

SPARC-ME-04/002

23 November 2004

## MISURA DI VIBRAZIONI MECCANICHE PER SPARC

L. Pellegrino, U. Rotundo, (*INFN/LNF*)

### 1 INTRODUZIONE

Il nuovo progetto denominato SPARC comprende un sistema laser come guida per un acceleratore lineare. Il sistema di trasferimento del laser, fino al target sul catodo, è costituito da componenti la cui stabilità di posizionamento richiede delle tolleranze che sono dell'ordine dei 10  $\mu$ m RMS. Il campo di frequenze da indagare parte da 5 Hz, per la presenza di un sistema di autoregolazione, efficace a frequenze inferiori.

Il presente documento tratta gli aspetti tecnici legati alla misura e all'acquisizione dati nel campo di interesse per SPARC (tipo di vibrazioni ed applicazione specifica), l'analisi economica delle soluzioni presenti sul mercato, ed alcune considerazioni applicative per l'impiego sul campo della strumentazione detta.

Alcuni risultati delle misure fatte sono stati presentati alla conferenza MEDSI '04 [8].

### 2 DESCRIZIONE DEL PROBLEMA

Un disturbo della posizione ideale dei componenti del laser è rappresentato dalle **vibrazioni meccaniche**. Studi precedenti [1,2] di casi analoghi hanno fornito una suddivisione del dominio delle frequenze che consente di individuare e distinguere le varie fonti di vibrazioni. In particolare, si parla di "basse frequenze" per valori al di sotto di 1 Hz e di "alte frequenze" per valori superiori all'Hertz.

Per quanto riguarda le vibrazioni di bassa frequenza si rileva [1] che esse non dipendono da attività "tecniche", cioè prodotte dall'uomo. In questa categoria rientrano quelle vibrazioni generate da attività microsismica, perturbazioni atmosferiche di pressione e/o temperatura, moto ondoso di grandi masse oceaniche.

Per quanto riguarda le attività microsismiche l'influenza delle vibrazioni sorge da aspetti

locali del territorio; infatti alla bassissima frequenza corrisponde una lunghezza d'onda molto grande, e quindi l'intera sala in cui verrà ospitato SPARC dovrebbe muoversi come un corpo unico. Tuttavia un problema deriva dal fatto che onde sismiche di questo tipo sono soggette a perdita di coerenza spaziale, generando in questo modo movimenti differenziali all'interno di una zona limitata. Il modo per determinare la coerenza delle vibrazioni consiste nell'effettuare un'analisi di spettro di correlazione [4] (Mutual Correlation Spectrum). Quest'analisi prevede il calcolo della funzione di correlazione, definita da

$$K(\square) = \frac{\langle X(\square)Y^*(\square) \rangle}{\left[ \langle |X(\square)|^2 \rangle \langle |Y(\square)|^2 \rangle \right]^{1/2}}, \quad (1)$$

dove l'asterisco indica l'operazione di coniugazione complessa, le parentesi acute l'operazione di media per misure ripetute e X ed Y sono gli spettri misurati simultaneamente in due luoghi diversi della zona di interesse. Il valore di  $K(\square)$  può variare nel campo  $[-1,1]$ , ove il valore 1 indica correlazione diretta delle due grandezze, il valore 0 (zero) indica totale assenza di correlazione ed il valore  $-1$  indica correlazione inversa.

Per quanto riguarda i fattori atmosferici, le fluttuazioni di pressione risultano essere le maggiori responsabili del movimento del suolo nel campo di frequenze da 0.01 a 0.1 Hz (sono stati osservati spostamenti differenziali dell'ordine di 30 micron per variazioni di pressione dell'ordine di 15 mm Hg [2000 Pa]) [1].

Per le frequenze sopra 1 Hz e fino ad alcune centinaia di Hz, le vibrazioni sono generate da attività tecniche [1]. In particolare sono origine di vibrazione le apparecchiature dotate di organi rotanti o in moto alternativo (pompe, compressori, ventilatori, etc.). Tali vibrazioni presentano frequenze intorno ai 50 Hz, nonchè armoniche e subarmoniche della frequenza detta. Anche il passaggio dei veicoli genera vibrazioni (nel campo di frequenza superiore ai 10 Hz); questo potrebbe essere un problema, visto che la strada interna dei LNF è percorsa anche da veicoli pesanti.

