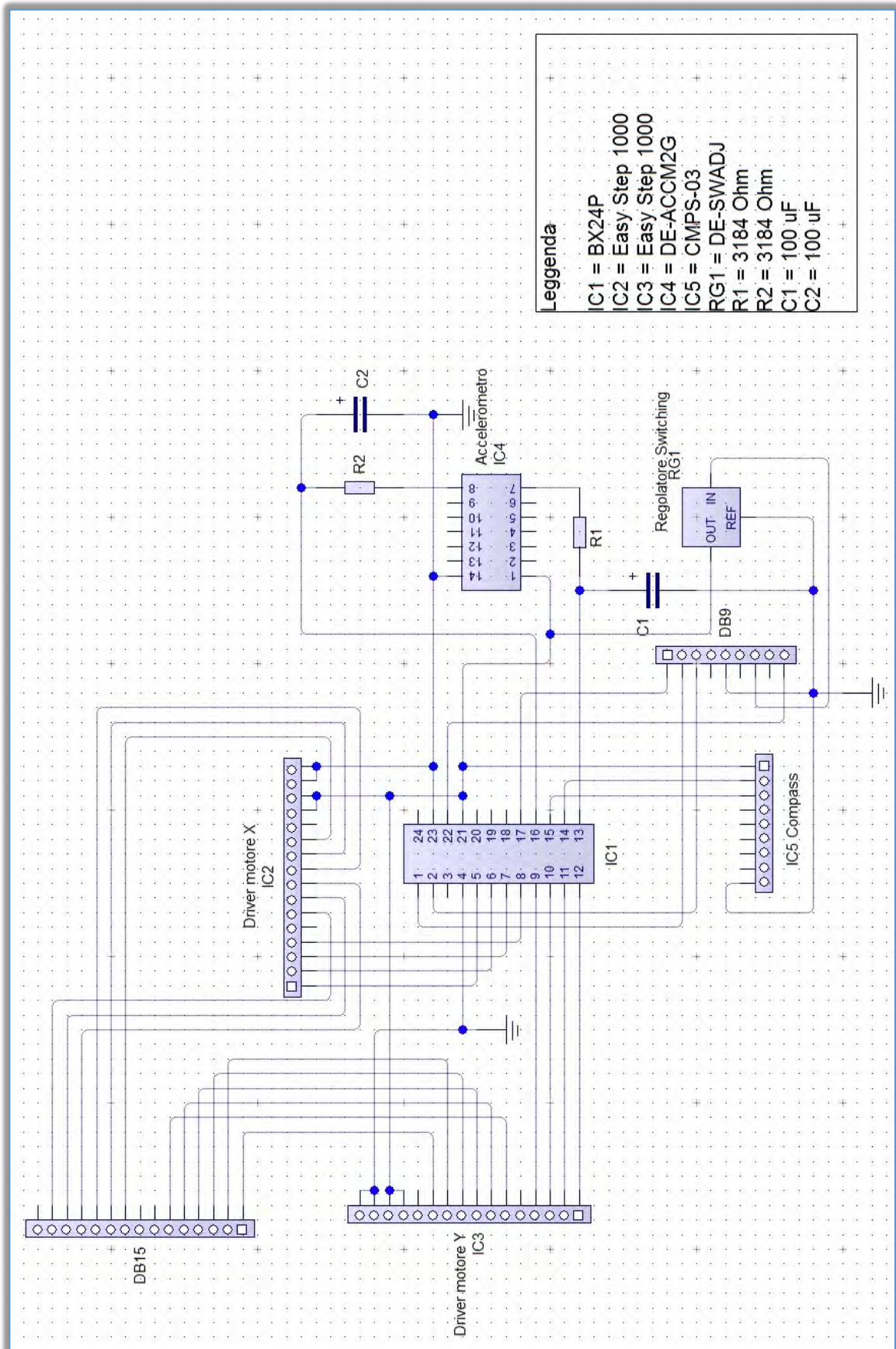
La piastra circolare, i perni filettati, i coni ed il perno a punta conica, a cui si è accennato nel par. 1, sono stati appositamente progettati e realizzati per adattare il SAL al sensore *Nanometrics Trillium 40*.

Il prototipo circuitale è stato assemblato su una scheda millefori e racchiuso in un contenitore metallico a tenuta stagna (Figg. 9-1 e A11), saldamente assicurato alla piastra circolare appositamente fresata (Figg. 11-1, A11 e A13), fissata a sua volta alla base del sismometro.

Il microcontrollore (Figura 9-2) e la bussola elettronica (Figura 9-3) alloggiavano su uno zoccolo da 24 pin, l'accelerometro (Figura 9-4) su uno zoccolo da 16 pin ancorato al coperchio della scatola, mentre i drivers motori (Figura 9-5) sono stati connessi direttamente alla millefori. La scheda è provvista di un connettore DB9 maschio (Figura 9-6) per il collegamento alla batteria di alimentazione e ad uno dei due radiomodem RS232, ed un DB9 femmina (Figura 9-7) per l'interconnessione al PC in RS232.

Due filtri RC antialiasing (Figura 9-9) sono stati inseriti all'uscita dell'accelerometro allo scopo di limitarne in banda il segnale analogico, che altrimenti sarebbe di 500Hz (vedi specifiche accelerometro in appendice). Poiché l'informazione ricercata, ovvero l'inclinazione del geofono sui due assi, è rappresentata dalla componente continua del segnale in uscita all'accelerometro, è stato possibile scegliere frequenze di campionamento relativamente basse. Il software, come già specificato nel par. 3.6, consente di scegliere la frequenza di campionamento, partendo da una freq. minima F_{s-min} di 1Hz. Allo scopo di rispettare il noto teorema di Shannon sul campionamento, secondo cui la $F_s \geq 2*B$ (con B banda del segnale analogico), i filtri sono stati realizzati in modo tale che la frequenza di taglio P-B sia pari a $F_{s-min}/2 = 0.5$ Hz. Si ricava quindi il valore di $R=R_1=R_2$ dei filtri passivi, imponendo il valore di $C = C_1 = C_2 = 100\mu F$:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_t = \frac{1}{2\pi RC} = 0.5 \text{ Hz} \\ C = 100\mu F \end{array} \right. \longrightarrow R = \frac{1}{2\pi C F_t} \approx 3184 \Omega$$



- Leggenda**
- IC1 = BX24P
 - IC2 = Easy Step 1000
 - IC3 = Easy Step 1000
 - IC4 = DE-ACCM2G
 - IC5 = CMPS-03
 - RG1 = DE-SWADJ
 - R1 = 3184 Ohm
 - R2 = 3184 Ohm
 - C1 = 100 uF
 - C2 = 100 uF

Figura 8. Schema elettrico della scheda di controllo.

