



QUADERNI di GEOFISICA

Studio per l'individuazione di un sistema
di calibrazione per sensori sismici



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

175

Direttore Responsabile

Valeria DE PAOLA

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (luigi.cucci@ingv.it)
Raffaele AZZARO (raffaele.azzaro@ingv.it)
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)
Rosa Anna CORSARO (rosanna.corsaro@ingv.it)
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)
Mauro DI VITO (mauro.divito@ingv.it)
Marcello LIOTTA (marcello.liotta@ingv.it)
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)
Milena MORETTI (milena.moretti@ingv.it)
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)
Umberto SCIACCA (umberto.sciacca@ingv.it)
Alessandro SETTIMI (alessandro.settimi1@istruzione.it)
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)

Segreteria di Redazione

Francesca DI STEFANO - Coordinatore
Rossella CELI
Robert MIGLIAZZA
Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONI
Patrizia PANTANI
Tel. +39 06 51860068
redazione@ingv.it

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale
di Geofisica e Vulcanologia
Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI
Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

QUADERNI di GEOFISICA

Studio per l'individuazione di un sistema
di calibrazione per sensori sismici

*A study for the selection of a calibration system
for seismic sensors*

Antonio Costanza¹, Gioacchino Fertitta¹, Giuseppe D'Anna¹, William Yang¹, Francesco Lo Iacono²,
Giacomo Navarra², Domenico Patanè¹

¹ INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania - Osservatorio Etneo

² Università degli Studi di Enna "Kore", Facoltà di Ingegneria e Architettura

Accettato 14 ottobre 2021 | Accepted 14 October 2021

Come citare | How to cite A. Costanza, G. Fertitta, G. D'Anna, W. Yang, F. Lo Iacono, G. Navarra, D. Patanè, (2022). Studio per l'individuazione di un sistema di calibrazione per sensori sismici. Quad. Geofis., 175: 1-38, <https://doi.org/10.13127/qdg/175>

In copertina Sensore sulla tavola vibrante verticale SE 13 | Sensor to the SE 13 vertical vibrating exciter

INDICE

Riassunto	7
Abstract	7
Introduzione	8
1. I sensori sismici ETL3D/5s ed ETL3D/5s-H	9
2. Specifiche della tavola vibrante	13
2.1 Velocità della vibrazione	13
2.2 Frequenza	14
2.3 Distorsione della velocità	15
2.4 Allineamento del sensore rispetto alla direzione del moto	16
2.5 Definizione delle specifiche richieste per la tavola vibrante	16
3. Studi preliminari di una tavola vibrante elettro-meccanica	17
3.1 Analisi cinematica del manovellismo di spinta	17
3.2 Il progetto di tavola vibrante elettro-meccanica	19
4. Sistemi di calibrazione elettrodinamici	21
4.1 Sistema di calibrazione del laboratorio LEDA dell'Università Kore	21
4.2 Sistema di calibrazione SPEKTRA CS18P	23
5. Test di sistemi di calibrazione elettrodinamici	25
5.1 Calibrazione presso il laboratorio LEDA	25
5.2 Taratura dell'ETL3D/5s-H attraverso l'utilizzo di un sistema di calibrazione primaria	29
6. Discussione e conclusioni	32
Ringraziamenti	34
Bibliografia	34

Riassunto

Questo lavoro si propone di identificare un sistema allo stato dell'arte da utilizzare per la calibrazione di sensori sismici. L'obiettivo è quello di acquisire un siffatto sistema nell'ambito del PON ARS01 00926 EWAS (*an Early Warning System for cultural heritage*), che mira a sviluppare nuove tecnologie per la tutela, la conservazione e la sicurezza del patrimonio culturale e prevede la creazione di un sistema di monitoraggio sismico di nuova concezione. Questo sistema sfrutterà i sensori ibridi ETL3D/5s-H, derivanti dall'integrazione di un accelerometro di precisione all'interno del velocimetro ETL3D/5s [Fertitta et al., 2020]. Il nuovo sistema di calibrazione, già acquisito e in corso di installazione, potrà essere utilizzato dai partner del progetto EWAS (tra cui l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e l'Università Kore di Enna), per calibrare i sensori ETL3D/5s-H, e da Enti esterni per calibrare o tarare altri sensori sismici, fornendo così un servizio utile alla comunità scientifica e di supporto alle attività industriali. Questo lavoro presenta il metodo seguito e le attività svolte per la definizione delle specifiche tecniche del sistema da acquisire. Si è quindi proceduto ad uno studio di fattibilità di una tavola vibrante elettromeccanica e alla verifica di due sistemi di calibrazione elettrodinamici. Uno dei sistemi elettrodinamici è il CS18P (*Calibration System for Seismic Sensor*) prodotto dalla compagnia tedesca SPEKTRA. Il CS18P comprende due tavole vibranti, una orizzontale e una verticale, che grazie alla sospensione fluidodinamica eliminano gli attriti radenti e volventi associati al movimento della parte mobile rispetto a quella fissa. Un sistema hardware e software monitora e controlla il moto in tempo reale, analizza i dati e processa automaticamente un insieme prestabilito di misure. Alla luce delle specifiche tecniche e dei risultati sperimentali, il CS18P rappresenta la soluzione ideale in relazione agli scopi del progetto EWAS anche in considerazione dei possibili impieghi futuri del sistema di calibrazione.

Abstract

This work sets out to identify a state-of-the-art system to be used for the calibration of seismic sensors. The aim is to acquire such a system within the framework of the PON ARS01 00926 EWAS (an Early Warning System for cultural heritage) project, which seeks to develop new technologies for the protection, conservation and safety of cultural heritage and envisages creating a newly developed seismic monitoring system. This system will exploit the ETL3D/5s-H hybrid sensors, resulting from the integration of a precision accelerometer within the ETL3D/5s velocimeter [Fertitta et al., 2020]. The new calibration system, already acquired and being installed, can be used by the EWAS project partners (including the National Institute of Geophysics and Volcanology and the Kore University of Enna), to calibrate the ETL3D/5s-H sensors, and by external organisations to calibrate or gauge other seismic sensors, thus providing a useful service to the scientific community and supporting industrial activities. This paper presents the method used and the activities undertaken to define the technical specifications of the calibration system. A feasibility study of an electromechanical vibrating table and the testing of two electrodynamic calibration systems were carried out. One of the electrodynamic systems is the CS18P (Calibration System for Seismic Sensors) produced by the German firm SPEKTRA. The CS18P comprises two vibrating tables, one horizontal and one vertical, which, thanks to their fluid-dynamic suspension, eliminate the sliding and rolling friction associated with the movement of the moving part with respect to the fixed part. A hardware and software system monitors and controls the motion in real time, analyses the data and automatically processes a predefined set of measurements

In the light of the technical specifications and experimental results, the CS18P represents the ideal solution for the aims of the EWAS project and also in view of the possible future uses of the calibration system.

Keywords Calibrazione sensori sismici; Tavola vibrante; Sismometro | Seismic sensors calibration; Vibrating exciter; Seismometer.

Introduzione

I termini calibrazione e taratura sono entrati nel linguaggio quotidiano e vengono spesso usati come sinonimi. In campo scientifico però è necessario tenere presente le definizioni esatte di queste due parole. Si definisce calibrazione il procedimento di verifica e correzione del funzionamento di un dispositivo, intervenendo sulla relazione ingresso/uscita per migliorarne le prestazioni. Questa operazione consente di determinare la funzione di trasferimento (in ampiezza e fase) dello strumento. Con la taratura si effettua, invece, la verifica dell'errore, cioè si determina la differenza tra il valore letto dallo strumento ed il valore noto del campione preso come riferimento. Il sistema di calibrazione e taratura degli strumenti è parte integrante ed essenziale di ogni sistema di gestione qualità [Costanza et al., 2020a].

Un sensore sismico, in particolare, necessita sempre di una calibrazione iniziale per il settaggio dei suoi componenti e per la certificazione della funzione di trasferimento, ma anche di calibrazioni periodiche per correggere eventuali variazioni delle sue caratteristiche col passare del tempo. Sia le prime che le seconde, vengono spesso effettuate dalle stesse case costruttrici, fornendo, insieme al sensore, dei certificati di calibrazione. La calibrazione di un sensore sismico può avvenire per mezzo di stimoli meccanici e talvolta di segnali elettrici. Per comprendere in che modo i segnali elettrici possano sollecitare la risposta di un sensore, bisogna considerare che sia i velocimetri larga banda che i semplici geofoni sono sistemi elettromeccanici. Nei sensori larga banda, la corrente circolante in un avvolgimento di filo conduttore elettrico viene usata per esercitare una forza su un magnete connesso alla massa mobile del sensore stesso. Nei geofoni il moto relativo di un avvolgimento rispetto ad un magnete genera una corrente elettrica che può essere rilevata all'uscita del geofono. In entrambi i casi, è possibile esercitare una forza sulla massa mobile iniettando corrente in un avvolgimento. Sfruttando l'equivalenza della forza meccanica, derivante dal moto del suolo, e della forza elettromagnetica, generata dalla corrente elettrica, è possibile effettuare una calibrazione, a patto che sia noto il fattore di conversione da corrente elettrica a forza. Il metodo di calibrazione meccanico invece permette di ottenere una calibrazione assoluta, appunto perché non richiede la determinazione iniziale del fattore di conversione [Wielandt, 2011]. Tuttavia questo metodo presenta sfide tecnologiche ben più ardue del metodo elettronico perché bisogna imporre al sensore un moto accurato e ripetibile. Le macchine capaci di svolgere questo compito, chiamate tavole vibranti, funzionano con svariati cinematismi, diversi sistemi di forza motrice (meccanica, elettro-meccanica, elettro-magnetica), diverse tipologie di guida della parte mobile (a basso attrito meccanico, a basso attrito fluidodinamico) e soprattutto diversi gradi di accuratezza nella generazione del moto. Oltre ad una tavola vibrante, è indispensabile disporre di un sensore di riferimento, che permetta di misurare con accuratezza il moto della tavola. Se il sensore di riferimento è un interferometro laser, la calibrazione è detta primaria ed i requisiti tecnici e le procedure per ottenere una calibrazione di questo tipo sono descritti dalla norma [ISO 16063-11]. In alternativa, il sensore di riferimento può essere un accelerometro, precedentemente calibrato con un interferometro laser. La calibrazione ottenuta con l'accelerometro è detta secondaria e le norme di riferimento

relative a questo tipo di calibrazione sono la [ISO 16063-21] e la [ISO 16063-22]. La Figura 1 riassume le varie tecniche di calibrazione. La porzione superiore rappresenta il metodo elettronico, mentre la porzione inferiore rappresenta i sistemi basati sull'uso della tavola vibrante, che permettono di fare calibrazioni primarie e secondarie rispettivamente.

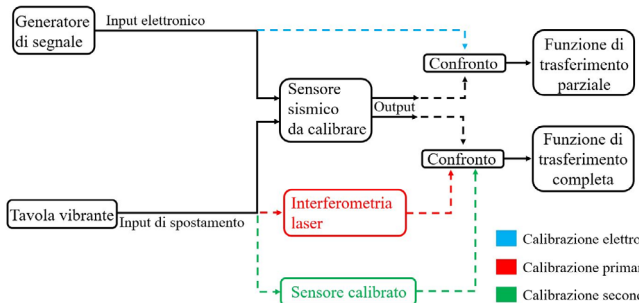


Figura 1 Diagramma di flusso dei vari tipi di calibrazione.

Figure 1 Flow chart of various calibration systems.

L'acquisizione di un sistema di calibrazione per sensori sismici è tra gli obiettivi del progetto PON ARS01 00926 EWAS (*an Early Warning System for cultural heritage*), che mira a sviluppare nuove tecnologie per la tutela, la conservazione e la sicurezza del patrimonio culturale, e per questi scopi prevede la creazione di una piattaforma di monitoraggio sismico di nuova concezione [Costanza et al., 2020b]. Questa piattaforma sfrutterà i sensori ibridi ETL3D/5s-H, derivanti dall'integrazione di un accelerometro di precisione all'interno dell'*housing* del velocimetro ETL3D/5s [Fertitta et al., 2020]. Nell'ambito del progetto EWAS, il nuovo sistema di calibrazione verrà utilizzato per calibrare i sensori ETL3D/5s-H, ma è possibile immaginare svariate possibilità di utilizzo anche al di fuori degli obiettivi del progetto. Ad esempio, il nuovo sistema consentirà di eseguire alcune operazioni di calibrazione e taratura all'interno dei laboratori INGV e darà un importante impulso alle attività di sviluppo di nuovi sensori sismici. Inoltre, potranno nascere nuove collaborazioni con Enti di ricerca e realtà industriali, nella forma di ricerca scientifica condivisa o fornitura di servizi. Dunque, i partner del progetto (tra cui l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e l'Università Kore di Enna) potranno ottenere vantaggi di natura scientifica ed economica.

In questo lavoro sarà descritto quanto svolto per la selezione del sistema di calibrazione, partendo dal sensore ETL3D/5s fino alla sua successiva evoluzione (ETL3D/5s-H), il cui sviluppo ha motivato l'acquisto del sistema e ha permesso di acquisire importanti esperienze nel campo della calibrazione. Sarà presentato il metodo usato per definire le specifiche tecniche del sistema di calibrazione e un tentativo di soddisfarle mediante lo studio di fattibilità di una tavola vibrante elettromeccanica. A seguire, saranno presentati i risultati ottenuti dall'utilizzo di due apparati di calibrazione basati su tavole elettrodinamiche, il primo installato presso il Laboratorio di Dinamica Sperimentale del Centro di Ricerca LEDA (*Laboratory of Earthquake Engineering and Dynamic Analysis*) dell'Università Kore di Enna, il secondo presso la sede centrale della società SPEKTRA nella città di Dresda in Germania. Sarà mostrato un confronto tra le specifiche richieste e le caratteristiche tecniche del sistema installato presso la SPEKTRA, chiamato CS18P (*Calibration System for Seismic Sensor*). Sulla base di questo confronto e dei dati sperimentali raccolti il CS18P risulterà la scelta finale.