Per garantire il funzionamento desiderato di SPARC, è quindi necessario effettuare un'indagine vibrazionale del sito dove verrà realizzata l'installazione. E' anche necessario attrezzarsi per effettuare misure di controllo successive all'installazione stessa. Esiste un fattore che limita il campo di frequenze da indagare: la presenza di un sistema di autoregolazione del laser. Questo dispositivo è in grado di regolare il sistema di puntamento del laser nel campo di frequenze che va dalla DC fino a 5 Hz [5].

### 3 STRUMENTI DI MISURA IDONEI

Il tema delle vibrazioni meccaniche nel campo degli acceleratori di particelle è ampiamente affrontato in letteratura [2]. Anche la tipologia di strumentazione per sondare le caratteristiche dei siti dedicati alle installazioni di questo tipo di macchine, nei campi di frequenze ed ampiezze di nostro interesse, è abbastanza standardizzata. In particolare, la tipologia di sensore più diffusa per questo tipo di misure è quella del **velocimetro** [1,3,4]. Questo tipo di sensore risulta essere, in generale, più massivo e più ingombrante rispetto ad un accelerometro general purpose, ma in compenso presenta caratteristiche di sensibilità molto migliori.

Tuttavia il campo di frequenze del velocimetro risulta limitato e ci sono anche dei problemi di range dinamico, per cui il suo impiego risulta ristretto al campo di frequenze minori di 50 Hz. E' stata effettuata un'analisi dettagliata, tecnica ed economica, delle caratteristiche di velocimetri commerciali. E' stata anche effettuata l'analisi delle caratteristiche di alcuni **accelerometri per applicazioni specifiche**, che superano i problemi e le limitazioni presentati dai velocimetri e che possono essere impiegati nel range di frequenza fino a 3000 Hz. Di seguito si espongono i risultati di queste analisi e la disamina delle caratteristiche dell'intera catena di misura necessaria per SPARC.

### 3.1 Velocimetri commerciali

Questi sensori vengono commercialmente definiti sismometri (seismometers). Sono stati contattati tre fornitori di questi strumenti e le denominazioni dei sensori delle tre società fornitrici, con caratteristiche adeguate alle nostre esigenze, sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1: fornitori e denominazione dei velocimetri.

	<b>VENDOR NAME</b>	<b>SENSOR NAME</b>
<b>1</b>	NANOMETRICS	TRILLIUM
<b>2</b>	SPRENGNETHER	WB 113 / WB 103
<b>3</b>	EENTEC PMD	PMD 103m / PMD 223
<b>4</b>	EENTEC PMD	EP-300

Allo stato attuale la Eentec PMD ha acquistato le linee sensoristiche della Sprengnether. Il loro rappresentante ci ha fornito indicazioni sul nuovo tipo di sensore e sulla denominazione, EP-300, nonché le specifiche tecniche. Quindi l'EP-300 sostituisce i sensori WB 113 / WB 103 e PMD 103m / PMD 223.

Le caratteristiche principali dei sensori a confronto sono riportate in Tabella 2.

Tabella 2: caratteristiche dei sensori.

	<b>TRILLIUM</b>	<b>EP-300</b>
<b>Banda passante [Hz]</b>	0.025 – 50	0.01 – 50
<b>Sensibilità S [V/m·s<sup>-1</sup>]</b>	1500	2000
<b>Tensione di uscita</b>	16V p-p diff	±7V diff
<b>Alimentazione</b>	9 – 36 VDC, 0.5Watt	12 VDC nominali
<b>Costo</b>	8500 + IVA	8100 \$

### 3.2 Accelerometri commerciali

In generale questo tipo di sensore non possiede la sensibilità necessaria per effettuare le misure nel range di nostro interesse. Tuttavia si trovano in commercio particolari accelerometri le cui caratteristiche risultano adeguate.

Sono stati contattati tre fornitori di questi strumenti e le denominazioni dei sensori delle tre società fornitrici, con caratteristiche adeguate alle nostre esigenze, sono riportate in Tabella 3.

Tabella 3: fornitori e denominazione degli accelerometri.