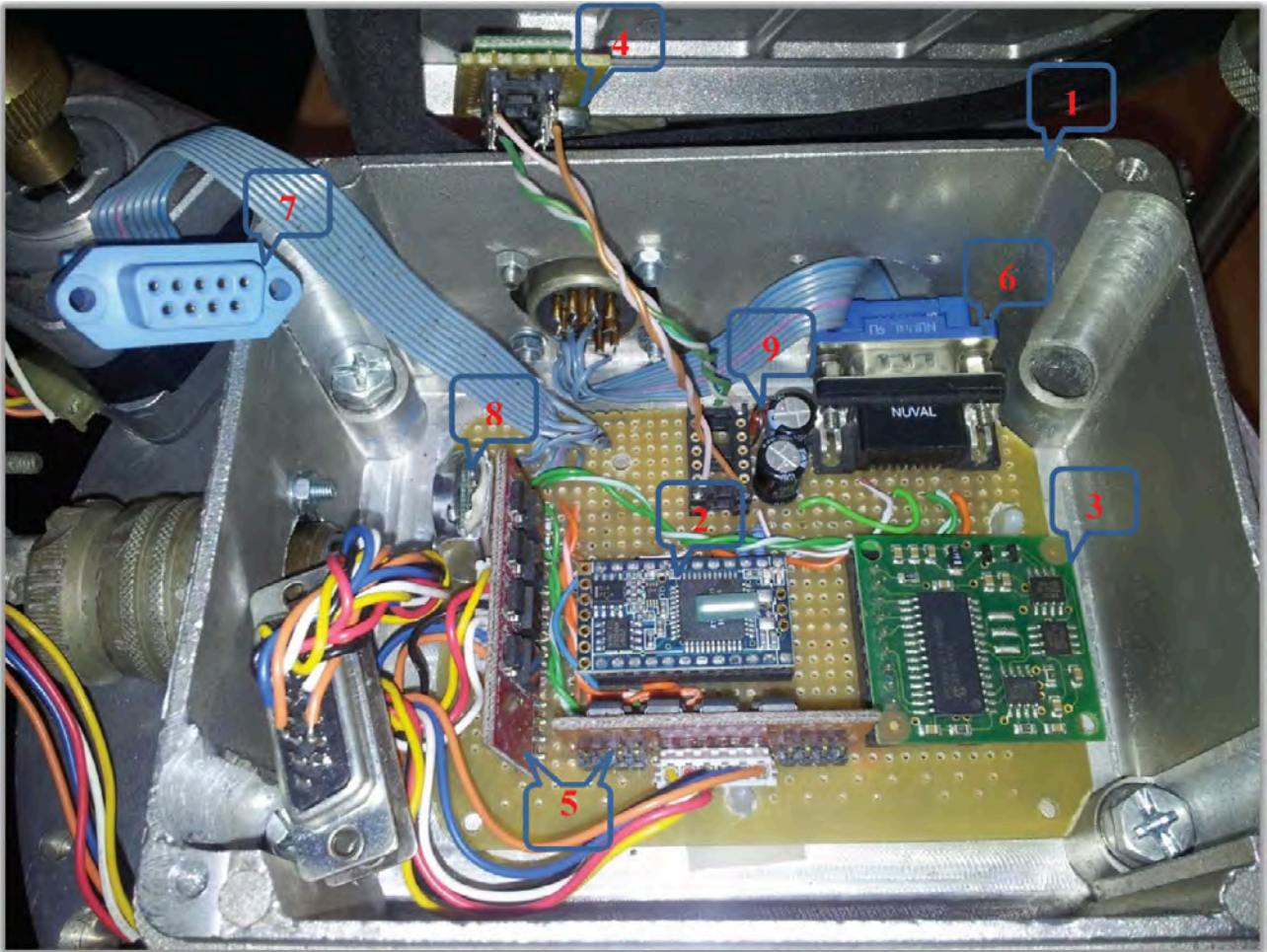


Figura 9. Foto del prototipo circuitale.

Un semplice limitatore di corrente, realizzato con un integrato LM317, il cui schema è stato prelevato dal suo datasheet (Figura 10), fornisce l'energia alla batteria al piombo per il mantenimento della carica, prelevandola in questo caso dal digitalizzatore *Nanometrics Trident*, avendo l'accortezza di non superare la soglia di sovraccarico dello stesso e contemporaneamente mantenendo un valore al di sopra del consumo medio del SAL. A tale scopo per il resistore R1 è stato scelto il valore di 5Ω. In questo modo la corrente $I_{out_{max}}$ che viene erogata dal digitalizzatore sarà limitata a:

$$I_{out_{max}} = V_{ref}/R = . / = \text{mA}$$

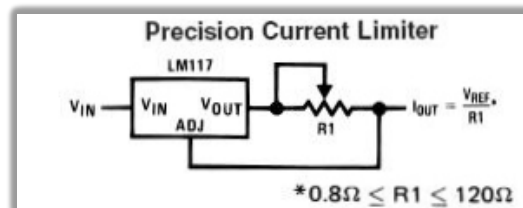


Figura 10. Schema del circuito di mantenimento carica della batteria 12V 1.3Ah.

Il blocco di alimentazione del sistema è costituito da una batteria al piombo da 12V 1.3Ah che, alloggiata in un contenitore in PVC a tenuta stagna (Figura 12-1) assieme al limitatore di corrente, alimenta i circuiti ed i motori attraverso un regolatore switching da 5V (Figura 9-8) della *DimensionEngineering*. I motori stepper (Figura 11-2) sono connessi ai drivers attraverso un connettore MIL (Figura 11-3).

Il radiocomando (Figura 12-2) è stato realizzato con un contenitore plastico in stile "console" sul cui frontalino è stato incassato il display e i due pulsanti. Al suo interno sono presenti anche il secondo radiomodem e la pila da 9V, ricaricabile attraverso l'apposito connettore jack posto lateralmente.