1. I sensori sismici ETL3D/5s ed ETL3D/5s-H

Il gruppo di lavoro dell'OBS & Earth Lab di Gibilmanna (INGV), che dal 2020 fa parte dell'Unità Funzionale Pericolosità Sismica dell'Osservatorio Etneo dell'INGV, e del gruppo di lavoro dell'Osservatorio Sismico Urbano di Catania (OSUCT), a partire dal 2017 ha avviato lo sviluppo

e la produzione di un sensore sismico velocimetrico, denominato ETL3D/5s [Fertitta et al., 2020], la cui architettura usa il metodo di Lippmann per aumentare la larghezza di banda di una terna di geofoni [Romeo e Braun, 2007]. L'ETL3D/5s è stato successivamente modificato integrando nello stesso *housing* un accelerometro triassiale MEMS digitale ad elevata sensibilità e a basso rumore ($0.2 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$). Il nuovo sensore, denominato ETL3D/5s-H, è utilizzato nei nodi dell'Osservatorio Sismico Urbano di Catania (OSUCT) [Costanza et al., 2020b; Patanè et al., 2020], nell'ambito del progetto EWAS. L'accoppiata di un velocimetro con un accelerometro MEMS garantisce una dinamica molto più ampia rispetto a un normale sensore velocimetrico. Infatti, il velocimetro permette di rilevare terremoti di piccola magnitudo e di sopperire alla più elevata rumorosità dei MEMS nel campo di frequenze di interesse sismologico (0.1-30 Hz) mentre grazie all'accelerometro è possibile registrare anche dati di tipo *strong-motion* relativi a terremoti di intensità tale da portare il velocimetro in saturazione. Il sensore, nelle sue due varianti, è mostrato in Figura 2.

Figura 2 Sensore sismico ETL3D/5s (a sinistra) e ETL3D/5s-H (a destra) dotato di accelerometro MEMS.
Figure 2 ETL3D/5s seismic sensor (left) and ETL3D/5s-H (right) equipped with MEMS accelerometer.



Il sensore ibrido è stato realizzato in due versioni che si differenziano per il tipo di accelerometro impiegato. La prima versione, denominata ETL3D/5s-H1, usa l'accelerometro Analog Devices ADXL355 [Analog Devices, 2020]; la seconda versione invece, denominata ETL3D/5s-H2, usa il sensore Epson M-A352 [Epson, 2019] mostrato in Figura 3, che rispetto all'ADXL355 caratterizzato da un livello di *self-noise* pari a $25 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, ha un livello di *self-noise* notevolmente più basso, pari a $0.2 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Figura 3 Accelerometro digitale MEMS Epson M-A352.
Figure 3 MEMS Digital accelerometer Epson M-A352.



In Figura 4 è mostrato un confronto tra il *self-noise* di vari accelerometri e del velocimetro ETL3D/5s. Le curve derivano dai dati contenuti nei *datasheet* degli accelerometri. Per il velocimetro invece, il *self-noise* è stato calcolato in fase di progetto e verificato sperimentalmente in alcuni intervalli di frequenze [Fertitta et al., 2020].

La curva dell'Epson M-A352 è quella che si avvicina di più al velocimetro e in alcune porzioni dello spettro si colloca al di sotto del modello NHNM (*New High Noise Model*), ad indicare la capacità di questo sensore di rilevare anche eventi sismici deboli. Le buone prestazioni dell'accelerometro sono state confermate dai dati acquisiti dai primi nodi della rete OSUCT.

Dall'analisi dei dati emerge che l'accelerometro riesce effettivamente a monitorare onde sismiche relativamente deboli con accuratezza elevata. In Figura 5, per esempio, è possibile osservare le forme d'onda prodotte dall'accelerometro e dal velocimetro di un sensore ETL3D/5s-H2 in risposta ad un sisma di magnitudo 3.2, localizzato a 18 km di profondità, distante 28 km dal sensore.

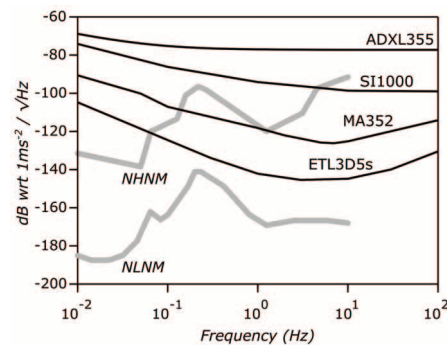


Figura 4 Self-noise di diversi accelerometri e del velocimetro ETL3D/5s a confronto. La curva più in alto è relativa all'accelerometro Analog Devices ADXL355, seguono in ordine il Colibrys SI1000 e l'Epson MA-352. Le curve relative agli accelerometri sono state ricavate dai dati presenti nei rispettivi datasheet. La curva del velocimetro è stata calcolata sulla base del progetto.

Figure 4 Comparison among a set of accelerometers and the ETL3D/5s velocity sensor, based on their self-noise levels. The curve on top belongs to an Analog Devices ADXL355 accelerometer, Colibrys SI1000 and the Epson MA-352 follow in descending order. All the curves reflect manufacturer specifications, except the velocity sensor noise, present in the respective datasheets. The velocimeter curve was calculated by the project.

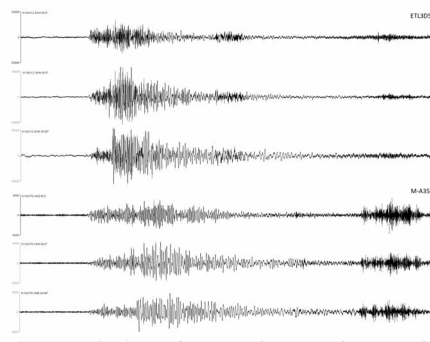


Figura 5 Evento sismico etneo delle ore 21:08 (UTC) del 16/01/2021 di magnitudo 3.2 localizzato a una profondità di ca. 18 km e distante 28 km dalla stazione registrante. I valori di PGA (Peak Ground Acceleration) misurati dall'M-A352 sono: 0.22 cm/sec² (componente Z), 0.31 cm/sec² (componente N) e 0.29 cm/sec² (componente E).

Figure 5 Mt. Etna earthquake occurred at 21:08 (UTC) on 16/01/2021, magnitude 3.2, located at a depth of approx. 18 km and 28 km from the recording station. The PGA (Peak Ground Acceleration) values measured by the M-A352 are: 0.22 cm/sec² (component Z), 0.31 cm/sec² (component N) and 0.29 cm/sec² (component E).

Per quanto riguarda le operazioni di calibrazione dell'ETL3D/5s-H2, queste riguardano esclusivamente la parte velocimetrica, dal momento che gli accelerometri MEMS vengono calibrati in fabbrica. Per gli accelerometri invece potrebbe avere senso provare ad effettuare delle tarature, per verificare la correttezza dei dati forniti dal costruttore. Tuttavia, bisogna tenere presente che i costruttori di accelerometri MEMS dichiarano tolleranze molto strette per i loro prodotti di punta. Per esempio, sul *datasheet* dell'M-A352 viene riportata una sensibilità di 16.66

counts/ μg con un errore massimo di sensibilità di ± 500 parti per milione (ppm), ovvero 0.05 %, un livello di precisione difficilmente ottenibile mediante taratura su tavola vibrante. Inoltre, sia l'M-A352 che l'ADXL355 possono essere tarati staticamente, sfruttando l'accelerazione gravitazionale come stimolo d'ingresso del valore noto [Zhang et al., 2014].

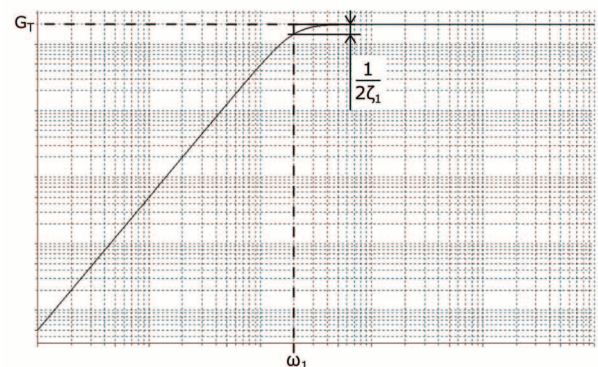
Di seguito, verrà descritta la funzione di trasferimento del sensore ETL3D/5s e verrà spiegato il motivo per cui il sensore necessita di una calibrazione iniziale.

Ciascun canale del sensore comprende un geofono e un amplificatore, quest'ultimo ha una resistenza d'ingresso negativa, secondo il metodo di Lippmann [Romeo e Braun, 2007]. La funzione di trasferimento nominale, rapporto tra tensione d'uscita e velocità del suolo, è della forma mostrata dall'equazione (1). Prima di descrivere ulteriormente la funzione, è bene chiarire che il circuito dell'amplificatore è leggermente diverso da quello ottenuto applicando il metodo di Lippmann, quindi anche la funzione di trasferimento non è nella forma classica [Fertitta et al., 2020].

$$\frac{V_{OUT}(s)}{U_{GROUND}(s)} = G_T \cdot \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta_1\omega_1 s + \omega_1^2} \cdot \frac{\omega_2^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_2 s + \omega_2^2} \quad (1)$$

La frazione più a destra nell'espressione (1) governa il funzionamento ad alta frequenza (> 100 Hz) e tende all'unità a bassa frequenza. La sua accuratezza è di minore importanza ai fini delle indagini sismologiche e i suoi parametri non vengono alterati dalla calibrazione; nel seguito questo termine verrà dunque trascurato. Con questa approssimazione, il grafico della funzione di trasferimento desiderata è mostrato in Figura 6. Il parametro ζ_1 determina il valore della funzione di trasferimento a $\omega = \omega_1$. Fissando ζ_1 al valore di 0.707 la funzione di trasferimento scende esattamente di 3 dB rispetto al valore asintotico G_T . I parametri della funzione di trasferimento sono elencati in Tabella 1 insieme ai loro valori nominali.

Figura 6 Funzione di trasferimento del sensore ETL3D/5s
Figure 6 ETL3D/5s transfer function.



Parametro	Simbolo	Valore	Unità di misura
Sensibilità	G_T	360	V/(m/s)
Fattore di smorzamento	ζ_1	0.707	-
Frequenza di taglio	ω_1	$2\pi \cdot 0,2$	rad / s

Tabella 1 Parametri della funzione di trasferimento.
Table 1 Transfer function parameters.

A causa delle tolleranze del sensore e dell'amplificatore, il dispositivo reale avrà sensibilità, fattore di smorzamento e frequenza di taglio diversi da quelli nominali. I parametri del geofono

utilizzato nel sensore, SM-6 Coil B, sono elencati in Tabella 2 con le relative tolleranze. Come si può notare la frequenza naturale ha una tolleranza relativamente alta (maggiore del 10%). Dato che la massa mobile ha un valore molto preciso, questa tolleranza è da imputare alla membrana elastica. L'amplificatore contiene delle resistenze variabili e regolabili (*trimmer*), che consentono di far coincidere, con una certa approssimazione, la funzione di trasferimento reale con quella nominale. Questi aggiustamenti necessitano quindi di una calibrazione. La procedura di calibrazione, messa a punto per il sensore, richiede come primo passo la correzione della sensibilità. A tal fine, sarà necessario imporre, mediante una tavola vibrante, un moto armonico e confrontare l'uscita del sensore con quella di un sensore di riferimento. Al momento della calibrazione della sensibilità, il fattore di smorzamento e la frequenza di taglio non sono ancora regolati. Affinché la calibrazione sia indipendente da questi due parametri, nonché dalla frequenza di taglio superiore ω_2 che compare in equazione (1), è opportuno scegliere come frequenza di lavoro, un valore ω tale che risulti $\omega_1 \ll \omega \ll \omega_2$. Nell'intervallo di frequenze in cui questa condizione è soddisfatta, la funzione di trasferimento è praticamente costante e il suo valore è praticamente uguale a G_T . Un possibile valore di ω che soddisfi la disuguaglianza sopra è dato dalla media geometrica delle frequenze di taglio $\omega = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$, ottenuto considerando i valori nominali delle due frequenze. Su scala logaritmica la media geometrica delle frequenze di taglio si colloca esattamente al centro della banda passante. Intorno a questo punto, la funzione di trasferimento varia molto lentamente, dunque la precisione della frequenza di oscillazione non è critica, dal momento che piccoli scostamenti di frequenza si traducono in variazioni di ampiezza dell'uscita trascurabili.

Parametro	Simbolo	Valore	Unità di misura
Fattore di smorzamento	ζ_0	$0.56 \pm 5\%$	-
Frequenza naturale	f_n	4.5 ± 0.5	Hz
Resistenza dell'avvolgimento	R_C	$375 \pm 5\%$	Ω
Sensibilità	A	$28.8 \pm 5\%$	V/(m/s)
Massa mobile	C_{mass}	0.0111	kg
Escursione massima	D	4	mm
Distorsione ⁽¹⁾	THD_{GEO}	0.3	%
⁽¹⁾ Misurata con spostamento sinusoidale di frequenza 12 Hz e ampiezza 17.8 mm/s			

Tabella 2 Parametri del geofono SM-6 Coil B.

Table 2 SM-6 Coil B geophone parameters.