	<b>VENDOR NAME</b>	<b>SENSOR NAME</b>
<b>1</b>	BRÜEL & KJÆR / ENDEVCO	63C13
<b>2</b>	KISTLER	8690C
<b>3</b>	PCB PIEZOTRONICS	356B18

Le caratteristiche principali dei sensori a confronto sono riportate in Tabella 4.

Tabella 4: caratteristiche dei sensori.

	<b>63C13</b>	<b>8690C</b>	<b>356B18</b>
<b>Banda passante [Hz]</b>	0.5 – 2000	1 – 3000	0.5 – 3000
<b>Sensibilità S [mV/g]</b>	1000	1000	1000
<b>Frequenza di risonanza [kHz]</b>	30	9	20
<b>Alimentazione [VDC]</b>	+20 ÷ +30	+20 ÷ +30	+18 ÷ +30
<b>Costo [ + IVA]</b>	2506.33	1430.00	1648.56

## 4 CATENA DI MISURA

I dispositivi necessari all'acquisizione del segnale sono:

1. Sensore;
2. Scheda di Acquisizione dati (DAQ Board);
3. Condizionatori di segnale (Signal Conditioning).

Per quanto riguarda il sensore, sarebbe opportuno disporre di strumenti diversi per suddividere il campo delle frequenze in sottocampi, in cui effettuare le misure con la migliore accuratezza possibile. Inoltre, è bene che i sottocampi di frequenza si sovrappongano, in modo da poter confrontare i valori misurati e così da poter superare i limiti legati al disporre di una sola tipologia di strumento. Infatti, i velocimetri hanno sensibilità molto elevata ma il campo di frequenze è limitato a 50 Hz; inoltre, al limite di questo campo, la dinamica dello strumento si spinge molto in basso, riducendo la capacità di dare letture nella parte alta del campo dinamico di nostro interesse. Per esempio, l'EP-300 a 50 Hz è in grado di rilevare al

più una vibrazione con ampiezza di oscillazione di 11  $\mu\text{m}$ , mentre alla stessa frequenza il 63C13, per esempio, può rilevare un'oscillazione massima di 0.5 mm.

La scheda di acquisizione dati deve avere caratteristiche tali da consentire lo sfruttamento delle alte prestazioni offerte dai sensori. In particolare per il campo di ampiezze da noi indagato una DAQ con un input range di  $\pm 10\text{V}$  deve avere una risoluzione di 24 bit. Questo perchè la minima variazione di tensione rilevabile è data da:

$$Ris_{volt} = \frac{\Delta V}{2^{nbit}} \quad (2),$$

quindi la risoluzione in termini della grandezza cinematica di interesse sarà:

$$Ris_x = \frac{Ris_{volt}}{S_x} \quad (3),$$

ove x può essere velocità o accelerazione ed  $S_x$  indica la sensibilità in termini di  $\text{V}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  oppure  $\text{V}/\text{g}$ . Pertanto, per ottenere la risoluzione in termini di spostamento, bisogna dividere il valore  $Ris_x$  per la pulsazione oppure per il quadrato della pulsazione. La minima ampiezza di spostamento rilevabile dai vari sensori, per una frequenza di 5 Hz, un'incertezza del 10% ed un intervallo di confidenza del 95%, è riportata in Tabella 5. La scheda di acquisizione identificata non introduce ulteriori limiti alla risoluzione dei sensori.

Tabella 5: risoluzione dei sensori più DAQ @ 5 Hz.

	TRILLIUM	EP-300	Accelerometers
<b>Risoluzione [<math>\text{m}\cdot\text{s}^{-2}</math>]</b>	$1.57*10^{-8}$	$1.57*10^{-8}$	$4.91*10^{-4}$
<b>Risoluzione [<math>\text{m}\cdot\text{s}^{-1}</math>]</b>	$4.98*10^{-10}$	$4.98*10^{-10}$	$1.56*10^{-5}$
<b>Risoluzione [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	0.00002	0.00002	0.5

Nota: le celle segnate indicano le grandezze misurate dai sensori. Le altre sono derivate.

Volendo controllare la scheda per mezzo del software LabVIEW della National Instruments, già ampiamente utilizzato nei LNF ed in particolare dal nostro Servizio, una possibile candidata, con le caratteristiche dette, è la DAQ NI PCI 4474. Le caratteristiche di questa scheda consentirebbero di utilizzare sia i velocimetri che gli accelerometri.