In appendice (Figura A11-A13) sono riportati gli schemi tecnici, realizzati in AutoCAD, che illustrano pianta e sezione del SAL adattato al *Nanometrics trillium 40*, forature della piastra circolare, i due perni filettati, i due piedini conici, il piedino fisso e lo schema di fresatura della piastra per l'alloggio della scatola del controller.

Il SAL può comunque essere applicato ad altri geofoni, apportando le dovute modifiche alla parte meccanica (dimensioni della piastra metallica e caratteristiche dei perni filettati) e variando semplicemente il settaggio relativo a *Selezione geofono* tra le *Impostazioni sistema* (vedi par. 3.6).



Figura 11. Particolare del SAL, assemblato sul geofono Nanometrics Trillium 40.



Figura 12. Il SAL, completo di contenitore per batteria e radio-modem (1) e radiocomando (2).

11. Conclusioni

Le possibili applicazioni di questo sistema sono molteplici, dal semplice autolivellamento in condizioni difficili di lavoro, all'utilizzo in "fondo pozzo" con la possibilità di verificare periodicamente il corretto livellamento dello geofono.

L'assorbimento di corrente medio del sistema al più si aggira su 110mA a 13V (con motori inattivi), che costituisce una piccola percentuale dell'assorbimento totale che caratterizza una tipica stazione di monitoraggio sismico e di conseguenza non ne compromette l'autonomia.

Una seconda versione aggiornata potrebbe prevedere la possibilità di disattivare tutti i dispositivi connessi al microcontrollore (accelerometro, bussola, driver motori) attraverso dei transistor interruttori, allo scopo di ottimizzare maggiormente i consumi. Attraverso indagini di mercato più recenti si potrebbero adottare un accelerometro più performante in termini di rapporto signal/noise e/o risoluzione, una bussola giroscopica piuttosto che magnetica, e infine dei motori stepper di dimensioni ridotte che garantiscano comunque la coppia minima per mantenere il corretto funzionamento.

Ringraziamenti

Si ringraziano il dott. Domenico Patanè per il fattivo incoraggiamento nella realizzazione del progetto ed il geom. Massimo Cantarero per la realizzazione dei disegni in AutoCAD.

Si ringrazia altresì il dott. Giovanni Romeo per gli utili suggerimenti nella fase di revisione del manoscritto.

Bibliografia

Nanometrics System Software Manuals., (2004). *Manuale software Nanometrics 2004.*
Nanometrics System Hardware Manual., (2004). *Manuale hardware Nanometrics 2004.*

Sitografia

<http://www.nanometrics.ca>, sito ufficiale della Nanometrics

<http://www.basicx.com>, sito ufficiale del produttore microcontrollori BasicX

<http://www.dimensionengineering.com/datasheets/DE-ACCM2G.pdf>, datasheet dell'accelerometro DE-ACCM2G

<http://www.sanyo-denki.com>, sito ufficiale del produttore del motore stepper SANYO DENKI 103-547-52300

<http://www.robot-italy.net/downloads/easy-step-1000.pdf>, datasheet del modulo di controllo per motori passo-passo ES1000

<http://www.robot-italy.net/downloads/er400trs.pdf>, datasheet del modulo ricetrasmittitore di segnale RS232 Easy-radio ER400TRS

<http://www.robot-electronics.co.uk/>, sito di riferimento per la bussola elettronica CMPS03 ed il display LCD Devantech

<http://www.dimensionengineering.com/products/de-sw050>, datasheet del regolatore switching da 5V

appendice

A1. Il microcontrollore *BX24P*

Il BX24P (Figura A1) è il più diffuso tra i microcontrollori della serie BasicX. In un package DIP24 di soli 34x17 mm è racchiuso un sistema completo a microcontrollore, programmabile in Basic. Il BX24P ha tutto quello che occorre per il suo funzionamento sulla propria schedina, non necessita di componenti esterni, convertitori seriali o programmatori. Si programma collegandolo direttamente alla porta seriale del PC. Il linguaggio di programmazione, Basic Express, praticamente identico al Visual Basic, ne rende molto semplice la programmazione.

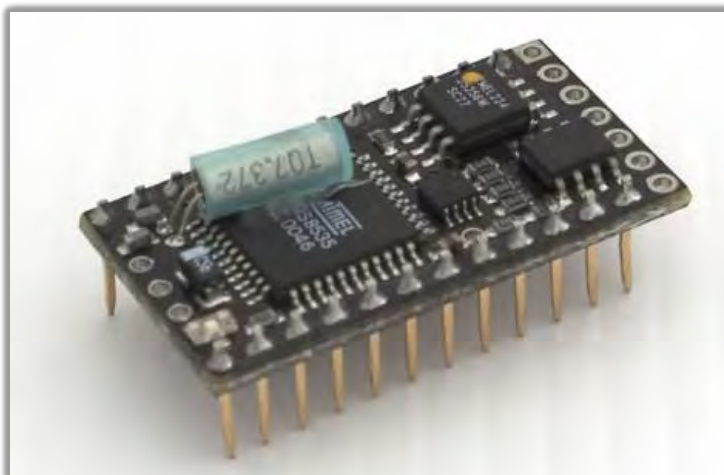


Figura A1. Il microcontrollore BasicX BX24P.

La dotazione hardware di questo chip è molto ampia: Real Time Clock incorporato, 8 porte ADC a 10bit, 2 porte seriali, 2 PWM hardware, interrupt, porta SPI e I2C, convertitore RS232, regolatore di tensione. Le caratteristiche hardware e software, riassunte in tabella A1, rendono questo microcontrollore uno dei più potenti e semplici attualmente in commercio.

Tabella A1. Caratteristiche del microcontrollore BasicX BX24P.