2. Specifiche della tavola vibrante

2.1 Velocità della vibrazione

Consideriamo una tavola vibrante in grado di produrre una sollecitazione sinusoidale a frequenza f_{CAL} e velocità di picco U_{CALIN} . Se f_{CAL} è circa al centro della banda passante dello strumento da calibrare, l'uscita in tensione dello strumento sarà in fase con la sollecitazione meccanica e la sua velocità sarà circa uguale al prodotto della velocità U_{CALIN} per la sensibilità del sensore G . Dunque, durante la calibrazione, G potrà essere ricavata dal rapporto tra la tensione d'uscita e la velocità dell'oscillazione meccanica.

$$G = \frac{V_{CALOUT}}{U_{CALIN}} \quad (2)$$

Assumendo che U_{CALIN} sia nota, sarà sufficiente misurare soltanto V_{CALOUT} . Per quanto riguarda la velocità da imprimere al sensore, valori troppo piccoli sono da scartare, perché il *self-noise* dello strumento peggiorerebbe la precisione della misura. Valori troppo grandi potrebbero portare le uscite dello strumento in saturazione, quindi fuori dal regime sinusoidale. Per il sensore ETL3D/5s, la velocità massima, o *clip-level*, è 12.5 mm/s (picco), quindi è ragionevole effettuare la misura a valori di poco inferiori, come ad esempio 5 mm/s.

Molti altri sensori sismici hanno *clip-level* simili o superiori a quello dell'ETL3D/5s. Per esempio, il sensore Nanometrics Trillium Compact ha un *clip level* di 26 mm/s fino a 10 Hz [Nanometrics]. Anche i sensori Lennartz della famiglia LE-xD Seismometer Family [Lennartz, 2016] possono essere tarati con velocità vicine a quella usata per l'ETL3D/5s. Per questi sensori, il produttore non specifica il *clip level*, ma dichiara valori di sensibilità compresi tra 400 e 1000 V/(m/s), a seconda del modello, e la massima tensione di uscita, pari a 6.5 o 7 V a seconda del modello. Il rapporto tra la tensione massima e la sensibilità non coincide necessariamente con il *clip level*, ma fornisce comunque dei valori indicativi. Per gli strumenti della famiglia LE-xD il rapporto è compreso tra 6.5 e 17.5 mm/s.

Alla luce di queste considerazioni, si è imposto che l'apparato di calibrazione deve essere in grado di generare una velocità variabile, compresa tra 2 e 50 mm/s, un intervallo che consentirà di tarare o calibrare innumerevoli modelli di sensori sismici.

2.2 Frequenza

Il campo utile di frequenza di oscillazione della tavola vibrante destinata a sensori sismici è funzione della tipologia stessa dei sensori sismici che si vogliono calibrare; ad esempio, i sensori a larga banda hanno una banda passante tipicamente compresa fra 120 s (0.0083 Hz) e 100 Hz e dunque sarebbe auspicabile avere la possibilità di effettuare la calibrazione nell'intervallo 0.001-200 Hz. Risulta però evidente che il problema principale, per le tavole vibranti destinate alla calibrazione di sensori sismici è quello di riuscire a ridurre la frequenza minima di esercizio. Infatti, a bassa frequenza (< 1 Hz), i fenomeni non lineari di attrito radente o volvente tra parte mobile e parte fissa, generano disturbi non più trascurabili rispetto alla grandezza che si vuole osservare (moto armonico). Questo problema viene affrontato dal punto di vista tecnologico provando a ridurre gli attriti. Dalle indagini di mercato effettuate si è visto che solo le tavole a sospensione fluidodinamica riescono a generare un segnale di spostamento accettabile fino a frequenze dell'ordine dei 0.1 Hz, mentre le tavole con guide alla traslazione ad attrito radente o volvente difficilmente ci riescono sotto i 0.5 Hz.

Esiste poi un fenomeno, diverso dall'attrito, che rende impossibile usare le tavole vibranti a frequenze molto basse (< 0.1 Hz). Questo fenomeno deriva dal fatto che il moto reale di una tavola vibrante non è puramente traslazionale, ma risulta sovrapposto a microscopici moti rotazionali sull'asse verticale e sui due assi orizzontali. Mentre la rotazione attorno all'asse verticale non crea disallineamento tra asse sensore e asse gravitazionale, le rotazioni attorno agli altri due assi orizzontali invece sì, quindi il supporto che ospita il sensore non si mantiene sempre ortogonale all'accelerazione gravitazionale, ma la sua inclinazione (detta angolo di *tilt*) varia nel tempo in modo periodico. Questo permette al campo di gravità terrestre di interagire con le tre componenti del sensore. Purtroppo, il problema si manifesta con intensità tanto maggiore quanto più grande è il periodo del moto. Per esempio, per generare un moto armonico accurato, con periodo 10 s o maggiore, bisogna garantire variazioni dell'angolo di tilt nell'ordine dei micro radianti per ogni mm di corsa della tavola, un livello di precisione difficilmente

raggiungibile. Il problema dell'angolo di tilt è descritto in maggior dettaglio in [Wielandt, 2011]. Queste considerazioni confermano la scelta di imporre 0.2 Hz come limite inferiore della frequenza di esercizio per il sistema di calibrazione.

Il limite superiore tipico dei 200 Hz è in genere, invece, facilmente raggiungibile e risulta del tutto sufficiente per la calibrazione di gran parte di sensori sismici. Alla luce di queste constatazioni si è scelto di considerare ammissibile il campo di frequenza 0.2-200 Hz.

2.3 Distorsione della velocità

Il moto di una tavola vibrante è affetto da una serie di errori che inficiano la precisione della misura e limitano il campo di utilizzo di questi strumenti. Come è stato esposto nel paragrafo precedente, gli attriti e le variazioni dell'angolo di tilt limitano l'accuratezza delle tavole vibranti. Quindi, anche quando una tavola vibrante viene pilotata con un segnale armonico, non si otterrà mai un segnale armonico puro, ma piuttosto una somma di diverse componenti armoniche, ciascuna avente una frequenza multipla della frequenza fondamentale. Questo fenomeno, chiamato distorsione, influisce sulle misure in modo diverso a seconda degli algoritmi che si utilizzano per analizzare i dati. Consideriamo inizialmente il caso di una tavola vibrante priva di sistemi di controllo evoluti, la quale non sia in grado di processare in tempo reale né i dati provenienti dal riferimento né dal sensore che si vuole calibrare. In questo caso, sarà necessario misurare l'ampiezza delle due onde (riferimento e sensore da calibrare) in tempo reale mediante strumentazione aggiuntiva, come ad esempio un oscilloscopio digitale. In genere gli oscilloscopi digitali forniscono misure di tipo picco-picco o *Root Mean Square* (RMS). Tra le due, le misure RMS forniscono maggiore immunità ai disturbi e sarebbero quindi da preferire. Tuttavia, i valori RMS misurano la potenza media dei segnali, compresa la potenza associata alle armoniche superiori. Quindi misurare il valore RMS equivale a misurare l'ampiezza della prima armonica solo se le armoniche superiori sono di ampiezza trascurabile. La catena di equazioni (3-7) mette in relazione il THD (*Total Harmonic Distorsion*) di una forma d'onda con l'errore e che si commette quando si sostituisce l'ampiezza della prima armonica v_0 con il valore RMS v_{RMS} . Se si impone che e sia migliore dello 0.1%, il massimo THD ammissibile sarà 4.4%. Si noti che i moderni oscilloscopi digitali a 12 o 16 bit, possono misurare il valore RMS con precisione superiore allo 0.1%.

$$v_{RMS} = \sqrt{v_0^2 + v_1^2 + \dots + v_n^2 + \dots} \quad (3)$$

$$v_{RMS} = v_0 \sqrt{1 + THD^2} \quad (4)$$

$$v_{RMS} \cong v_0 \left(1 + \frac{TDH^2}{2} \right) \quad (5)$$

$$e = \frac{v_{RMS} - v_0}{v_0} \quad (6)$$

$$e \cong \frac{TDH^2}{2} \quad (7)$$

Per apparati di calibrazione dotati di sistemi di controllo evoluti, la distorsione potrebbe non essere rilevante. Per esempio, il sistema di controllo potrebbe impiegare algoritmi di tipo *sine-fitting* per

estrarre l'ampiezza della prima armonica in tempo reale. Questi potenti algoritmi, molti dei quali sono descritti nello standard IEEE 1057 [IEEE-STD-1057], determinano la forma d'onda armonica che meglio si sovrappone a una sequenza di campioni imposta. La sovrapposizione non sarà mai perfetta, ma in corrispondenza ad ogni campione si avrà un certo errore. La bontà della sovrapposizione si misura mediante la determinazione dell'errore quadratico medio, che è la media degli errori elevati al quadrato. Un sistema di calibrazione basato su algoritmi di questo tipo potrebbe garantire la precisione di calibrazione richiesta anche con valori di THD inferiori a quello specificato (4.4%).

2.4 Allineamento del sensore rispetto alla direzione del moto

Il posizionamento del sensore sulla tavola deve essere fatto con cura per evitare errori di allineamento degli assi del sensore rispetto alla direzione del moto. In realtà è opportuno che la tavola sia munita di sistemi meccanici di allineamento per ridurre la possibilità di errori. Un errore di allineamento tra la direzione del moto della tavola e l'asse di lavoro produce una riduzione del segnale d'uscita che potrebbe essere interpretata come un valore inferiore di sensibilità del sensore. Per i sensori triassiali, il corretto allineamento si può verificare monitorando l'ampiezza delle forme d'onda relative ai due assi ortogonali alla direzione del moto. Detto α l'angolo tra la direzione del moto e l'asse che si vuole calibrare, la velocità U_x "percepita" dal sensore sarà data dalla relazione (8). Il coseno in (8) potrebbe essere espanso in serie di Taylor – MacLaurin. Per angoli piccoli, lo sviluppo si potrebbe troncare al 2° ordine ottenendo la (9), che può essere anche scritta nella forma (10). Nella relazione (10) il termine a sinistra rappresenta l'errore di ampiezza dovuto al disallineamento, che risulta proporzionale ad α^2 . Si può imporre che l'errore di ampiezza sia inferiore a una certa quantità ϵ come riportato nella (11). Combinando la (11) con la (10) si ottiene la disuguaglianza (12) che permette di calcolare il massimo valore di α per un dato valore di ϵ . In base alla relazione (12), per avere un errore sull'ampiezza inferiore allo 0.1% bisogna garantire un errore di allineamento inferiore a 0.044 rad, ovvero 2.56°.

$$U_x = U_{CALIN} \cdot \cos(\alpha) \quad (8)$$

$$U_x \cong U_{CALIN} \cdot \left(1 + \frac{\alpha^2}{2}\right) \quad (9)$$

$$\frac{U_{CALIN} - U_x}{U_{CALIN}} \cong \frac{\alpha^2}{2} \quad (10)$$

$$\frac{U_{CALIN} - U_x}{U_{CALIN}} < \epsilon \quad (11)$$

$$\alpha < \sqrt{2\epsilon} \quad (12)$$

2.5 Definizione delle specifiche richieste per la tavola vibrante

La Tabella 3 riassume le specifiche richieste per la tavola vibrante. Tra queste specifiche è compreso anche il *payload*, ovvero la massima massa ospitabile. Il *payload* è fissato a 20 kg, un valore molto maggiore rispetto alla massa del ETL3D/5s (1.9 kg) al fine di consentire la calibrazione di altri sensori.

Parametro	Simbolo	Valore	Unità di misura
Forma d'onda	-	Sinusoidale	-
Velocità	U_{CALIN}	2-50	mm/s
Frequenza	f_{CAL}	0.2-200	Hz
Distorsione	THD	4.4	%
Disallineamento max	α	2.5	°
Payload	P	20	kg

Tabella 3 Specifiche richieste per la tavola vibrante.

Table 3 Requirements for the vibrating exciter.

3. Studi preliminari di una tavola vibrante elettro-meccanica

La ricerca del sistema di calibrazione, soprattutto nelle fasi iniziali, è stata indirizzata verso possibili soluzioni a basso costo. Tra le opzioni considerate, la costruzione di una tavola vibrante elettro-meccanica è sembrata una delle più promettenti. In una tavola di questo tipo, la parte mobile si muove grazie ad un manovellismo di spinta che trasforma il moto rotativo del motore elettrico in un moto traslatorio alternato.

Anche se l'idea di scegliere una tavola elettro-meccanica è stata successivamente abbandonata, ci sono vari aspetti di questa soluzione tecnica che meritano di essere menzionati. Innanzitutto, la presenza del manovellismo di spinta permette di presentare uno dei possibili modi in cui la distorsione può essere calcolata e controllata. Questo argomento verrà discusso nel prossimo paragrafo. In secondo luogo, il progetto presenta alcune interessanti soluzioni per ridurre gli attriti, come l'uso di balestre per sostenere il peso della parte mobile e l'impiego di parti in teflon per ridurre l'attrito radente.

3.1 Analisi cinematica del manovellismo di spinta

In questo paragrafo verrà presentata un'analisi cinematica allo scopo di valutare la possibilità di utilizzare il semplice manovellismo di spinta centrato per movimentare il carrello della tavola vibrante, con particolare riferimento alla problematica della distorsione della velocità.

In Figura 7 è rappresentato schematicamente un generico manovellismo di spinta disassato che ha la funzione di trasformare un moto rotatorio in un moto traslatorio alternato e viceversa. La Figura 7 e l'analisi cinematica che seguirà sono tratte da Monastero [2002]. La manovella, di raggio r_1 ruota attorno alla coppia rotoidale fissa O_1 a velocità angolare costante ω_1 ed è connessa ad una biella di lunghezza l attraverso una coppia rotoidale mobile A.

Il piede di biella B è vincolato a muoversi lungo l'asse X tramite un accoppiamento prismatico. La manovella forma un generico angolo ϑ_1 con la direzione orizzontale e la biella forma un generico angolo φ rispetto alla direzione della guida prismatica. Nel seguito verranno inoltre usati i seguenti rapporti adimensionali:

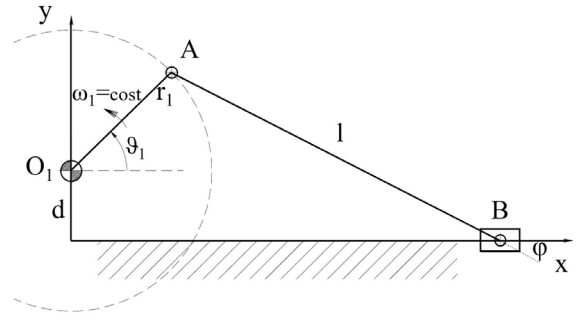
- obliquità della biella: $\lambda = r_1/l$
- eccentricità del manovellismo: $\tau = d/l$.