Il segnale proveniente dal sensore va trattato prima di essere acquisito dalla DAQ. Normalmente, per eseguire misure di vibrazioni e quindi analisi spettrali, i condizionamenti richiesti sono un'amplificazione e il filtraggio. I filtri richiesti sono di due tipi, per ovviare a due problemi diversi:

1. Filtri ANTI-ALIAS;
2. Filtri per eliminare il DATA-LEAKAGE.

Il primo problema, l'ALIASING, è legato alla presenza di alte frequenze (maggiori di quella di campionamento) nel segnale da acquisire, e ad una frequenza di campionamento insufficiente. Per il teorema di Nyquist la sampling rate deve essere maggiore o uguale al doppio della più alta frequenza da acquisire nel segnale. Poichè, in generale, la sampling rate

è data dalle caratteristiche tecnologiche costruttive delle DAQ Boards, il problema si risolve mediante l'impiego di filtri passa-basso, per limitare la massima frequenza di ingresso. La scheda NI PCI 4474 dispone di filtri antialias integrati, che consentono di sfruttarla fino ad una frequenza di 51kHz circa.

Il problema del DATA LEAKAGE è legato alla quasi certa impossibilità di acquisire un numero intero di periodi delle sinusoidi costituenti il segnale. Il problema si risolve impiegando dei filtri che operano la “finestratura” del segnale [6,7], eliminando il problema di avere delle discontinuità in corrispondenza dell'ultimo punto acquisito, all'atto della ripetizione della forma d'onda per effettuare l'analisi spettrale. A differenza di altre funzioni di filtro, che possono essere applicate sia al segnale nel dominio del tempo che a quello trasformato nel dominio della frequenza, la finestratura va NECESSARIAMENTE [6,7] applicata al segnale nel dominio del tempo. Il problema della finestratura può essere risolto per mezzo del software LabVIEW. Una volta acquisito il segnale nel dominio del tempo e registrato così com'è, bisognerebbe sviluppare un'applicazione (VI) LabVIEW che esegua la finestratura del segnale sotto forma di “raw data” e quindi successivamente passi i dati trattati ad uno stadio successivo, eseguibile sempre all'interno dello stesso VI, per l'analisi di Fourier.

Un altro aspetto che bisogna considerare parlando di condizionamento del segnale è quello del sincronismo dell'acquisizione e quindi della necessità di impiegare un trigger. Per eseguire il data logging dell'attività sismica di fondo della zona che ospiterà SPARC, non è necessario ricorrere a particolari tipi di trigger. Il triggering risulta invece necessario per l'analisi della coerenza delle vibrazioni, per la quale è richiesta appunto la sincronia degli spettri di cui calcolare la funzione di correlazione. La scheda NI PCI 4474 è in grado di eseguire analisi sincrone, in quanto acquisisce contemporaneamente i dati da tutti e quattro i canali di cui dispone.

## **5 SCELTA DELL'HARDWARE**

In base alle conoscenze acquisite e a fattori economici e tecnici, la scelta dell'hardware che consente di coprire il campo di indagine  $d/10\text{m}$  per 5Hz-1000Hz è quella che prevede due accelerometri ed una scheda NI PCI 4474.

La scelta di utilizzare due accelerometri è giustificata dalla eventualità di effettuare l'analisi di correlazione precedentemente descritta. Infatti in letteratura [1] è riportato che la perdita di coerenza delle vibrazioni è un fenomeno verificato per frequenze maggiori o uguali a 2Hz, comprese nel nostro campo di interesse.

La scelta degli accelerometri è ricaduta sui PCB quali miglior compromesso tecnico-economico. Infatti l'Endevco risulta molto più costoso perchè supporta una funzione (TEDS) non richiesta per il nostro tipo di analisi, mentre il Kistler presenta una risoluzione peggiore.

## **6 CALIBRAZIONI**

La strumentazione è stata ricevuta, installata e testata. In particolare si è proceduto alla taratura della catena di misura per mezzo dell'eccitatore Brüel & Kjær tipo 4294, e con un VI

sviluppato in modo da consentire anche l’acquisizione dei dati sul campo. Il calibratore emette un segnale monoassiale di ampiezza  $a=10\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$  RMS alla frequenza di 159.2Hz.