BasicX-24 - Specifiche tecniche	
Velocità	83,000 istruzioni al secondo
EEPROM	32K bytes (Programma utente e Dati)
Max lungh. Programma	8000+ linee di linguaggio Basic
RAM	400 bytes
Porte I/O disponibili	21 (16 standard + 2 seriali + 3 con accesso al di fuori dei piedini DIP standard)
Ingressi Analogici (ADCs)	8 (8 delle 16 porte standard I/O possono individualmente funzionare come porte standard digitali oppure come ADC a 10bit)
Freq. di campionamento ADC	6.000 /s max
Velocità della seriale I/O	1200 - 460.8K Baud
Tensione operativa	4.8/15.0 VDC
Temperatura operativa	0°C - +70°C

Corrente necessaria	20mA + il carico sulle porte I/O
Calcoli in Virgola Mobile	Si
Multitasking	Si
Orologio interno	Si
Interfaccia SPI	Si
Interfaccia di programmazione	Seriale ad alta velocità o parallela.
Package	24 pin DIP
Segnalazioni	2 LED rosso e verde on board programmabili

A2. L'accelerometro *DE-ACCM2G*

Il modulo DE-ACCM2G (Figura A2) è un accelerometro a 2 assi in grado di misurare fino a 2g di accelerazione, fornendo in uscita un segnale analogico proporzionale all'accelerazione. Le uscite sono bufferizzate e con impedenza ottimizzata per l'utilizzo con microcontrollori, senza necessità di componenti esterni. Le caratteristiche del dispositivo in questione sono riassunte in tabella A2.



Figura A2. Accelerometro DE-ACCM2G.

Tabella A2. Caratteristiche dell'accelerometro DE-ACCM2G.

DE-ACCM2G - Caratteristiche Tecniche	
Tensione Operativa	3...5V dc
Assi	Due X e Y
Portata	2g
Larghezza di Banda	500 Hz
Impedenza	Pilota accuratamente carichi fino a 3k Ω
Dimensioni	Standard DIP-14
Peso	0,9 grammi
Chip Core	Analog Devices ADXL322
Prestazioni	750mV/g di sensibilita' a 5V

A3. La bussola elettronica CMPS03

Il modulo CMPS03 (Figura A3) è una bussola elettronica in grado di fornire informazioni su spostamenti angolari non inferiori a 0.1° . L'assorbimento è molto basso ed il protocollo di comunicazione (I²C) si accoppia perfettamente al microcontrollore BasicX.

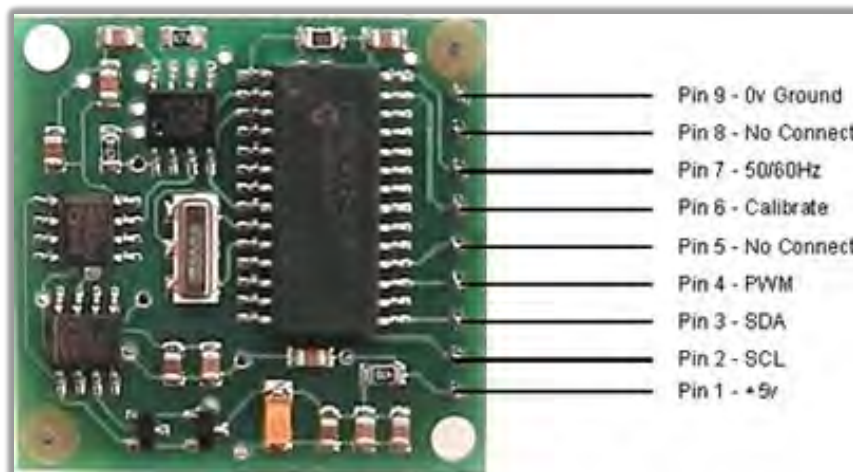


Figura A3. Bussola elettronica CMPS03.

Le caratteristiche del dispositivo in questione sono riassunte nella tabella A3.

Tabella A3. Caratteristiche tecniche CMPS03.

CMPS03 – Caratteristiche Tecniche	
Tensione Operativa	5V
Corrente Operativa Tipica	20mA
Risoluzione	0.1°
Accuratezza	$3-4^\circ$ circa, dopo la calibrazione
Uscita 1	Timing Pulse 1mS to 37mS in 0.1mS increments
Uscita 2	I2C Interface, 0-255 and 0-3599 SCL speed up to 1MHz
Dimensioni	32 x 35 mm

A4. I motori passo-passo

La scelta di utilizzo dei motori passo-passo per la nostra applicazione è dovuta ad una serie di caratteristiche interessanti di cui questi motori godono:

- È possibile realizzare azionamenti di precisione controllati da computer in catena aperta, cioè senza utilizzare sensori di posizione o di velocità.
- I circuiti possono essere relativamente semplici sia dal punto di vista realizzativo che progettuale e non è richiesta particolare potenza di calcolo al controllore.
- Hanno un'elevata robustezza meccanica ed elettrica, infatti non esistono contatti elettrici striscianti.
- È facile far compiere all'albero piccole rotazioni angolari arbitrarie in ambedue i versi e bloccarlo in una determinata posizione.
- La velocità di rotazione può essere molto bassa anche senza l'uso di riduttori meccanici.

Per il funzionamento del motore passo-passo è necessario applicare in opportuna sequenza e verso, impulsi di corrente attraverso l'uso di interruttori elettronici. La sequenza con cui la corrente è applicata alle fasi può essere di vari tipi diversi, ma quelli che noi prenderemo in considerazione sono due: Wavemode e Two phase-on.

Wavemode: è la configurazione di funzionamento più semplice ed è proprio quella da noi utilizzata nel SAL. La corrente è applicata ad una sola delle fasi alla volta, secondo la sequenza riportata in tabella A4.

Tabella A4. Modalità *Wavemode*.

Passo	Ph1	Ph3	Ph2	Ph4
1	I	0	0	0
2	0	I	0	0
3	0	0	I	0
4	0	0	0	I

In questa configurazione viene energizzata una sola fase alla volta e la distanza tra passi successivi è pari a quanto indicato sui dati di targa del motore. Per ottenere la rotazione del motore è necessario scorrere le righe della tabella, cambiando la fase in cui la corrente scorre e, una volta raggiunta l'ultima riga, il ciclo deve ripetersi dalla prima.

Two phase-on: la corrente è applicata contemporaneamente a due fasi. In questo modo il rotore è trattenuto in posizioni di equilibrio intermedie a quelle tipiche del funzionamento wavemode. La coppia disponibile è $\sqrt{2}$ volte maggiore di quella ottenuta con una sola fase attiva alla volta; le due forze applicate contemporaneamente possono essere infatti viste come tra loro perpendicolari. Il consumo di corrente e quindi il riscaldamento raddoppiano. Questo fatto potrebbe creare problemi in alcuni motori non adatti a questo tipo di pilotaggio.