La posizione del piede di biella B lungo X, in funzione di ϑ_1 , è data dalla (13):

$$x_b = l \left[\lambda \cos \vartheta_1 + \sqrt{1 - (\tau + \lambda \sin \vartheta_1)^2} \right] \quad (13)$$

Figura 7 Schematizzazione di un manovellismo di spinta generico (disassato).

Figure 7 Scheme of a generic thrust crank (with offset).



Derivando due volte quest'espressione, si ottiene dapprima l'espressione della velocità del piede:

$$\frac{v_B}{\omega_1 r_1} = - \left[\sin \vartheta_1 + \frac{(\tau + \lambda \sin \vartheta_1) \cos \vartheta_1}{\sqrt{1 - (\tau + \lambda \sin \vartheta_1)^2}} \right] \quad (14)$$

con $\omega_1 = d\vartheta_1/dt$, e poi quella della sua accelerazione che, se ω_1 è costante, si scriverà:

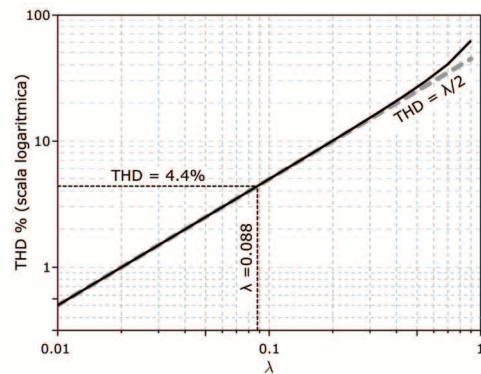
$$\frac{a_B}{\omega_1^2 r_1} = - \left[\cos \vartheta_1 + \left(\frac{\lambda \cos 2\vartheta_1 - \tau \sin \vartheta_1}{\sqrt{1 - (\tau + \lambda \sin \vartheta_1)^2}} + \frac{\lambda}{4} \frac{(2\tau \cos \vartheta_1 + \lambda \sin 2\vartheta_1)^2}{\sqrt{[1 - (\tau + \lambda \sin \vartheta_1)^2]^3}} \right) \right] \quad (15)$$

Per la nostra analisi è stato usato $\tau = 0$ (manovellismo centrato), poiché questa è la condizione di progetto scelta.

Il THD del manovellismo è stato calcolato per via numerica al variare di λ , utilizzando il software Scilab. Sono stati considerati 19 valori di λ , all'interno dell'intervallo compreso tra 0.01 e 0.9. I valori di THD sono stati usati per creare il grafico del THD in funzione di λ , riportato in Figura 8. Il grafico consente di identificare il massimo valore di λ che garantisce un THD migliore o uguale a quello richiesto, cioè 4.4%. Dall'esame del grafico si deduce che il valore di λ massimo è 0.088.

Figura 8 THD vs λ per manovellismo di spinta centrato.

Figure 8 THD vs λ for centered thrust crank.



Si noti che sullo stesso grafico è stata tracciata la retta $\text{THD} = \lambda/2$ e che questa retta coincide con il THD calcolato per bassi valori di λ . Questa circostanza può essere compresa alla luce delle equazioni 16 e 17. La 16 deriva dalla 14, imponendo la condizione di manovellismo centrato e sfruttando note proprietà trigonometriche. La 17 si ottiene trascurando, all'interno della radice quadrata, il termine proporzionale a λ^2 , assumendo che sia $\lambda^2 \ll 1$. Lo sviluppo armonico della (17) comprende due sole armoniche a frequenze angolari ω_1 e $2\omega_1$. Il THD di questa forma d'onda può essere calcolato facilmente, usando la definizione di THD (18), dove A_i è il

coefficiente della i -esima armonica. Il risultato finale, mostrato nella (19), descrive appunto la retta $THD = \lambda/2$ di Figura 8.

$$\frac{v_B}{\omega_1 r_1} = - \left[\sin \vartheta_1 + \frac{\lambda}{2} \frac{\sin(2\vartheta_1)}{\sqrt{1 - (\lambda \sin \vartheta_1)^2}} \right] \quad (16)$$

$$\frac{v_B}{\omega_1 r_1} \approx - \left[\sin \vartheta_1 + \frac{\lambda}{2} \sin(2\vartheta_1) \right] \quad (17)$$

$$THD = 100 \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2 + \dots}}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_n^2 + \dots}} \quad (18)$$

$$THD = \frac{\sqrt{\frac{\lambda^2}{4}}}{\sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{4}}} \approx \frac{\lambda}{2} \quad (19)$$

L'algoritmo per il calcolo della THD usato per creare la Figura 8, si basa sulla discretizzazione dell'equazione (16). Per ogni valore di λ , viene creato un vettore di valori di velocità. Vengono scelti in particolare 1000 punti con spaziatura tale da ottenere un intero periodo del segnale. Vengono quindi calcolate le prime 30 armoniche della serie di Fourier discreta e il THD viene calcolato con la (18) troncando a $n = 30$. La Figura 9 mostra le armoniche calcolate con il valore massimo di λ , ovvero 0.088.

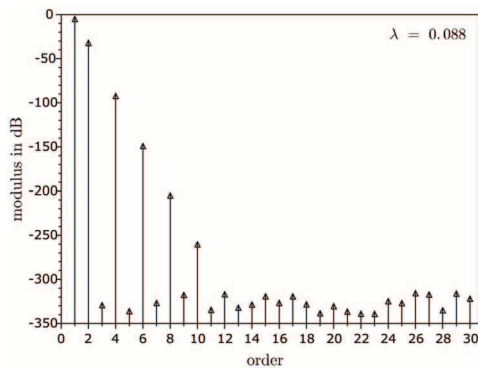


Figure 9 Coefficienti della serie di Fourier della velocità del piede di biella B, calcolata a $\lambda=0.088$.

Figure 9 Fourier series coefficients for the velocity of joint B, computed at $\lambda = 0.088$.

A seguito di questa analisi cinematica sono stati effettuati alcuni studi preliminari di una tavola vibrante elettro-meccanica che utilizza un manovellismo di spinta (con valori di λ adeguati) come cinematiso di collegamento tra motore elettrico e tavola porta-pezzo, configurabile in posizione orizzontale e verticale e idonea a testare sia il sensore ETL3D/5s (anche nella sua variante H), sia i geofoni del tipo utilizzati nello stesso sensore.

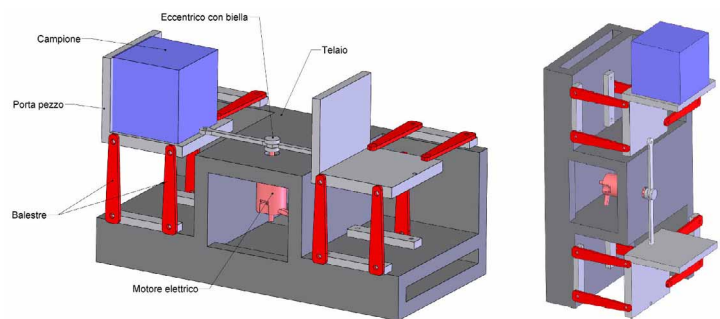
3.2 Il progetto di tavola vibrante elettro-meccanica

Uno studio preliminare di tavola vibrante elettro-meccanica è stato condotto, sulla base delle specifiche fornite da parte dell'OBS & Earth Lab di Gibilmanna, da Centrotecnica S.r.l., un'azienda specializzata nella meccanica di precisione e nella costruzione di tavole vibranti elettro-meccaniche. Lo studio, frutto di questa collaborazione, prevede un cinematiso biella-manovella centrato, con rapporto λ idoneo a soddisfare le esigenze di THD. Un motore elettrico aziona la manovella realizzata con un eccentrico e, tramite una biella, mette in movimento il componente portapezzo, su cui verrà montato il campione da testare. Il meccanismo prevede alcuni giunti a

basso attrito e meccanismi di azzeramento dei giochi per minimizzare la distorsione. Il moto del sensore è equilibrato da apposito sistema di bilanciatura. Ciò significa che per evitare movimenti di reazione, il progetto prevede due portapezzo identici, contrapposti nel verso del moto, in modo da equilibrare perfettamente il sistema. L'equilibratura potrà essere ottenuta montando due sensori identici sui due portapezzo oppure montando un sensore ed una opportuna massa equivalente sull'altro portapezzo. Il sistema di supporto previsto della tavola portapezzo è con balestre che lavorano a deformazione elastica nella direzione di vibrazione al fine di azzerare gli attriti che possono provocare distorsione. Il sistema proposto ha corsa fissa e frequenza variabile ed è previsto un pannello elettrico ed un sistema di controllo per visualizzare e controllare la frequenza di vibrazione. La frequenza è misurabile tramite conteggio delle rivoluzioni dell'albero del motore elettrico. All'occorrenza, il meccanismo eccentrico può essere sostituito con altri aventi eccentricità diversa e progettati per ottenere le corse desiderate. In Figura 10 si riporta il progetto proposto in configurazione orizzontale e verticale.

Figura 10 Studio preliminare di Centrotecnica S.r.l. in configurazione orizzontale (a sinistra) e verticale (a destra).

Figure 10 Preliminary study by Centrotecnica S.r.l. in horizontal (left) and vertical (right) configuration.

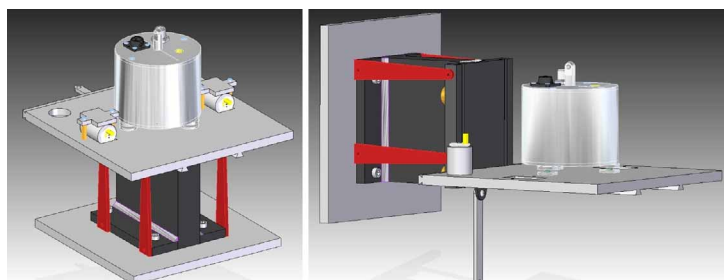


Tale configurazione progettuale iniziale è stata modificata dagli autori con ulteriori sistemi a basso attrito (contatto teflon-teflon nella guida prismatica al moto longitudinale) e con piastra portapezzo intercambiabile sia in configurazione orizzontale che verticale (Figura 11) per poter ospitare sia una diversa tipologia di sismometri, sia i singoli geofoni orizzontali e verticali.

Il motore elettrico, tipicamente, non può scendere fino alle basse frequenze richieste (fino a 0.2 Hz), dunque risulta indispensabile l'introduzione di un riduttore di velocità meccanico, subito a valle del motore elettrico, che garantisca comunque le altre richieste di progetto. Il riduttore di velocità causerebbe però un'eccessiva distorsione della velocità, indotta dall'inevitabile attrito presente nel riduttore (a rotismi ordinari, o epicicloidali, o a cinghia). Il progetto della tavola vibrante elettro-meccanica è stato dunque abbandonato per le problematiche relative alle distorsioni di velocità a bassa frequenza. Conseguentemente si è deciso di utilizzare tavole vibranti elettrodinamiche disponibili in commercio. I vantaggi delle tavole elettrodinamiche saranno descritti nel paragrafo successivo.

Figura 11 Piastra portapezzo intercambiabile, in configurazione orizzontale (a sinistra) e verticale (a destra).

Figure 11 Interchangeable workpiece plate, in horizontal (left) and vertical (right) configuration.



4. Sistemi di calibrazione elettrodinamici

In una tavola vibrante elettrodinamica, la trasmissione del moto tra parte fissa e parte oscillante avviene senza contatto, per induzione elettromagnetica. Risultano dunque assenti le problematiche relative all'attrito degli organi di trasmissione del moto tra parte fissa e parte oscillante. Inoltre, la frequenza e l'ampiezza di oscillazione vengono regolate semplicemente tramite la frequenza e l'intensità della corrente fatta circolare negli avvolgimenti presenti nella parte fissa, conferendo a queste macchine una grande versatilità. Nelle tavole elettrodinamiche con guida meccanica alla traslazione (come l'APS 420 trattata successivamente) permangono esclusivamente gli attriti relativi alla guida del moto traslatorio; questi attriti vengono spesso minimizzati con tecniche appropriate (interposizione di sfere, per passare dall'attrito radente a quello volvente, o di materiali a basso attrito radente, come il Teflon). Le tavole elettrodinamiche che usano la sospensione fluidodinamica per sostenere il peso del supporto mobile (come l'APS 129 e la SPEKTRA SE13, trattate successivamente) costituiscono un ulteriore passo avanti nella minimizzazione degli attriti, infatti l'assenza di guide alla traslazione, annulla qualsiasi possibilità di attrito radente o volvente tra la parte fissa e quella mobile (persiste soltanto l'attrito fluidodinamico dovuto alla viscosità del fluido-cuscinetto).

Da un'approfondita indagine di mercato è emerso che la SPEKTRA è tra le più importanti aziende al mondo nel settore della produzione di sistemi per la calibrazione primaria e secondaria. SPEKTRA ha recentemente acquisito la statunitense APS ELECTRO-SEIS®, compagnia specializzata nella costruzione di tavole vibranti elettrodinamiche. Le tavole vibranti APS e i sistemi di calibrazione SPEKTRA sono da considerare un riferimento a livello internazionale nel test dei sensori di velocità o accelerazione. Di seguito verranno descritti due sistemi di calibrazione realizzati da SPEKTRA con componenti APS.

4.1 Sistema di calibrazione del laboratorio LEDA dell'Università Kore

Il Laboratorio di Dinamica Sperimentale del Centro di Ricerca LEDA (*Laboratory of Earthquake Engineering and Dynamic Analysis*) dell'Università Kore di Enna è dotato di diverse tavole vibranti, di cui due di grandi dimensioni (4 metri per lato ciascuna) destinate a test su diversa scala [Fossetti et al., 2017; Lo Iacono et al., 2017]. Presso il laboratorio è presente anche una tavola vibrante elettrodinamica a lunga corsa che può essere usata per la verifica di sensori sismici, l'APS ELECTRO-SEIS® 420 (Figura 12), le cui specifiche principali sono riportate in Tabella 4.