I due sensori, che per essere distinti verranno indicati in base al numero di serie, sono stati montati con l’asse Z nella direzione della sollecitazione. In Tabella 6 sono riportati il valore di tensione calcolato in base alla sensibilità sull’asse z, quello misurato e il relativo scostamento percentuale, nonché le caratteristiche di taratura in frequenza.

Tabella 6: dati di calibrazione dei sensori (asse z).

	Tensione calcolata (V RMS @ 10 ms <sup>-2</sup> )	Tensione misurata (V RMS)	Scostamento %	Frequenza misurata (Hz)	Scostament o %
<b>S.N. 28685</b>	1.0224	1.0181	0.4	159.14	0.04
<b>S.N. 28687</b>	1.1030	1.1044	0.1	159.14	0.04

Nelle Figure seguenti sono riportati i relativi spettri di calibrazione ottenuti per l’asse z dei due sensori.

Sono stati utilizzati tre dei quattro canali disponibili della scheda (canali 0, 1 e 2), corrispondenti ai tre assi (x, y e z) dell’unità sotto test. I picchi a frequenze diverse da quella di sollecitazione (159.2 Hz) corrispondono chiaramente ad armoniche e subarmoniche. Si osserva inoltre che la sollecitazione impartita ad un asse (asse z, canale 2) stimola dei segnali anche sugli assi ortogonali (assi x e y, canali 0 e 1). Tuttavia l’entità di tali segnali “parassiti” risulta inferiore al valore principale di 30 dB, nel caso peggiore, corrispondente ad un rumore con ampiezza di circa mille volte inferiore rispetto al segnale di interesse.

Le misure effettuate mostrano una accuratezza del sensore migliore di quella dichiarata dal costruttore.