Tabella A5. Modalità *Two phase-on*.

Passo	Ph1	Ph3	Ph2	Ph4
1	I	I	0	0
2	0	I	I	0
3	0	0	I	I
4	I	0	0	I

A4.1 Il motore SANYO-DENKI

I motori *SANYO-DENKI (103-547-52300)*, illustrati in Figura A4 nella versione monoalbero, sono dei motori passo-passo di elevata precisione ($1,8^{\circ} \pm 0,09^{\circ}$) e dal peso di soli 240g. La loro funzione, come già spiegato, è quella di mettere in rotazione i piedini del sismometro. A tale scopo uno dei due alberini di cui dispone ogni motore è stato munito di un asse filettato in acciaio inox la cui funzione è quella di avvitarsi perfettamente al foro filettato preesistente sul sismometro, permettendo così di variarne l'inclinazione. L'altro alberino invece è equipaggiato di un piedino a sezione conica, sempre in acciaio inox, che costituisce la parte a contatto con il terreno (vedi Figura A11-A12). I due alberini citati costituiscono in realtà le due estremità di un unico albero, in questo modo l'accoppiamento meccanico tra il sismometro ed il terreno resta invariato.



Figura A4. Motori SANYO DENKI nella versione monoalbero.

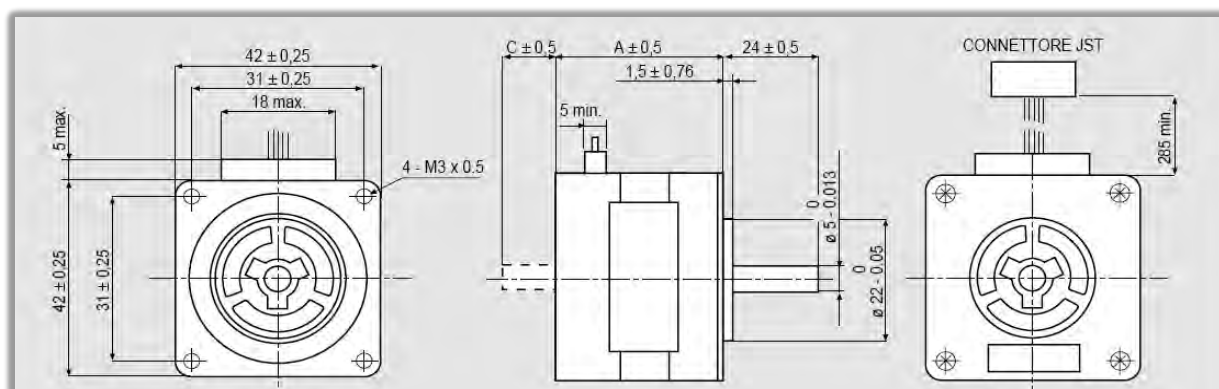


Figura A5. Dimensioni del motore SANYO DENKI 103-547-52300.

Le caratteristiche di questo motore, in termini di prestazioni quali assorbimento, coppia motrice, angolo di passo, dimensioni e peso (Tab. A6), hanno indirizzato verso la sua scelta.

Tabella A6. Caratteristiche del motore SANYO DENKI 103-547-52300.

ANGOLO DI PASSO - TOLLERANZA		$1,8^{\circ} \pm 0,09^{\circ}$
CORRENTE NOMINALE BIPOLARE	(Amp)	0,7 ^(*)
CORRENTE NOMINALE UNIPOLARE	(Amp)	1,0
RESISTENZA DI FASE A 25°	(Ohm)	3,15
INDUTTANZA DI FASE	(mH)	3
COPPIA DI TENUTA BIPOLARE	(Ncm)	25
COPPIA DI TENUTA UNIPOLARE	(Ncm)	19
MOMENTO D'INERZIA ROTORE	(Kg $m^2 \times 10^{-7}$)	43
ACCELERAZIONE TEORICA	(rad x sec. ⁻²)	59000
FORZA CONTRO ELETTRO MOTRICE	(V/Krpm)	14
PESO	(Kg)	0,24

A5. Il controller motori ES1000

Il modulo di controllo per motori passo-passo ES1000 (Figura A6) provvede a tutta la potenza necessaria al pilotaggio di un motore passo-passo tramite transistor Mosfet, fino a 3.0A per fase in ogni modalità supportata dal software dell'utente, ovvero *full*, *half*, *wave* o *micro step*. Tutte le connessioni sono

portate all'esterno tramite tre gruppi di pin con passo standard da 2.54mm. Le dimensioni di questo controller sono molto ridotte: 43x21 mm.

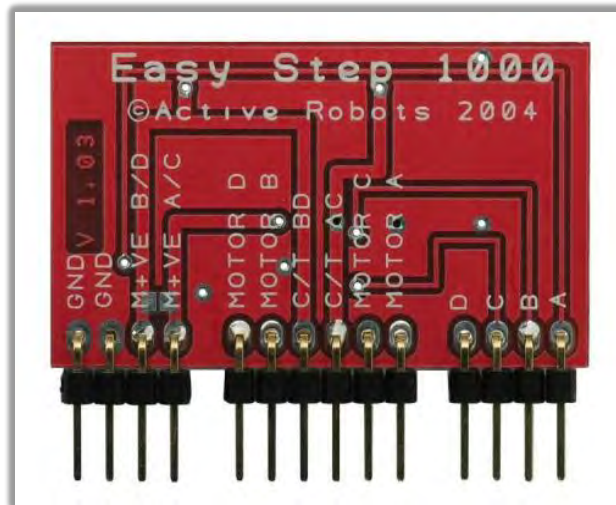


Figura A6. Il controller ES1000.