Figura 12 Tavola vibrante APS 420 in configurazione orizzontale a sinistra e verticale a destra.

<https://www.apsdynamics.com/en/products/details/vibration-exciter/aps-420.html>

Figure 12 APS 420 vibrating table. Horizontal configuration on the left, vertical on the right.

<https://www.apsdynamics.com/en/products/details/vibration-exciter/aps-420.html>

In questo paragrafo, verrà data una descrizione dell'apparato sperimentale del centro LEDA, non solo perché questo comprende una tavola elettrodinamica APS, ma anche perché è stato proprio questo apparato che ha dato modo agli autori di calibrare molti sensori ETL3D/5s e allo stesso

tempo di acquisire esperienza nell'utilizzo di sistemi di calibrazione. La collaborazione tra l'INGV e l'Università Kore è avvenuta nell'ambito del progetto EWAS.

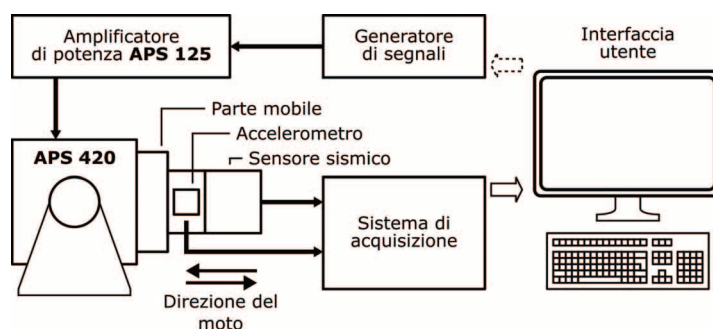
Parametro	Unità di misura	Valore
Forma massima	N	900
Velocità massima	mm/s	1000
Corsa massima	Hz	150
Dimensioni	mm	591 × 360 × 280
Peso totale	kg	140

Tabella 4 Specifiche della tavola vibrante APS 420.

Table 4 Specifications of the vibrating table APS 420.

La Figura 13 mostra uno schema del sistema basato sull'APS420. In alto al centro si ha il blocco generatore di segnali. Questo blocco rappresenta un sistema in grado di produrre segnali elettronici con diverse forme d'onda. Può trattarsi di uno strumento da banco o di un sistema configurato tramite computer; si noti in figura la freccia tratteggiata ad indicare che il collegamento con un computer è opzionale. Il segnale elettrico proveniente dal generatore viene convertito in un segnale di potenza dall'amplificatore APS 125 (in alto a sinistra) che mantiene pressoché inalterata la forma d'onda. L'amplificatore APS 125 pilota la tavola vibrante (a sinistra in Figura 13) imponendo ai suoi ingressi una tensione (o una corrente, a seconda della configurazione scelta) proporzionali al segnale elettronico proveniente dal generatore.

Figura 13 Diagramma del Sistema di calibrazione del laboratorio LEDA.
Figure 13 LEDA Lab calibration system diagram.



A differenza del generatore, l'amplificatore sarà in grado di fornire alla tavola tutta la potenza elettrica necessaria per mettere in moto il supporto mobile e il suo carico di lavoro. All'interno della tavola vibrante, un motore ad induzione elettromagnetica converte la tensione d'ingresso in una forza motrice che agisce sul supporto mobile. Il supporto mobile può ospitare vari sensori. In figura ne vengono mostrati due: un sismometro e un accelerometro. Il sismometro rappresenta il dispositivo da calibrare e l'accelerometro rappresenta un sensore usato come riferimento. L'accelerometro può essere sostituito con un sensore sismico, ma i sensori sismici sono più voluminosi e pesanti degli accelerometri quindi, prima di procedere a fare delle misure, bisogna verificare che la massa aggiuntiva non pregiudichi la stabilità della tavola, almeno in un ristretto campo di frequenze scelto per le misure. I segnali analogici o digitali, prodotti dai sensori, devono passare per un sistema di acquisizione (al centro in Figura 13) prima di raggiungere l'interfaccia utente. Il sistema d'acquisizione può inviare i dati grezzi verso l'interfaccia utente oppure svolgere delle analisi per facilitare la taratura. Così come il generatore di segnali, anche il sistema

di acquisizione non è un componente fisso, ma può essere scelto a seconda della disponibilità o delle funzionalità necessarie.

Anche la calibrazione del sensore ETL3D/5s è stata effettuata secondo lo schema di Figura 13. In questo caso, come generatore di segnali, viene utilizzato uno strumento da banco, per la precisione il generatore integrato nell'oscilloscopio Agilent MSOX2004A. Come sensore di riferimento, inizialmente è stato scelto un sensore Lennartz LE3d5s, che grazie al suo basso livello di *self-noise* risultava un candidato promettente per misurare con precisione la velocità della tavola.

Tuttavia l'uso dell'LE3d5s è risultato svantaggioso a causa dell'ingombro e della massa considerevole del sensore, come è emerso dai test che saranno descritti nei prossimi paragrafi. Per questo motivo, è stato messo a punto un nuovo schema di calibrazione che non richiede un secondo velocimetro, ma che sfrutta l'accelerometro integrato nei sensori ETL3D/5s-H. Lo schema richiede l'uso della stazione sismica OSU-AQ2 come sistema d'acquisizione (la stazione OSU-AQ2 è utilizzata dai nodi dell'infrastruttura OSUCT), in quanto questa stazione può acquisire contemporaneamente il velocimetro e l'accelerometro del sensore ETL3D/5s-H. Durante la calibrazione, la stazione calcola in tempo reale le trasformate di Fourier discreta (DFT, dall'inglese *Discrete Fourier Transform*) delle due serie temporali. Quando il moto della tavola è armonico, le due DFT mostrano un picco in corrispondenza alla frequenza fondamentale, seguito da picchi di intensità minore in corrispondenza alle armoniche superiori (distorsione). Le armoniche superiori vengono scartate, mentre le fondamentali vengono usate per calcolare il rapporto tra le sensibilità dei due strumenti. Il confronto delle due DFT non è immediato, perché i due sensori misurano grandezze diverse (velocità e accelerazione) con unità di misura diverse (m/s e g) e sensibilità nominali diverse. Il software tiene conto di questi aspetti applicando opportuni fattori di scala (per uniformare le unità di misura) e integrando il segnale dell'accelerometro (per passare da accelerazione a velocità).

4.2 Sistema di calibrazione SPEKTRA CS18P

Per i sensori sismici di alta precisione, SPEKTRA propone il sistema di calibrazione CS18P (*Calibration System for Seismic Sensor*) che sarà descritto di seguito. Il sistema CS18P, visibile in Figura 14, prevede l'utilizzo della tavola vibrante APS 129 per le componenti orizzontali (N ed E) e della tavola vibrante SPEKTRA SE13 per la componente verticale. Entrambe le tavole utilizzano un sistema di sospensione fluidodinamico del supporto mobile annullando, come già detto, qualsiasi possibilità di attrito radente o volvente tra la parte fissa e quella mobile. L'apparato di calibrazione comprende un sistema di controllo, un amplificatore e un sensore di riferimento. Il diagramma in Figura 15 mostra uno schema della sua architettura. Il sistema di controllo, costituito da un'unità hardware e da un software (denominato anch'esso CS18P), pilota lo shaker tramite l'amplificatore di potenza. Il sensore di riferimento, un interferometro laser o un accelerometro, misura con accuratezza la velocità o l'accelerazione del moto e invia la lettura al sistema di controllo, tramite un apposito sistema di acquisizione. Una delle funzioni principali del sistema di controllo è quella di pilotare lo *shaker* in modo tale che il moto della parte mobile sia il più possibile vicino a un moto armonico imposto. All'avvio, il moto può essere relativamente imperfetto, ma il sistema monitora costantemente la distorsione e produce degli aggiustamenti per portarla al di sotto della soglia impostata dall'operatore. A questo punto, il sistema di controllo acquisisce l'uscita del sensore da calibrare, ne misura l'ampiezza e ne calcola la sensibilità. Il calcolo della sensibilità tiene conto del fatto che il moto non è perfettamente armonico. I segnali provenienti dal sensore e dal riferimento vengono analizzati per calcolare l'armonica fondamentale e le armoniche superiori. L'ampiezza e la fase della prima armonica vengono infine utilizzate per calcolare il rapporto delle ampiezze e la differenza di fase, tra il sensore di riferimento

il sensore da calibrare (o tarare). Nel caso di calibrazione secondaria, prima di poter eseguire il confronto, il sistema CS18P dovrà in qualche modo integrare nel tempo il segnale proveniente dall'accelerometro, per trasformare le misure di accelerazione in misure di velocità.

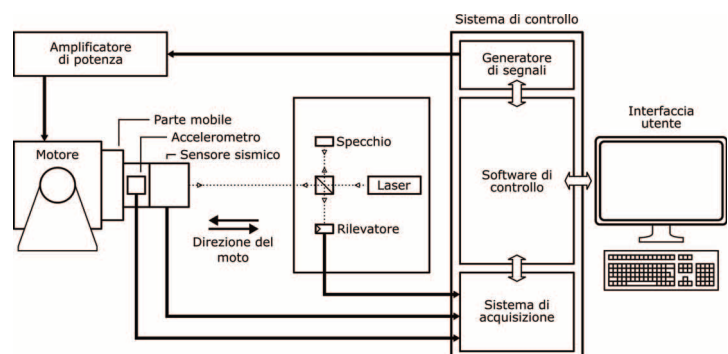


Figura 14 Componenti principali del CS18P, in alto a sinistra il sistema di controllo e gli amplificatori di potenza, in alto a destra la tavola vibrante verticale SE13, in basso la tavola vibrante orizzontale APS 129 (<https://www.spektra-dresden.com>).

Figure 14 Main components of the CS18P system, the control system and power amplifiers are in the upper left corner, the vertical vibrating table SE13 in the upper right corner, the horizontal vibrating table APS 129 at the bottom (<https://www.spektra-dresden.com>).

Figura 15 Diagramma del sistema di calibrazione CS18P.

Figure 15 CS18P calibration system diagram.



Quanto sin qui esposto dovrebbe servire a comprendere il funzionamento di massima del CS18P. Di seguito verranno fornite ulteriori informazioni tecniche sul sistema, cominciando dall'elenco delle sue parti. Il sistema è così composto:

- Tavola vibrante orizzontale APS 129
- Tavola vibrante verticale SE 13
- Sistema di controllo SRS-35
- Controllore della posizione zero APS0109 (per la configurazione orizzontale)
- Software CS18P con il sistema per la calibrazione primaria
- Amplificatore APS 125
- Accelerometro di riferimento standard BN-07 o BN-21 per la calibrazione secondaria, in accordo alla [ISO16063-21]
- Vibrometro laser digitale PLV-01 come riferimento per la calibrazione primaria in accordo alla [ISO 16063-11]
- Prisma per la calibrazione del vibrometro laser
- PC

Il sistema nasce per la calibrazione primaria di sismometri e geofoni in accordo alla [ISO 16063-11] e può operare nel campo 0.1-400 Hz, con una massa dei sensori di 50 kg in configurazione verticale e 30 kg in configurazione orizzontale. Il sistema è utilizzabile, qualora se ne abbia necessità, anche per la calibrazione secondaria in accordo alla [ISO16063-21]. La forma d'onda (sinusoidale, a dente di sega, rettangolare ecc.), facilmente impostabile dal sistema di controllo, ha una velocità di picco che varia da un minimo di 2 mm/s (da 0.1 Hz a 400 Hz) ad un massimo di 250 mm/s (da 4 Hz a 25 Hz). Grazie al sistema di sospensione fluidodinamico del carrello vibrante (presente in entrambe le tavole) e al sistema di controllo del moto in retroazione, il THD si attesta a valori ben al di sotto del THD massimo imposto a frequenze maggiori di 1 Hz. Questa caratteristica è stata verificata nel corso di un test svolto dai tecnici SPEKTRA in presenza di personale INGV, presso la sede centrale della compagnia. Inoltre, grazie agli algoritmi impiegati dal CS18P, è possibile calibrare anche in presenza di distorsione elevata. Anche questo aspetto risulterà evidente dai risultati. La presenza di una piastra forata per l'ancoraggio assicura, infine, un allineamento del sensore, rispetto alla direzione del moto, con tolleranza molto stretta (questo dato non viene riportato nel *datasheet*).

Il confronto tra le specifiche richieste ed i valori riscontrati nel sistema CS18P è riportato in tabella 5. Risulta evidente che la corrispondenza tra le specifiche richieste e quelle riscontrate nel sistema CS18P è pressoché perfetta.

Parametro	Unità di misura	Valore richiesto	Valore in CS18P
Forma d'onda	-	Sinusoidale	Sinusoidale ed altre
Velocità	mm/s	2-50	2-250
Frequenza	Hz	0.2-200	0.1-400
Distorsione	%	4.4	Non disponibile
Disallineamento max	°	2.5	Non disponibile
Payload	kg	20	50 in verticale; 30 in orizzontale

Tabella 5 Confronto tra le specifiche richieste ed i valori riscontrati nel sistema CS18P.

Table 5 Comparison between initial requirements and CS18P specifications.

5. Test di sistemi di calibrazione elettrodinamici

Nei seguenti paragrafi verranno presentati i risultati sperimentali ottenuti nel corso di varie operazioni di taratura presso due laboratori, il laboratorio LEDA dell'Università Kore e la sede di Dresda della società SPEKTRA. Questi risultati mettono in luce alcuni tra gli aspetti più critici dei sistemi di calibrazione, quali l'influenza dei fenomeni non lineari (attrito e angolo di tilt) e delle risonanze meccaniche. Riflettendo sulle cause di questi fenomeni, si può dimostrare che il sistema SPEKTRA CS18P rappresenta una soluzione robusta per la calibrazione di sensori sismici. In questo senso, le esperienze di laboratorio collezionate sono state fondamentali per gli obiettivi di questo studio e dunque vengono di seguito presentate.