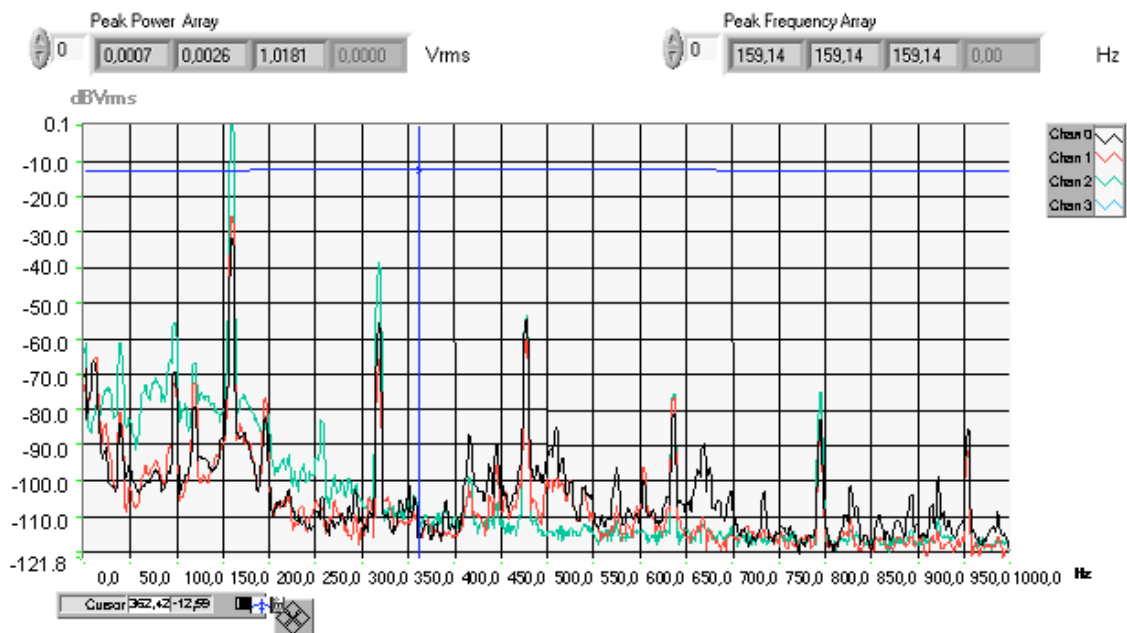


Figura 1: Calibrazione del sensore s/n 28685 con eccitatore tipo B&K 4294

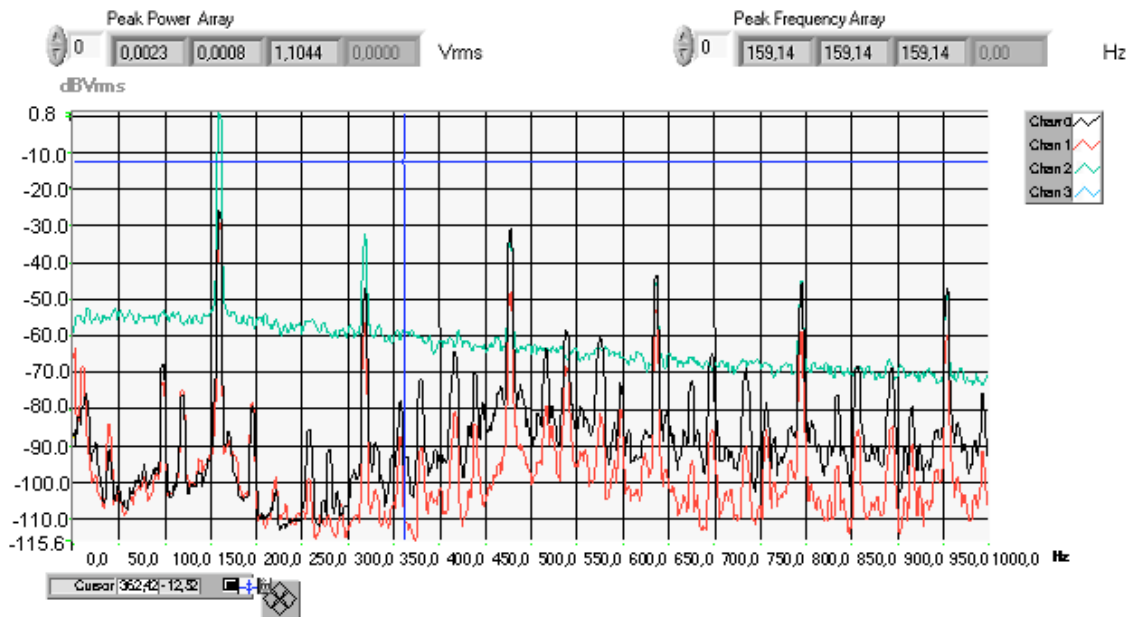


Figura 2: Calibrazione del sensore s/n 28687 con eccitatore tipo B&K 4294

## 7 CONCLUSIONI

Le misure fatte confermano la scelta, necessariamente di compromesso tecnico-economico. La strumentazione è stata immediatamente utilizzata per condurre una campagna di rilevazioni su elementi magnetici, su strutture ed al suolo nella sala Da[ne] ed al suolo e sui macchinari nella Sala Pompe Da[ne], nonché nella Sala SPARC [8,9].



## 8 BIBLIOGRAFIA

- [1] B.Baklakov, et al., "Investigation of seismic vibrations and relative displacements of linear collider VLEPP elements", PAC, (1991).
- [2] Proceedings of the "22<sup>ND</sup> Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Ground Motion in Future Accelerators", (Stanford, 6-9 November 2000).
- [3] L.Zhang, "Vibration at the ESRF", (19/9/1996).
- [4] V.Parkhomchuk et al., "Measurements of the ground motion vibrations at the SSC. ", (1993).
- [5] A.Ghigo, Private Communication.
- [6] S.Gade, H.Herlufsen, "Windows to FFT Analysis (Part I) ", BRÜEL & KJÆR, Technical Review No. 3, (1987).
- [7] S.Gade, H.Herlufsen, "Windows to FFT Analysis (Part II)", BRÜEL & KJÆR, Technical Review No. 4, (1987).
- [8] L.Pellegrino, U.Rotundo, "Site vibration study for the SPARC project", MEDSI, (Grenoble, 2004).
- [9] L.Pellegrino, U.Rotundo, "Studio della vibrazione ambientale nella sala modulatori di Da $\square$ ne", Da $\square$ ne Technical Note, (2004).