Il controller ha inoltre i diodi di clamping on board, che si rendono necessari alla salvaguardia del circuito. Infatti, quando si pilotano carichi induttivi, è sempre necessario inserire il cosiddetto "diodo di ricircolo", pena la repentina distruzione del transistor di potenza a causa delle tensioni elevate generate da motore. Il fenomeno può essere spiegato nel seguente modo: ciascun avvolgimento del motore passo-passo è sostanzialmente un induttore, che può essere assimilato ad un oggetto che tende a mantenere costante la corrente che in esso scorre. Quando un transistor si apre, la corrente istantaneamente dovrebbe andare a zero; l'induttore tende però ad impedire questa repentina diminuzione e quindi tende a far salire la tensione sul collettore del transistor. La tensione, spesso chiamata di "fly-back", arriva facilmente a centinaia di volt, danneggiando il transistor stesso. Per evitare questo fenomeno distruttivo viene appunto inserito in parallelo alla bobina del motore un diodo che fornisce alla corrente una via alternativa a quella del transistor nel momento in cui questo si apre (Figura A7).

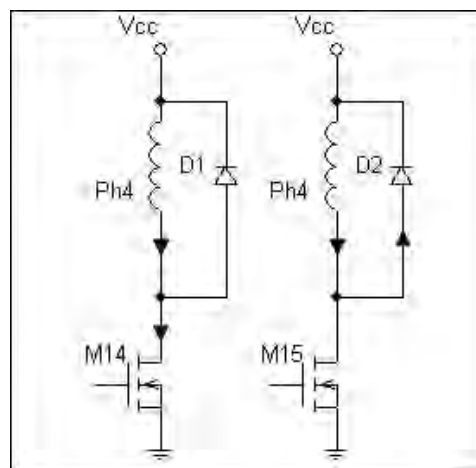


Figura A7. Collegamento dei diodi di clamping agli avvolgimenti del motore.

A6. Il modulo ricetrasmittitore *Easy-radio ER400TRS*

Il modulo ricetrasmittitore *Easy-radio ER400TRS* (Figura A8) è un modulo radio che effettua un collegamento wireless RS232 in half-duplex sulla banda UHF.

È stata installata una coppia di moduli transceiver ER400TRS. Ciò ha permesso l'interfacciamento tra l'utente ed il microcontrollore consentendone l'accesso alle varie funzioni messe a disposizione dal software di gestione del micro BasicX. Esso permette inoltre di sapere sempre e in tempo reale lo stato di funzionamento del sistema, senza necessità di collegamenti via cavo.

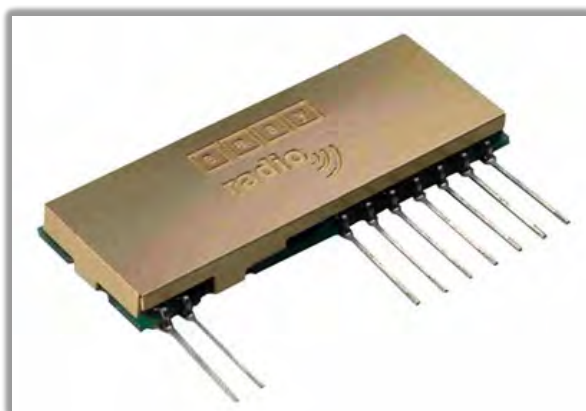


Figura A8. Il ricetrasmittitore Easy-radio ER400TRS.

Le caratteristiche tecniche del modulo ricetrasmittitore sono riportate di seguito:

- 10 frequenze selezionabili nella banda 433-4MHz.
- Potenza di uscita selezionabile fino a 10mW.
- Velocità di comunicazione selezionabile tra 4.8k & 76.8k bps.
- Tutte le impostazioni vengono fatte via software, non ci sono interruttori meccanici.
- Distanza massima di funzionamento: 250m in linea d'aria.
- Nessun software da scrivere.
- Basso assorbimento Rx 17.0mA; Tx 23mA.
- Conforme alle direttive ETS-300-220-3 & R&TTE.
- Il software incorporato, Easy Radio, gestisce tutte le funzioni di codifica/decodifica e la trasmissione di dati.
- Uscita RSSI per la misurazione del campo.
- Misure 37.5x14x 4mm.

Lo schema di utilizzo è rappresentato in Figura A9.

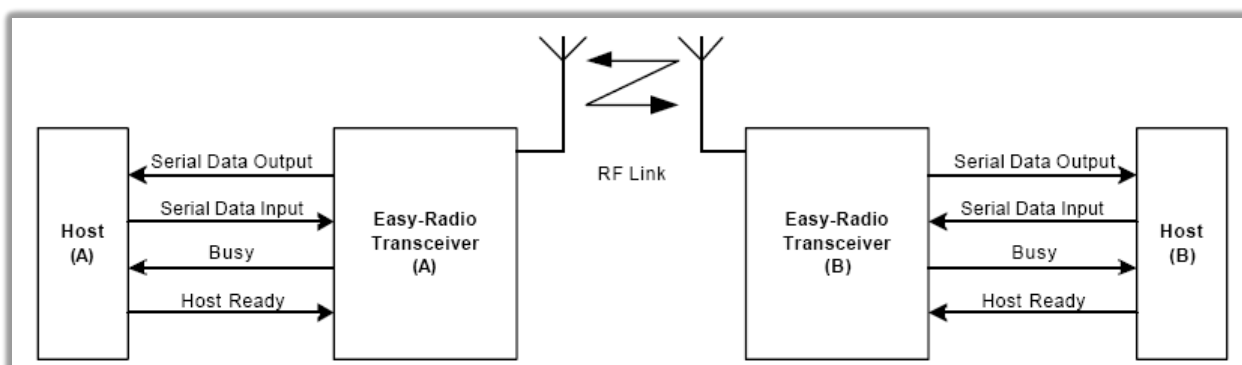


Figura A9. Schema applicativo di una coppia di ricetrasmittitori ER400TRS.

A7. Il Display *Devantech*

Il grande display retroilluminato da 20 caratteri per 4 linee *Devantech* (Figura A10), pilotabile via RS232 o con il protocollo I²C, semplifica notevolmente la programmazione dei microcontrollori, inoltre

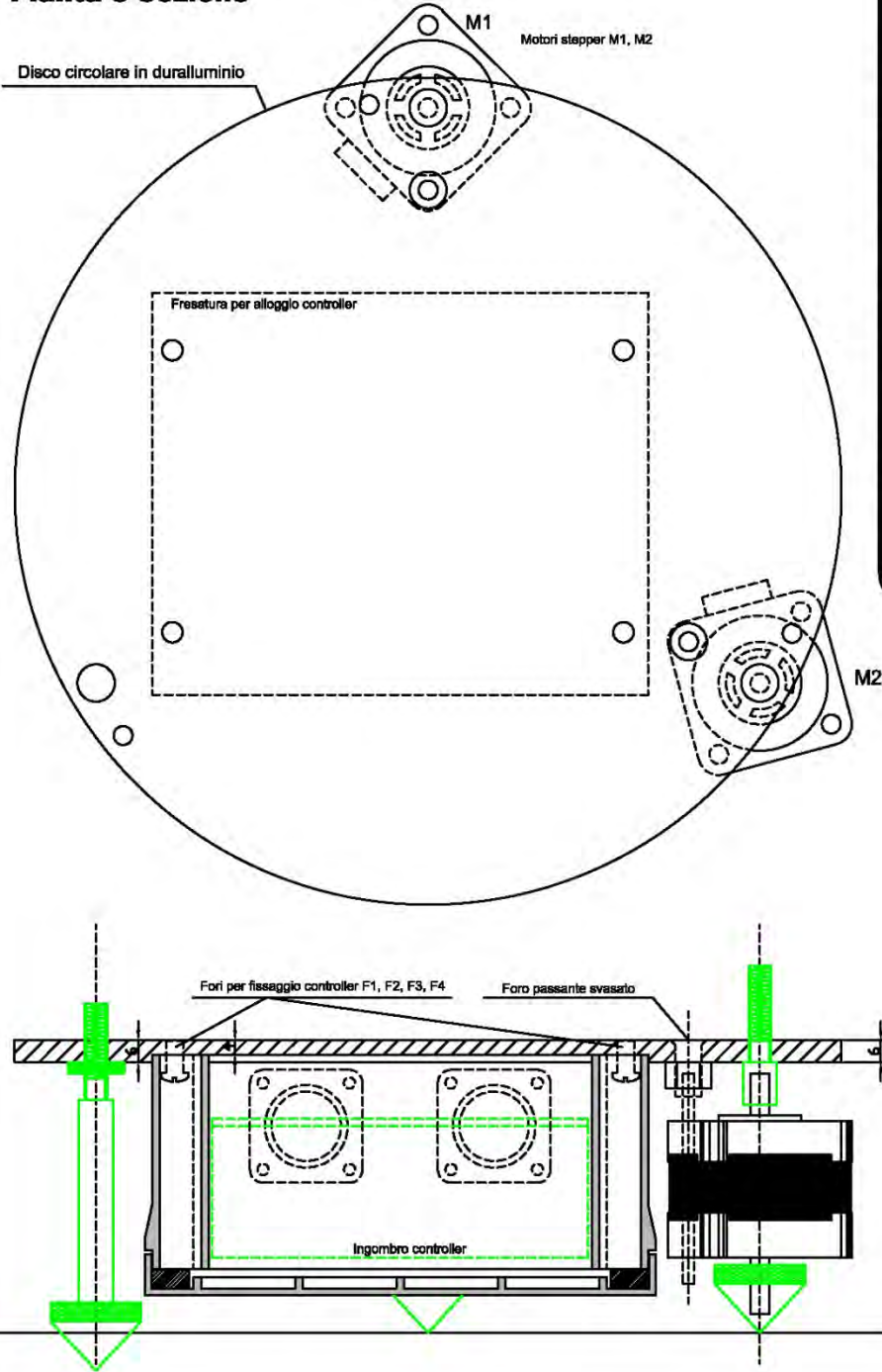
impiega soltanto 2 pin del micro contro gli 8/10 di un display parallelo. Gli stessi pin possono, tra l'altro, essere condivisi con altre periferiche seriali o I²C, creando in questo modo una catena di periferiche, ognuna rispondente ad uno specifico indirizzo, che possono lavorare tutte insieme, in modo bidirezionale, soltanto con due pin del microcontrollore. Con un adattatore di livello (*MAX232*) è possibile pilotarlo direttamente dal PC. Mediante un ponticello è possibile selezionare l'interfaccia di comunicazione seriale o I²C. E' anche disponibile una interfaccia predisposta al collegamento con un tastierino numerico da 4x3 tasti, in grado di decifrare i tasti premuti e leggerli tramite seriale o I²C con il microcontrollore o il PC. Proprio questa interfaccia ha permesso la realizzazione dei 2 tasti remoti attraverso i quali, come spiegato nel par. 3, è possibile avviare tutte le funzioni che il software di gestione mette a disposizione.



Figura A10. Display LCD 20X4 Devantech.