5.1 Calibrazione presso il laboratorio LEDA

Nel maggio 2019, il sistema di calibrazione del laboratorio LEDA è stato utilizzato per effettuare una calibrazione secondaria di 8 sensori ETL3D/5s-H. La calibrazione è stata realizzata tramite confronto col sensore Lennartz LE-3d5s. Contemporaneamente sono stati vincolati sulla tavola

vibrante 3 sensori ETL3D/5s-H ed il sensore di riferimento (si veda la Figura 16). I 4 sensori sono stati vincolati alla tavola oscillante tramite un'opportuna piastra di interfaccia che ne consentiva il fissaggio tramite viti. I segnali di uscita dall'apparato sperimentale erano i seguenti: la tensione della componente velocimetrica dell'ETL3D/5s, la tensione di uscita dell'accelerometro MEMS montato sul sensore da calibrare ed infine la tensione di uscita del sensore Lennartz. I segnali velocimetrici dell'ETL3D/5s sono stati acquisiti tramite le stazioni sismiche portatili PGS1 [Costanza et al., 2020c], mentre per i segnali accelerometrici è stata utilizzata la stazione OSU-AQ2. La presenza contemporanea di tre sensori ETL3D/5s sulla tavola è servita a rendere le operazioni di calibrazione più rapide.

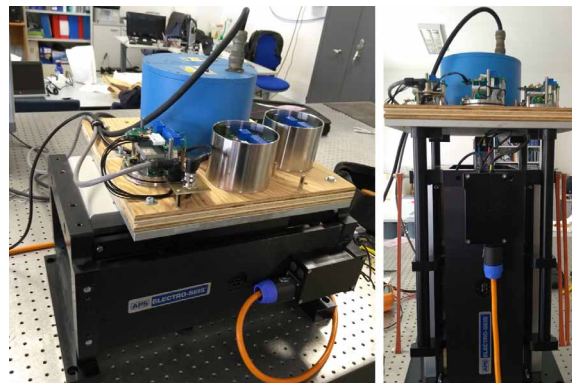
Il sensore di riferimento Lennartz, sottoposto a calibrazione presso il produttore prima del suo utilizzo, ha permesso di misurare con precisione la velocità effettiva della tavola vibrante. Nota la velocità della tavola, è stato possibile regolare il guadagno dei sensori ETL3D/5s-H al valore nominale di 360 V/(m/s). La regolazione ha richiesto per ogni componente un certo numero di iterazioni, secondo lo schema seguente:

- confronto tra l'ampiezza in volt dell'uscita e il valore atteso, quest'ultimo uguale al prodotto della velocità della tavola per la sensibilità nominale dell'ETL3D/5s-H;
- calcolo dell'errore relativo di sensibilità;
- le iterazioni terminano se l'errore relativo è inferiore all'1% altrimenti si passa al punto successivo;
- un operatore agisce su un apposito potenziometro all'interno del sensore ETL3D/5s-H in modo da modificare la sensibilità e compensare l'errore, quindi inizia una nuova iterazione.

La calibrazione della sensibilità richiede che la tavola si muova di moto sinusoidale a frequenza costante. La frequenza è stata impostata a 5.5 Hz che corrisponde al centro della banda passante del sensore ETL3D/5s-H (vedere capitolo 1 Funzione di trasferimento del sensore). La Figura 17 mostra le forme d'onda prodotte dal sensore di riferimento e da uno dei sensori calibrati (numero seriale SN12) lungo l'asse Est. I dati sono stati acquisiti al termine della calibrazione e le due curve si sovrappongono perfettamente.

Figura 16 Set-up sperimentale impiegato per la calibrazione presso il LEDA.

Figure 16 Experimental setup for the calibration at LEDA.



Sebbene la calibrazione del sensore avvenga a una frequenza fissa, ovvero 5.5 Hz, sono stati svolti test a frequenze differenti nel tentativo di verificare la funzione di trasferimento dei sensori al termine della calibrazione. I risultati non sono stati particolarmente incoraggianti, né a frequenze inferiori né a frequenze superiori di quella iniziale. Alle basse frequenze (< 1 Hz) infatti, si sono osservati livelli elevati di distorsione nelle forme d'onda di entrambi i sensori (ETL3D/5s-H e Lennartz LE-3d5s), come mostrato in Figura 18. Il fatto che i due sensori producano segnali simili indica che le distorsioni sono attribuibili al moto imperfetto della tavola. Il problema del *tilt* potrebbe fornire una possibile spiegazione, così come la presenza di fenomeni di attrito, che introdurrebbero effetti non lineari (*stick-slip* ad esempio). Le distorsioni a bassa

frequenza evidenziate ci hanno portato a ricercare un sistema di calibrazione più accurato. Per essere certi di escludere gli effetti non lineari introdotti dall'attrito radente o volvente, la ricerca si è focalizzata su tavole vibranti a sospensione fluidodinamica.

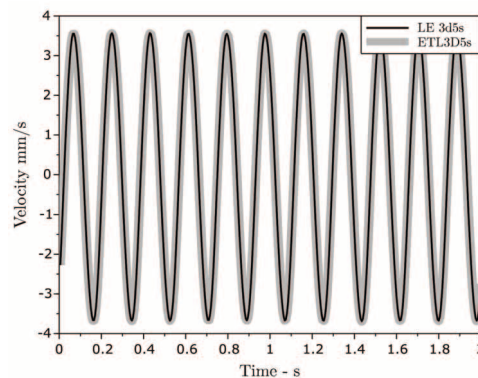


Figura 17 Forme d'onda prodotte dal sensore LE 3d5s e dall'ETL3D/5s-H (numero seriale SN12) lungo l'asse Est al termine della calibrazione. I dati sono stati scalati delle sensibilità nominali, 400 e 360Vs/m rispettivamente, per ottenere la velocità della tavola in m/s.

Figure 17 Waveforms produced by the LE 3d5s and by the ETL3D/5s-H (serial number SN12) sensor along the East axis at the end of the calibration. The data was scaled by the nominal sensitivities, 400 and 360Vs/m respectively, to obtain the table velocity in m/s.

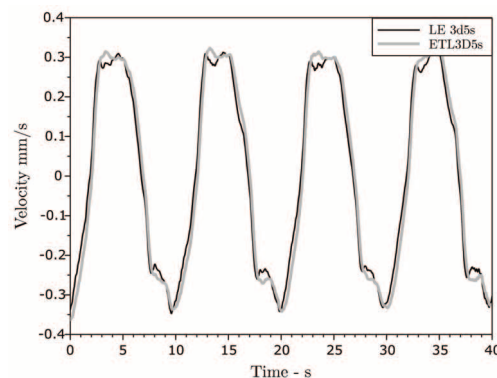


Figura 18 Segnali di uscita dai sensori sismici LE 3d5s ed ETL3D/5s, asse Est/Ovest, su tavola vibrante APS 420, frequenza di oscillazione 0.1 Hz. Ad entrambi i segnali sono stati applicati filtri passa-basso in *post processing* per eliminare il rumore ad alta frequenza. Ai dati del sensore ETL3D/5s è stato applicato, inoltre, un filtro passa-alto a 0.05 Hz, per simulare un filtro analogo a quello implementato, via hardware, all'interno del solo LE 3d5s.

Figure 18 Output signals from the LE 3d5s and ETL3D/5s seismic sensors, East/West axis, on APS 420 vibrating exciter, oscillation frequency 0.1 Hz. Low-pass filters were applied to both signals in *post processing* to eliminate the high frequency noise. A 0.05 Hz high-pass filter was also applied to the ETL3D/5s sensor data, to simulate a filter similar to that implemented, via hardware, inside the LE 3d5s only.

Al di sopra di 5.5 Hz è stato impossibile confrontare le uscite dei due velocimetri oltre un ristretto campo di frequenze, a causa delle vibrazioni naturali della struttura composta dalla tavola e dai quattro velocimetri. In presenza di risonanze, è impossibile confrontare sensori diversi perché la velocità di ogni sensore è funzione della sua posizione sul supporto mobile. Questa affermazione è stata verificata posizionando accelerometri di precisione in punti diversi del supporto mobile.

In Figura 19 vengono mostrati alcuni effetti delle risonanze meccaniche. I dati sono stati raccolti pilotando la tavola vibrante con un segnale sinusoidale a frequenza variabile, mentre l'ampiezza del segnale proveniente dal generatore era mantenuta costante. In queste condizioni, l'ampiezza della velocità della tavola, al variare della frequenza non è costante, ma dipende dalla funzione di trasferimento della tavola stessa, che, a sua volta, dipende dalle caratteristiche costruttive della tavola e della massa posizionata sulla parte mobile. In Figura 19, i grafici a sinistra e al centro mostrano la velocità rilevata durante il test, rispettivamente dal sensore LE 3D5s e da un sensore ETL3D/5s appena calibrato, lungo l'asse Z. I due grafici mostrano un minimo locale a $f_3 = 16$ Hz e un massimo locale picco positivo a $f_4 = 18$ Hz. Questi picchi, che indicano la presenza di un fenomeno di risonanza, scompaiono se il sensore Lennartz viene smontato dalla tavola, come mostra la curva tratteggiata nel grafico al centro. Il grafico a destra mostra lo scarto di velocità in termini percentuali tra i due sensori. Lo scarto è positivo se il sensore ETL3D/5s rileva una velocità maggiore del sensore di riferimento, negativo nel caso opposto. Come si può notare nell'intorno di 5.5 Hz la curva scende piuttosto lentamente, spostandosi nel complesso di pochi punti percentuali fino a 10 Hz, una condizione questa essenziale per eseguire la calibrazione. Tuttavia, a frequenze maggiori la variazione diventa più rapida, inoltre si osservano un minimo locale a $f_1 = 12.5$ Hz e un massimo locale a $f_2 = 13.5$ Hz, che indicano la presenza di un ulteriore fenomeno di risonanza. Questa risonanza viene sentita in misura maggiore dal sensore ETL3D/5s che dal sensore di riferimento, infatti nel grafico a sinistra non si nota traccia di massimi o minimi locali, mentre nel grafico al centro si possono osservare un minimo e un massimo, anche se appena evidenti, all'interno dell'area evidenziata con un'ellisse. Durante i test si è presa in considerazione la possibilità che la risonanza fosse intrinseca al sensore ETL3D/5s, quindi indipendente dal sistema di calibrazione. Tuttavia questa ipotesi è stata scartata perché la risonanza non si manifesta quando il sensore di riferimento viene rimosso dalla tavola (vedere curva tratteggiata nel grafico al centro), né quando il sensore viene calibrato con altri sistemi di calibrazione, come ha dimostrato il test presso la società SPEKTRA che sarà descritto più avanti.

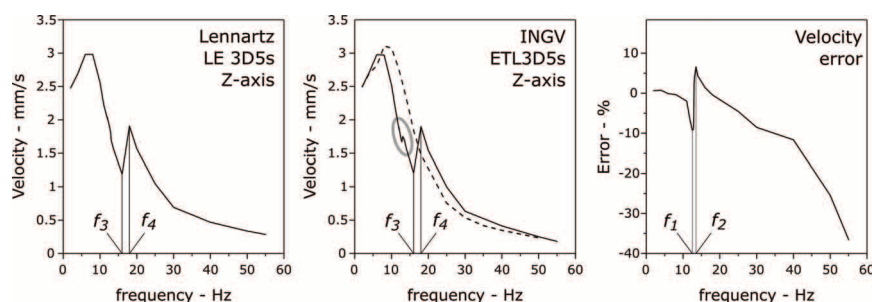


Figura 19 Effetti delle risonanze meccaniche con la tavola vibrante APS 420.
Figure 19 Effects of mechanical resonances with the APS 420 vibrating table.

Dal momento che lo scopo di questo studio è quello di selezionare un sistema di calibrazione, sarà opportuno precisare che la presenza di risonanze meccaniche non dovrebbe essere considerata un indice di scarsa qualità della tavola. Piuttosto, il dato sperimentale dimostra che il posizionamento, la massa e il numero di sensori sul supporto mobile non erano compatibili con misure ad alte frequenze (> 10 Hz). Questa conclusione è in linea con gli standard di calibrazione che prevedono, per la misura delle funzioni di trasferimento, di operare con un sensore alla volta. Tutti i dati sin qui presentati sono stati prodotti per mezzo di misure di ampiezza sui dati digitali. In altre parole, i dati che l'interfaccia utente riceve vengono visualizzati per mezzo di un software apposito (ad esempio Seisgram) e un operatore usa le funzionalità del software per stimare l'ampiezza dell'onda mostrata sullo schermo, dove per ampiezza si intende la differenza tra il

massimo e il minimo (con segno) di un'onda armonica (misura picco-picco). Tuttavia questo tipo di misura risente fortemente delle vibrazioni provenienti dall'ambiente del laboratorio e perfino dall'esterno. Il nuovo schema di calibrazione, basato sull'analisi dei segnali nel dominio della frequenza (vedere paragrafo 4.1 Sistema di Calibrazione del laboratorio LEDA) è molto più efficiente nel contrastare i disturbi dunque consente di eseguire le calibrazioni in modo più rapido e probabilmente più preciso. Fino a questo momento sono stati fatti solo dei test preliminari presso il LEDA, che però hanno fornito ottimi risultati. Inoltre, vista l'assenza del velocimetro di riferimento, nei prossimi test si proverà nuovamente a tracciare una funzione di trasferimento per valutare di quanto le prestazioni possano migliorare alle alte frequenze (> 10 Hz).

5.2 Taratura dell'ETL3D/5s-H attraverso l'utilizzo di un sistema di calibrazione primaria

Come riportato in precedenza, è stata effettuata una taratura di un sensore ETL3D/5s-H attraverso il sistema CS18P. In quella occasione, il sistema ha operato nella configurazione primaria, sfruttando l'interferometria laser per la misura della velocità. Il laser utilizzato è stato il Polytec CLV-2534. Le frequenze investigate sono state scelte in ordine crescente logaritmico (0.1, 0.2, 0.4...200 Hz) e la taratura è stata eseguita secondo la norma [ISO 16063-11]. Sia in configurazione orizzontale che verticale il sensore ETL3D-5s è stato vincolato alla tavola vibrante tramite staffe e viti che bloccavano la base di ancoraggio del sensore al carrello vibrante. Nelle Figure 20 e 21 viene illustrato il set-up nella configurazione orizzontale e verticale.

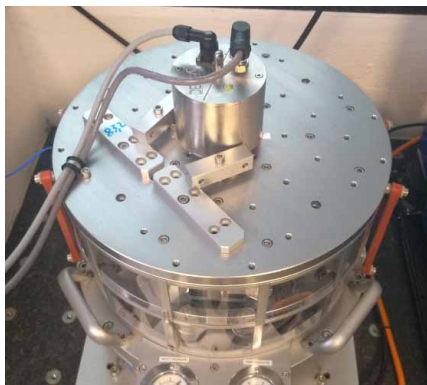


Figura 20 Sistema di vincolo del sensore sulla tavola vibrante verticale SE 13.

Figure 20 System used to constrain the sensor to the SE 13 vertical vibrating exciter.

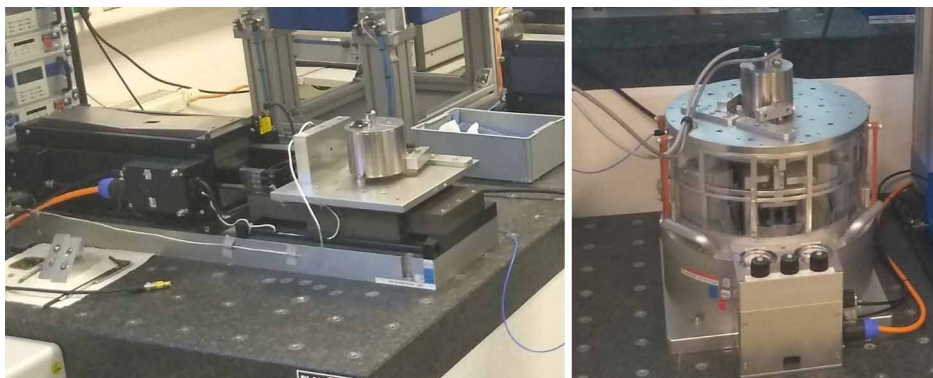


Figura 21 Set-up sperimentale in configurazione orizzontale sulla APS 129 (a sinistra) e in configurazione verticale sulla SE 13 (a destra).

Figure 21 Experimental set-up in horizontal configuration on APS 129 (left) and in vertical configuration on SE 13 (right).

Sia in configurazione verticale che orizzontale, la purezza della sinusoide non è molto alta alle basse frequenze (< 0.5 Hz), ma il sistema di controllo riesce lo stesso ad operare correttamente perché estrae l'armonica fondamentale dall'uscita del riferimento e da quella del sensore. Il risultato della taratura è mostrato in Figura 22. I punti indicati con crocette sono stati prodotti dall'operazione di taratura, le linee continue rappresentano un tentativo di interpolazione, utilizzando la funzione di trasferimento nominale. Per ottenere una buona sovrapposizione delle curve con le misure è stato necessario traslare verticalmente le curve mantenendo quindi la loro forma inalterata, indice del fatto che la sensibilità effettiva del sensore è leggermente diversa dalla sensibilità nominale di $360 \text{ V}/(\text{m/s})$. Per le tre componenti si registrano dunque sensibilità pari a $374 \text{ V}/(\text{m/s})$ per l'asse Z, $376 \text{ V}/(\text{m/s})$ per l'asse E/W e $380 \text{ V}/(\text{m/s})$ per l'asse N/S.

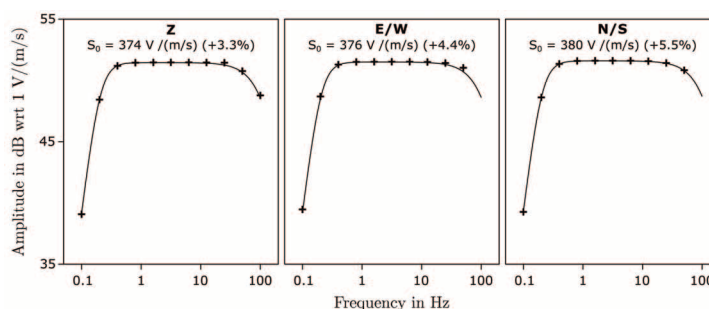


Figura 22 Risultati della taratura di un sensore ETL3D/5s presso i laboratori SPEKTRA.
Figure 22 Calibration results for an ETL3D/5s sensor at the SPEKTRA laboratories.

La taratura ha confermato la forma della funzione di trasferimento del sensore ETL3D/5s-H su un ampio campo di frequenze. Il sistema CS18P è riuscito ad effettuare la taratura anche con livelli di distorsione piuttosto elevati, grazie agli algoritmi di estrazione della frequenza fondamentale. La distorsione rilevata all'uscita del sensore è risultata alta a 0.1 Hz, ma già a partire da 0.2 Hz le curve del sensore e del riferimento hanno registrato livelli di distorsione relativamente bassi ($< 2\%$), come si può vedere nella Figura 23. Il motivo di questa brusca variazione con la frequenza è il risultato di due fattori, il primo dei quali è la distorsione della tavola, misurata tramite il vibrometro, che cresce al diminuire della frequenza. Per esempio, nel caso dell'asse N/S la distorsione passa dallo 0.23% al 4.45% , quando la frequenza scende da 1 a 0.1 Hz.

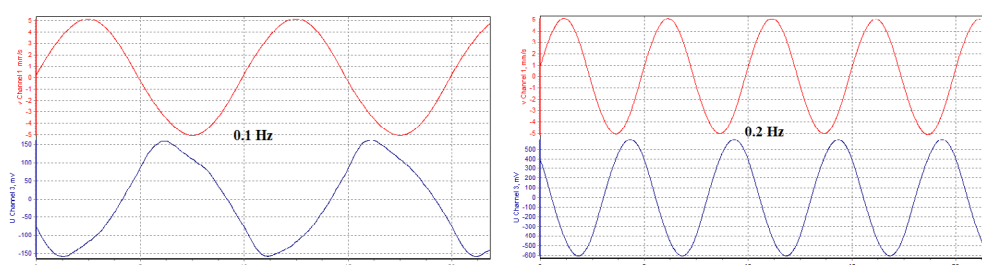


Figura 23 Segnale di spostamento (in rosso) e segnale in uscita dall'ETL3D-5s (in blu) per le frequenze di 0.1 Hz (a sinistra) e 0.2 Hz (a destra). A 0.1 Hz il sensore amplifica notevolmente la distorsione della tavola vibrante a causa della forma della funzione di trasferimento, tuttavia il sistema CS18P può ugualmente effettuare la taratura perché il sensore è in regime lineare, ovvero ogni armonica in ingresso viene amplificata secondo il valore della funzione di trasferimento alla frequenza corrispondente.

Figure 23 Displacement signal (in red) and output signal from ETL3D-5s (in blue) at the frequencies of 0.1 Hz (left) and 0.2 Hz (right). At 0.1 Hz the sensor greatly amplifies the distortion from the vibrating exciter, due to the shape of the transfer function, however the CS18P system can still perform the calibration because the sensor operates in the linear region, i.e. each input harmonic is amplified according to the amplitude of the transfer function at the corresponding frequency.

In secondo luogo, quando la frequenza della fondamentale scende al di sotto della frequenza di taglio del sensore (0.2 Hz), l'ampiezza dell'armonica fondamentale viene attenuata dalla funzione di trasferimento del sensore stesso, mentre le armoniche superiori vengono attenuate in misura minore o non vengono attenuate. L'attenuazione della fondamentale equivale a un'effettiva amplificazione della distorsione generata dalla tavola. A riprova del fatto che il sensore funziona in regime lineare e non introduce distorsione, si noti che la taratura riesce perfettamente a 0.1 Hz, a dispetto degli alti valori di distorsione misurati alla sua uscita (Figura 23, curve a sinistra), restituendo un punto che si colloca perfettamente sulla funzione di trasferimento interpolante (Figura 22).

La Figura 24 mostra la distorsione rilevata dal CS18P per lo stesso set di misure. Per ogni componente sono presenti due curve, quella in grigio rappresenta la distorsione del segnale prodotto dal riferimento, in questo caso l'interferometro Polytec CLV-2534; la curva nera mostra la distorsione misurata all'uscita del sensore ETL3D/5s. Come si può notare la funzione di trasferimento del sensore influenza in modo diverso la distorsione ad alta e bassa frequenza. A bassa frequenza si verifica il fenomeno già descritto che tende ad aumentare la distorsione all'uscita del sensore. Ad alta frequenza accade l'esatto opposto, in quanto le armoniche a frequenza maggiore della frequenza di taglio superiore (pulsazione ω_2 di equazione 1) vengono attenuate, producendo una diminuzione della distorsione. La frequenza di taglio è approssimativamente uguale a 100 Hz ($\omega_2 = 2\pi \cdot 100$ rad/s), e proprio intorno a questo valore la distorsione all'uscita del sensore è sempre inferiore a quella all'uscita del riferimento. Se la distorsione all'uscita del sensore risente della funzione di trasferimento, la distorsione all'uscita del riferimento invece fornisce una misura esatta dell'accuratezza con cui la tavola può produrre un moto armonico. Quindi è proprio questa distorsione che deve essere confrontata con i requisiti tecnici riportati in Tabella 3. Durante il test, il massimo valore di distorsione si è verificato alla frequenza di 0.2 Hz ed è risultato pari al 5% (si veda il grafico a destra in Figura 24, asse N/S), non lontano quindi dal valore fissato di 4.4 %. Tuttavia, nel caso del CS18P, il THD non limita direttamente la precisione del sistema di calibrazione, perché il software di controllo usa algoritmi per l'estrazione dell'armonica fondamentale che riducono fortemente gli effetti della distorsione.

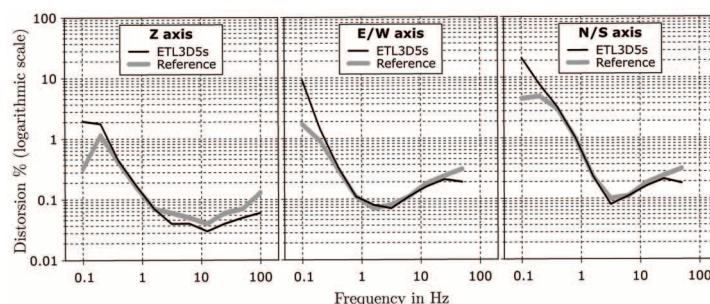


Figura 24 Distorsione in funzione della frequenza rilevata dal sistema CS18P durante la taratura.

Figure 24 Distortion VS frequency detected by the CS18P system, during calibration.

Al termine di questo insieme discreto di misure, il sistema CS18P ha eseguito un'analisi rapida, infittendo notevolmente l'insieme dei punti misurati. L'analisi rapida sfrutta i dati calcolati dal CS18P durante la taratura iniziale al fine di controllare il moto della tavola in modo ottimale. L'analisi rapida è stata effettuata con entrambe le tavole vibrati, APS 129 ed SE13, ma sulla tavola APS 129 è stata testata solo una delle componenti orizzontali, ovvero la E/W. I dati risultanti mostrano alcuni dettagli interessanti, per esempio, su entrambe le componenti si osservano alterazioni locali della funzione di trasferimento del sensore a frequenze maggiori di 150 Hz. Da specifiche, la prima frequenza spuria dei geofoni è 140 Hz, dunque è ragionevole

ipotizzare che sia il funzionamento interno del geofono a generare queste alterazioni. Le curve per l'asse Z e E/W sono visibili rispettivamente in Figura 25 e 26. Il grafico di Figura 25 mostra una risonanza nell'intorno dei 35 Hz, ma tale fenomeno è una caratteristica intrinseca della SE13, già nota ai tecnici della SPEKTRA. Per ovviare a questo problema SPEKTRA adotta una procedura di calibrazione in 4 passaggi. Ad ogni ripetizione il vibrometro laser viene posizionato in modo da rilevare la velocità in un punto diverso del supporto mobile, dunque a una certa distanza dal centro. Al termine delle ripetizioni, le quattro misure vengono mediate al fine di ridurre l'errore di misura.

Figura 25 Funzione di trasferimento del sensore ETL3D/5s, asse Z, misurata con il sistema CS18P.
Figure 25 Transfer function of the ETL3D/5s sensor, Z axis, measured with the CS18P system.

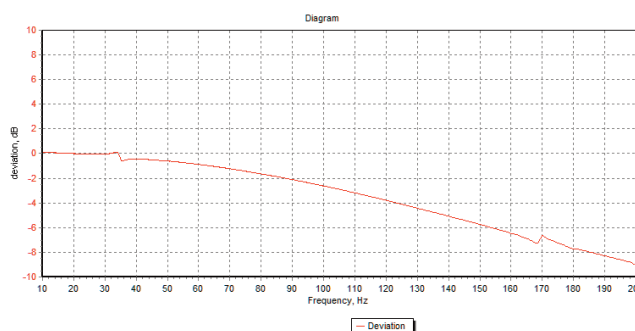
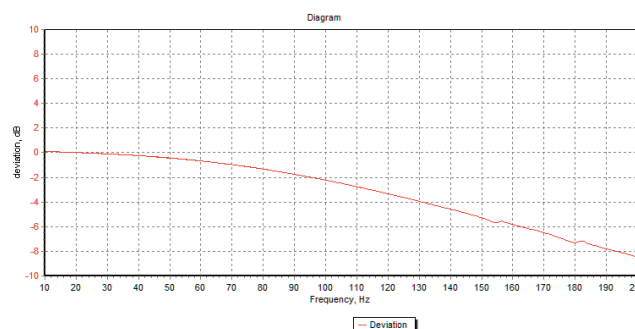


Figura 26 Funzione di trasferimento del sensore ETL3D/5s, asse E/W, misurata con il sistema CS18P.
Figure 26 Transfer function of the ETL3D/5s sensor, E/W axis, measured with the CS18P system.