SAL - Sistema di autolivellamento

Pianta e Sezione

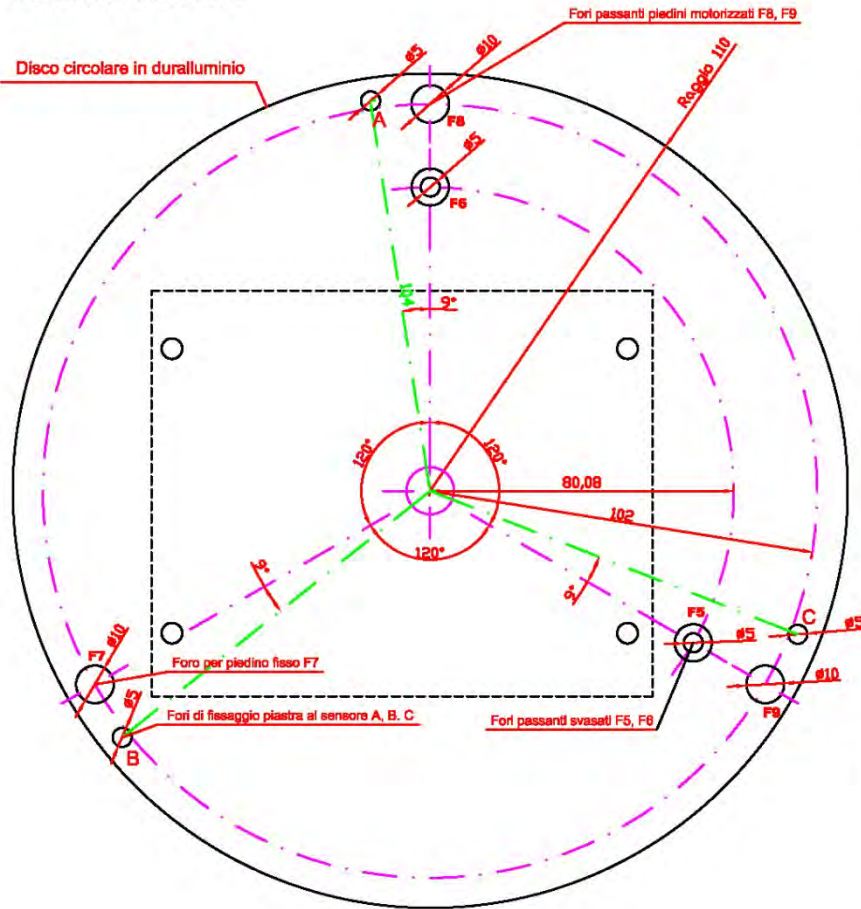


		
N.	Revisione	Data
Proprietà: DANILO CONTRAFATTO MASSIMO CANTARERO		
Progetto: SAL - Sistema di autolivellamento Pianta e sezione		
Progetto	SAL	Page
Data	20131105	01
Scale		

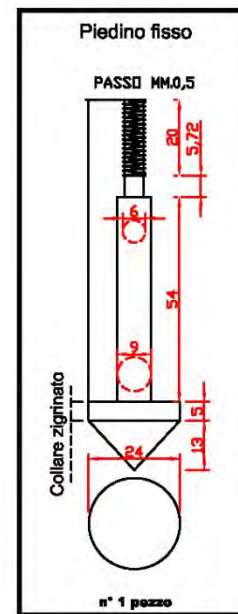
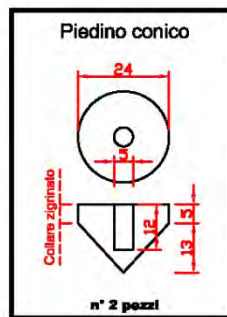
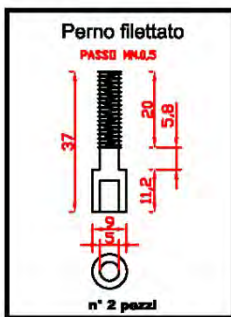
Figura A11. Pianta e sezione del Sistema di autolivellamento.

SAL - Sistema di autolivellamento

Schema forature



N.	Revisione	Data
Progetto: DANILO CONTRAFATTO MASSIMO CANTARERO		
Progetto: SAL - Sistema di autolivellamento Schema forature		
Progetto: SAL	Pagina 02	
Data: 20131105		
Data:		

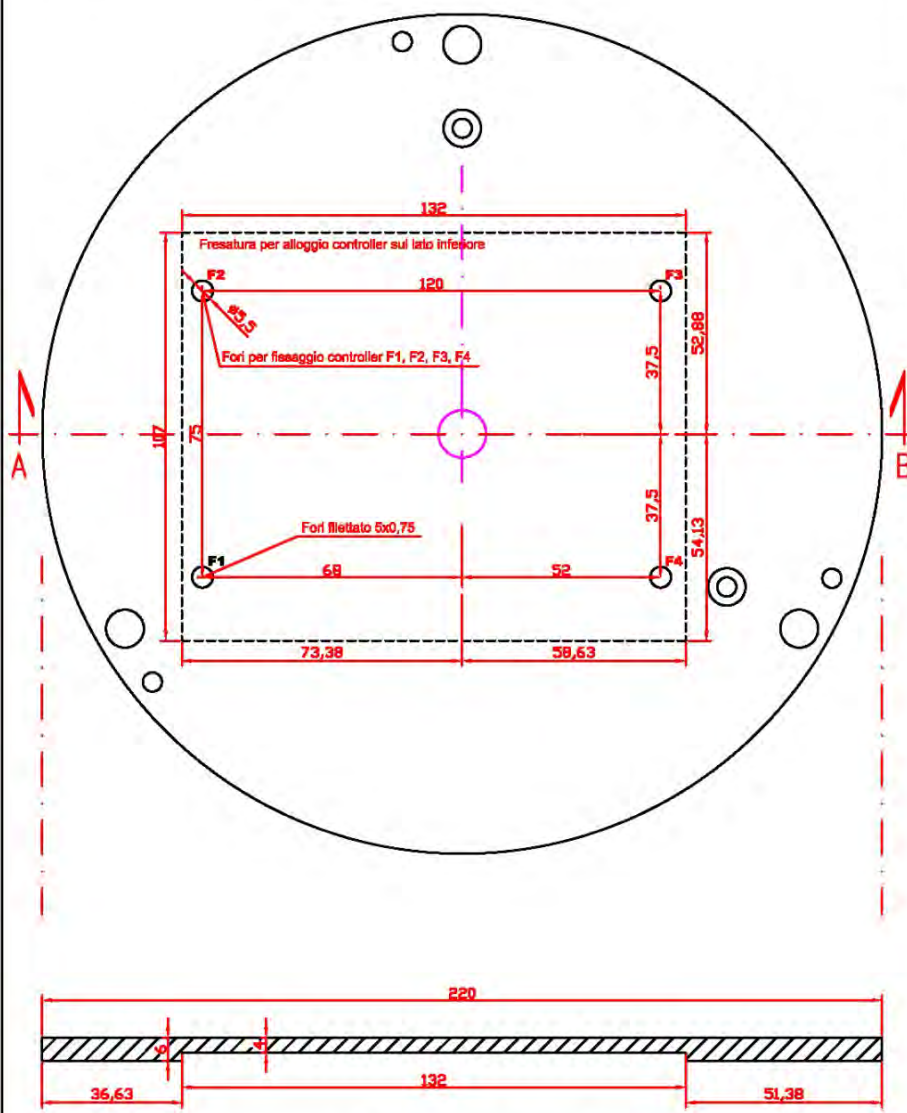


Le misure sono espresse in millimetri

Figura A12. Schema forature piastra circolare, perni filettati, piedini conici, piedino fisso.

SAL - Sistema di autolivellamento

Schema fresatura



Sezione A - B

N.	Revisione	Data
Progetto: DANILO CONTRAFATTO MASSIMO CANTARERO		
Progetto: SAL - Sistema di autolivellamento Schema fresatura		
Progetto	SAL	Foglio
Data	20131105	03
Scale		

Le misure sono espresse in millimetri

Figura A13. Schema fresatura piastra circolare.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2014 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