Le curve ottenute mediante l'analisi rapida mostrano un andamento regolare tra 10 e 200 Hz. Dunque risulta verificato che i picchi a 12.5 e 13.5 Hz rilevati durante i test presso il laboratorio LEDA (frequenze f_1 e f_2 in Figura 19) non erano generati dal sensore ma dell'apparato di calibrazione, probabilmente a causa della configurazione non ottimale in cui la macchina operava, come già spiegato nel paragrafo precedente.

6. Discussione e conclusioni

L'obiettivo principale di questo studio è stato quello di effettuare la scelta più appropriata del sistema di calibrazione da acquisire nell'ambito del Progetto PON "EWAS" per la verifica dei sensori sismici di produzione INGV, come il sensore ETL3D/5s e la sua versione ibrida ETL3D/5s-H che integra due diverse tipologie di accelerometro MEMS ad alta sensibilità e a basso rumore. Il sensore ibrido permette di registrare sia eventi di piccola intensità che dati di tipo *strong-motion*, tali da portare il velocimetro in saturazione, grazie appunto alla presenza dell'accelerometro. La disponibilità di una tavola vibrante consentirebbe di calibrare i sensori ETL3D/5s-H e anche di verificare il buon funzionamento di altri sensori già in possesso dell'INGV o di altri istituti di ricerca del settore, fornendo così, un servizio utile, una fonte di risparmio e anche una possibile fonte di finanziamento per i partner del progetto.

Per la calibrazione dei sensori sismici si possono usare varie tecniche, ma l'unica tecnica che consente una verifica assoluta delle caratteristiche è l'uso di una tavola vibrante. Nel capitolo 2. Specifiche della tavola vibrante, è stato formulato un insieme di specifiche tecniche che la tavola vibrante dovrebbe soddisfare. La tavola dovrebbe essere in grado di produrre un moto armonico accurato, con frequenze comprese tra 0.2 Hz e 200 Hz. L'accuratezza del moto si può misurare tramite il THD che dovrebbe sempre essere inferiore al 4.4%. Tuttavia, raggiungere bassi livelli di distorsione è difficile, soprattutto a bassa frequenza, a causa degli attriti e delle variazioni dell'angolo di tilt. Anche se i moderni sensori sismici possono avere valori di periodo elevati come 120 o 360 s, il massimo periodo della tavola è stato fissato a 5 s (ovvero 0.2 Hz di frequenza), per tenere conto dei limiti tecnologici attuali in relazione al problema degli attriti e del tilt. Come risulta anche dalla letteratura [Wielandt, 2011], queste macchine non riescono a lavorare con periodi maggiori o uguali a 10 s.

Il tentativo di soddisfare le specifiche mediante il progetto di un sistema elettro-meccanico (capitolo 3. Studi preliminari di una tavola vibrante elettro-meccanica) ha prodotto un risultato degno di menzione, ma non del tutto convincente. L'approccio proposto infatti comprende dei riduttori meccanici, necessari per operare a bassa frequenza, che a causa degli attriti interni aumenterebbero la distorsione. Inoltre la tavola ha corsa fissa e produce soltanto moto armonico, quindi il sistema di calibrazione non sarebbe molto flessibile. I limiti del sistema elettro-meccanico possono essere superati utilizzando tavole vibranti elettrodinamiche. Nel capitolo 4. Sistemi di calibrazione elettrodinamici, sono stati presentati due apparati di calibrazione che sfruttano questa tecnologia: il sistema basato su tavola APS 420 del laboratorio LEDA dell'Università Kore di Enna e il CS18P prodotto dalla compagnia tedesca SPEKTRA. La tavola APS 420 è uno strumento a lunga corsa (150 mm) capace di sviluppare valori elevati di forza, fino a 900 N. Queste caratteristiche rendono il sistema del laboratorio LEDA molto flessibile. Tra i possibili impieghi, oltre la calibrazione di sensori sismici, si possono annoverare lo studio dei modi vibrazionali e le simulazioni sismiche. Il sistema CS18P invece è stato pensato in modo specifico per la calibrazione di sensori sismici, dunque presenta particolari accorgimenti che servono a rendere il moto accurato, in particolare l'uso della sospensione fluidodinamica, come strategia efficace per minimizzare gli attriti. Inoltre il CS18P comprende un sistema di controllo in tempo reale e un software dedicato alla calibrazione. In base alla documentazione fornita dal produttore, il sistema CS18P rispetta tutte le specifiche richieste quindi rappresenta una soluzione possibile per la calibrazione di sensori sismici. Tra i dati forniti dal produttore, non figura il THD, tuttavia il CS18P impiega algoritmi di analisi dati che permettono di ottenere elevata precisione anche in presenza di THD relativamente elevato.

Il sistema del laboratorio LEDA è stato utilizzato diverse volte per la calibrazione dei sensori ETL3D/5s (H). Queste esperienze, descritte in dettaglio nel paragrafo 5.1 Calibrazione presso il laboratorio LEDA, hanno confermato la sostanziale bontà del sistema ma hanno evidenziato alcuni aspetti critici, tra cui la mancanza di un sistema di controllo in tempo reale e il livello di distorsione elevato al di sotto di 1 Hz. I tentativi di misurare la funzione di trasferimento del sensore ETL3D/5s, usando come riferimento un secondo velocimetro, non hanno dato buoni risultati, né al di sopra né al di sotto della frequenza scelta per la calibrazione (5.5 Hz). La distorsione è risultato il fattore limitante alle basse frequenze, mentre alle alte frequenze si sono verificati modi naturali vibrazionali che hanno interferito negativamente sulle misure. La comparsa di modi vibrazionali non indica un cattivo funzionamento della tavola, ma piuttosto una configurazione non adatta a un campo di frequenze esteso. In altre parole, il posizionamento, il numero e la massa dei sensori posti sulla tavola vibrante non erano compatibili con misure ad alta frequenza. Attualmente è in fase di sviluppo uno schema di calibrazione che non richiede un secondo velocimetro ma sfrutta l'accelerometro integrato nel sensore ETL3D/5s-H come sensore di riferimento. Dal momento che i test preliminari hanno dato risultati positivi a 5.5 Hz, i prossimi test consisteranno nel tentativo di misurare una funzione di trasferimento.

Il sistema CS18P è stato testato in presenza di personale INGV presso la sede della SPEKTRA a Dresda, in Germania. Le procedure e i dati raccolti sono stati descritti nel paragrafo 5.2 Taratura dell'ETL3D/5s-H attraverso l'utilizzo di un sistema di calibrazione primaria. In quell'occasione è stata completata una taratura di un sensore ETL3D/5s. Da questa esperienza sono emersi alcuni dati importanti. Il CS18P può operare con livelli bassi di distorsione, ovvero inferiori all'1 %, su un ampio campo di frequenze. La distorsione peggiora alle basse frequenze ma gli algoritmi di analisi dati riescono ugualmente a calcolare la sensibilità del sensore sismico con elevata precisione. Il sistema funziona in modo automatico, dopo una configurazione iniziale, e permette di misurare funzioni di trasferimento su un campo piuttosto ampio di frequenze (da 0.2 a 200 Hz).

In conclusione, il sistema CS18P della SPEKTRA soddisfa tutti i requisiti richiesti e, una volta acquisito, sarà installato, a seguito di apposita convenzione tra l'INGV e l'Università di Enna Kore presso il LEDA, dove sono presenti anche tavole vibranti di grandi dimensioni. Il laboratorio è ubicato in una località che ben si presta all'attività di calibrazione, poiché risulta ben isolata da sorgenti di rumore meccanico di origine naturale e/o antropica. Il personale del laboratorio, altamente qualificato e già a conoscenza delle problematiche tipiche della calibrazione, verrà ulteriormente formato tramite un'interazione diretta con la casa costruttrice. Quest'ultima si occuperà dell'installazione del sistema presso il laboratorio. Ad installazione ultimata, verrà data ampia diffusione della notizia sia all'interno dell'INGV, che presso altri istituti di ricerca del settore, sia nazionali che internazionali, al fine di avviare, con successo, la campagna di calibrazione prevista nelle idee iniziali.

Gli autori si propongono, come obiettivo futuro, di collaborare con SPEKTRA al fine di estendere l'utilizzo del sistema di calibrazione al di sotto di 0.1 Hz. Per esempio, si potrebbe provare a sollecitare la risposta all'impulso dei sensori a larga banda al fine di svolgere un'analisi nel dominio del tempo, sfruttando l'equivalenza tra la risposta libera di un sensore e la sua funzione di trasferimento.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato finanziato su fondi del progetto PON ARS01 00926 EWAS "an Early WARning System for cultural heritage". La parte del lavoro relativa agli studi preliminari è stata resa possibile grazie alla collaborazione con l'azienda Centrotecnica S.r.l. che ha fornito un importante supporto tecnico relativo agli studi cinematici e dinamici della tavola vibrante. La collaborazione sperimentale con l'azienda SPEKTRA ha consentito, invece, di effettuare le calibrazioni presso i loro laboratori di Dresda utilizzando le loro strumentazioni e usufruendo del personale altamente qualificato e specializzato nell'uso delle tavole vibranti. Si ringrazia infine l'azienda Meccanotecnica Riesi S.r.l. che ha donato il prototipo dell'*housing* del sensore ETL3D/5s-H, senza il quale non sarebbero state possibili le prime calibrazioni.

Bibliografia

- Analog Devices, *Low Noise, Low Drift, Low Power, 3-Axis MEMS Accelerometers ADXL354/ADXL355*, device datasheet downloadable from www.analog.com.
- Costanza A., D'Anna G., Fertitta G., Patanè M., (2020a). *Sistema di calibrazione per sensori sismici per l'OBS & Earth Lab di Gibilmanna*. Seconda giornata Linee di Attività – Osservatorio Nazionale Terremoti 15-16/06/2020.
- Costanza A., Fertitta G., D'Anna G., Mangiagli S., Martino C., Prestifilippo M., Musumeci C., Scarfi L., Torrisi O., Tusa G., Yang W., Patanè M., (2020b). *La rete sismo-accelerometrica urbana nel centro storico di Catania (OSU-CT): il progetto PON EWAS "An early WARning System for cultural*

- heritage*". Seconda giornata Linee di Attività – Osservatorio Nazionale Terremoti 15-16/06/2020.
- Costanza A., Fertitta G., Yang W., D'Anna G. and Chiarabba C., (2020c). *PGS1, a new low cost and low power Portable Geophysical Station "All in One". Design and test*. Annals of Geophysics, 63, 2020; Doi:10.4401/ag-8544.
- Epson, M-A352AD10 M-A352 *High Accuracy Three Axis Accelerometer*, device datasheet downloadable from <https://global.epson.com>
- Fertitta G., Costanza A., D'Anna G. and Patanè D., (2020). *The Earth Lab 5s (ETL3D/5s) seismic sensor. Design and test*. Annals of Geophysics, Vol: 63, 2, DM215, 2020, Doi:10.4401/ag-7857.
- Fossetti M., Lo Iacono F., Minafò G., Navarra G., Tesoriere G., (2017). *A new large scale laboratory: The LEDA research centre (Laboratory of Earthquake engineering and Dynamic Analysis)*. International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, 2017 - September, pp. 699-717. Doi:10.7414/7aese.T6.18.
- IEEE-STD-1057 (2017). *Standard for Digitizing Waveform Recorders*.
- International Standard ISO 16063-11 (1999).
- International Standard ISO 16063-11 (2003).
- International Standard ISO 16063-11 (2005).
- Lennartz electronic GmbH, *LE-xD Seismometer Family, Document Number: 990-0073, sensor manual*, www.lennartz-electronic.de
- Lo Iacono F., Navarra G., Oliva M., Cascone D., (2017). *Experimental investigation of the dynamic performances of the LEDA shaking tables system*. AIMETA 2017 - Proceedings of the 23rd Conference of the Italian Association of Theoretical and Applied Mechanics, 5, pp. 897-915.
- Monastero R., (2002). Dispense per il corso di meccanica applicata alle macchine. Scaricabili dal sito web <http://marcocammalleri.altervista.org/materiale.php>
- Patanè D., Malfitana D., Mazzaglia A., (2020). *Dalla conoscenza all'azione. Il progetto PON eWAS: un sistema di allerta precoce per la salvaguardia del patrimonio culturale*. Atti del Convegno Internazionale di Studi "Monitoring and Maintenance of Archeological areas, Roma, Curia Iulia, 20-21 Marzo 2019, a cura di Alfonsina Russo e Irma Della Giovampaola, «L'ERMA» di BRETSCHNEIDER, Collana Bibliotheca Archaeologica, 65, pp. 187-197.
- Romeo G. and Braun T., (2007). Appunti di sismometria. Quaderni di Geofisica 46, pp. 44, http://editoria.rm.ingv.it/archivio_pdf/qdg/46/pdf/qdg_46.pdf
- Trillium Compact Vault Seismometer, www.nanometrics.ca
- Wielandt E., (2011). *New Manual of Seismological Observatory Practice – NMSOP*, Chapter 5, Seismic Sensors and their Calibration, Doi:10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch5.
- Zhang R., Höflinger F., Reind L.M., (2014). *Calibration of an IMU Using 3-D Rotation Platform* - IEEE Sensors Journal, vol. 14, no. 6, pp. 1778-1787, June 2014, Doi:10.1109/JSEN.2014.2303642.

QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html/>

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html/>

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Francesca DI STEFANO, Rossella CELI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Progetto grafico e impaginazione

Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

©2022

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
tel. +39 06518601

www.ingv.it



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA