



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di laurea in Ingegneria Elettronica
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

**Analisi di un sistema di monitoraggio
strutturale wireless con sensori low-cost**

**Analysis of a wireless Structural Health
Monitoring system with low-cost sensors**

Relatore: Chiar.mo
Prof. Massimo Conti

Tesi di laurea di:
Filippo Lorenzoni

A.A 2019/2020

Sommario

Introduzione.....	2
2 Stato dell'arte	3
2.1 Il monitoraggio strutturale – Structural Health Monitoring.....	3
2.2 Reti WSN – Wireless Sensor Network.....	5
2.3 Sensori per lo SHM.....	7
2.3.1 Accelerometri	7
2.3.2 Confronto tra accelerometri	8
2.3.3 Altri sensori per lo SHM	13
2.3.4 Tipologie di parametri rilevati dai sensori.....	15
2.4 Sincronizzazione temporale	16
2.4.1 Metodi di sincronizzazione	19
2.5 Applicazioni	25
2.5.1 Golden Gate Bridge	27
2.5.2 Jindo Bridge	28
2.5.3 Torre Aquila.....	30
2.5.4 Basilica di S. Maria di Collemaggio.....	31
2.5.5 Duomo di Milano	32
2.5.6 Rion Antirion Bridge – “Charilaos Trikoupis”.....	36
3 Progetto	38
3.1 Hardware Utilizzato.....	38
3.1.1 Analog Device ADXL355Z	38
3.1.2 Espressif System ESP8266	40
3.1.3 Altri elementi per i test.....	41
3.1.4 Connessione ESP8266-ADXL355	42
3.2 Software.....	43
3.2.1 Rilevazione.....	43
3.2.2 Acquisizione dati	44
3.2.3 Elaborazione segnali con MATLAB	44
3.3 Misure	46
3.3.1 Misura 1	46
3.3.2 Misura 2	59
Conclusioni	66
Bibliografia	67

Introduzione

Negli ultimi anni, sono sempre più frequenti eventi catastrofici che minano la nostra vita quotidiana. Ne sono esempi terremoti, maremoti, inondazioni, frane, alluvioni. Trattandosi di eventi naturali non controllabili, imprevedibili, potenzialmente disastrosi e portatori di enormi forze non paragonabili a nessuna forza artificiale, bisogna controbilanciare tali rischi con metodi di prevenzione adeguati, in modo tale da evitare tragici scenari.

Proprio per questo motivo, è sempre più importante un'opera di monitoraggio costante e scrupolosa delle strutture ed infrastrutture di ogni genere.

Possiamo generalmente parlare quindi di Structural Health Monitoring (SHM). Con tale termine si indica il monitoraggio di vari tipi di strutture quali aerei, navi, veicoli spaziali, dighe, grattacieli, ponti ed edifici in generale.

Nella prima parte di questo elaborato, ossia nella sezione 2 si andranno ad analizzare nello specifico le reti per lo Structural Health Monitoring su edifici e ponti. In particolare, nella sottosezione 2.1 vi è una rapida introduzione allo Structural Health monitoring, nella 2.2 una presentazione generale delle reti per il monitoraggio strutturale, la 2.3 è dedicata all'analisi dei sensori impiegati nelle reti wireless per lo SHM con particolare attenzione agli accelerometri, di cui è riportato un vasto confronto. Nella sottosezione 2.4 è trattata la sincronizzazione temporale delle reti per lo SHM ed infine nella 2.5 sono riportate alcune applicazioni in strutture e infrastrutture reali.

Nella sezione 3 sono riportati vari test di misurazioni effettuate con un accelerometro ADXL355Z e la board ESP8266, nel dominio del tempo e della frequenza, in diverse condizioni. Il fine di tali test è documentare nella pratica le performance di un sistema low-cost, costituito dai componenti sopraelencati, nel rilevare vibrazioni e oscillazioni.

2 Stato dell'arte

2.1 Il monitoraggio strutturale – Structural Health Monitoring

Per monitoraggio strutturale, in termini più adeguati, si intende “l'attività svolta a valutare lo stato della struttura degli edifici sulla base della loro storia attraverso misurazioni, effettuate mediante dispositivi e sensori posti nei punti critici strutturali”[1].

Pertanto, il monitoraggio strutturale si inserisce in un campo di rilevante importanza e dalle molteplici applicazioni.

In primo luogo, costituisce lo strumento indispensabile per evidenziare le condizioni di un edificio che potrebbe essere insufficientemente stabile o obsoleto dal punto di vista funzionale. Inoltre il suo utilizzo è indispensabile in zone sismiche o sottoposte ad agenti esterni che inducano il deterioramento o il degrado [1].

Dal punto di vista metodologico esistono varie soluzioni per effettuare il monitoraggio strutturale e la scelta si basa sulle caratteristiche stesse dell'edificio in questione, su considerazioni economiche e su osservazioni rivolte alla facilità di implementazione.

Storicamente molte tipologie di monitoraggio rilevano i dati dalle misurazioni effettuate attraverso i sensori, prediligendo un approccio statistico. Di conseguenza la misurazione gioca un ruolo cruciale.

Tuttavia, non è facile da eseguire in maniera precisa e affidabile. Difatti bisogna tener conto di numerosi problemi che possono affliggere tali misure, quali ad esempio, il rumore di misura, l'accuratezza dei sensori, la sincronizzazione degli elementi coinvolti e i fattori ambientali.

Tradizionalmente si sono sempre utilizzati sistemi di monitoraggio cablati che conducono, in generale, a buoni risultati ma non sono di certo esenti da altri problemi, primo fra tutti la loro installazione, talvolta non facile. Tale problema è meno accentuato e di conseguenza, meno costoso, se si tratta di edifici di nuova costruzione, potendo progettare l'edificio ad hoc al fine di ospitare tali sistemi. Differentemente in edifici già esistenti o soggetti a riabilitazione la messa a punto

di sistemi di monitoraggio cablati è più complessa, invasiva e onerosa, sia dal punto di vista funzionale, che da quello economico, nonché da quello della manutenzione [1]. Dato il loro costo, solitamente i sistemi cablati vengono utilizzati per monitoraggi a lungo termine. Inoltre, un altro problema a cui sono soggetti i sistemi cablati è il fatto di poter essere danneggiati, per esempio durante una forte scossa di terremoto, e di conseguenza lasciare i sensori privi di energia e quindi inutilizzabili[2].

Sviluppare quindi nuove soluzioni che ovviino a tali problemi e che facilitino questo difficile, nonché importante settore, risulta una necessità. Ad oggi la nuova sfida è cercare di utilizzare e sviluppare dei componenti wireless adatti a sostituire i vecchi sistemi cablati e soddisfare le problematiche, almeno in parte, che si creano con quest'ultimi.

Negli ultimi anni si stanno sviluppando sempre di più le cosiddette WSN, ossia Wireless Sensor Network, e proprio queste si stanno sviluppando sempre più nell'ambito dello Structural Health Monitoring.

2.2 Reti WSN – Wireless Sensor Network

Per WSN, si intende un sistema di nodi, chiamati nodi sensori, che acquisiscono, monitorano e processano dati e segnali relativi ad una determinata situazione in modo wireless. Queste sono state già ampiamente utilizzate in molti ambiti, da quello militare a quello ambientale, da quello medico-sanitario a quello industriale. In ambito strutturale, generalmente i sensori sono dislocati su tutto l'ambiente da monitorare, in questo caso sulle strutture e infrastrutture da analizzare, per campionare e raccogliere i dati, per poi essere trasmessi ad un server remoto. La condizione strutturale dell'edificio è poi determinata da un algoritmo sul server [3].

I vantaggi di tali sistemi sono innumerevoli. Primo fra tutti la possibilità di essere utilizzati facilmente anche in edifici già esistenti o in ristrutturazione (come specificato sopra) di avere bassi costi sia di installazione, che di manutenzione, infatti, si riducono al minimo i costi dei cavi, passando da centinaia di metri di cavo fisico allo stretto necessario per far funzionare il sistema ed è molto più semplice e veloce individuare un guasto un malfunzionamento del sistema [4].

Altri vantaggi possono essere la facilità di ampliare il sistema con più sensori data la loro facilità di installazione. Ovviamente ci sono anche limiti che queste reti hanno rispetto ai sistemi cablati, quali ad esempio la sincronizzazione dei componenti, molto accurata in quelli cablati, talvolta difficoltosa a causa della trasmissione wireless nelle WSN.

In particolar modo le reti per lo Structural Health Monitoring necessitano di un grande numero di sensori capaci di raccogliere i dati rilevati. I dati raccolti vengono in seguito elaborati in modo tale da poter avere una visione più chiara sulla salute generale della struttura. I sensori nella rete hanno il compito di raccogliere e trasmettere dati relativi a certi parametri che possono compromettere la solidità di una struttura. I più importanti solitamente, sono l'accelerazione e la velocità della struttura [3].

Per tenere sotto controllo tali parametri, il cuore di una rete WSN sono i sensori impiegati.

A seconda della loro struttura una rete può essere *single-hop* o *multi-hop*.

La prima tipologia prevede che ogni singolo nodo della rete comunichi solamente con il gateway (single hop, dall'inglese "singolo salto") il quale funge da server centrale. Questo permette campionamenti ad alte frequenze, trasmissione dati di grande dimensione e un'alta sincronizzazione temporale dei nodi. Allo stesso tempo, però, questa conformazione non permette la comunicazione a grande distanza. Quella multi-hop invece, supera questo problema in quanto la comunicazione fra due nodi non avviene direttamente, bensì coinvolge dei nodi intermediari che fungono da ricevitori e trasmettitori (multi hop, dall'inglese "salti multipli"). Questi permettono la comunicazione verso il nodo centrale anche di nodi al di fuori del raggio di azione del segnale radio. Questa è quindi una soluzione per le reti che necessitano di una quantità di sensori più elevate e disposti più lontani l'uno dall'altro [5].

2.3 Sensori per lo SHM

2.3.1 Accelerometri

I sensori utilizzati per il monitoraggio strutturale possono essere di vario tipo, a seconda della loro conformazione fisica e principio di funzionamento. I più comuni sono gli accelerometri piezoelettrici e quelli a molla. Tali componenti possono arrivare ad avere frequenze di campionamento superiori ai 100 Hz.

I primi sono costituiti da un cristallo piezoelettrico e da una massa accoppiata ad una base di supporto. Il principio di funzionamento è il seguente: quando una forza esterna fa muovere la base, la massa esercita una forza di inerzia sul cristallo piezoelettrico; quest'ultimo produce una carica elettrica proporzionale alla forza.

Gli accelerometri piezoelettrici sono più piccoli e leggeri e possono essere applicati per un insieme di accelerazioni e frequenze più ampio rispetto agli accelerometri a molla e, anche a causa del loro basso costo e facilità d'uso, sono i più comunemente utilizzati.

D'altro canto, gli accelerometri a molla sono relativamente ingombranti rispetto ai piezoelettrici e non sono in grado di operare su una scala vasta come i precedenti. Tuttavia, questi sono più sensibili alle piccole accelerazioni e forniscono una maggiore accuratezza rispetto ai piezoelettrici. [3]

Più propriamente si parla di boards MEMS, ossia *Micro Electro-Mechanical System*, che possono essere trasmettitori e ricevitori (*transmitter or receiver - board*). La *transmitter board* è costituita da 4 elementi principali quali un'unità di rilevamento (sensore vero e proprio), che ha il compito di trasformare il segnale fisico in un segnale elettrico, un'unità di elaborazione, la quale è adibita alla conversione dell'output del sensore in una rappresentazione digitale, e per fare ciò solitamente si usa un ADC (*Analog to Digital Converter*), un convertitore di segnale analogico-digitale, un nucleo computazionale (*Computational core*), nel quale vengono processati e immagazzinati i dati ed infine un ricetrasmittitore radio il quale trasmette i dati agli altri componenti della rete. La *receiver-board* ha praticamente la stessa struttura della *transmitter-board* ma con la funzionalità

inversa ossia l'unità di elaborazione riconvertirà i dati ricevuti per ricostruire l'informazione originale.

2.3.2 Confronto tra accelerometri

I parametri principali che si terranno in considerazione in questo elaborato sono i seguenti:

- Sensibilità (*Sensitivity*): In generale la sensibilità di uno strumento di misura o di un sensore è il rapporto tra la variazione del valore in output e la variazione del valore in input della grandezza presa in esame. In questo caso specifico, la sensibilità di un accelerometro definisce a quale velocità il sensore converte l'energia meccanica in un segnale elettrico (l'output). L'accelerometro quindi produrrà in uscita un output proporzionale alla forza da esso misurata, e tale output sarà tanto più sensibile alle variazioni e quindi accurato quanto più la sensibilità dell'accelerometro è alta.

Solitamente per accelerometri con uscita analogica l'unità di misura utilizzata è mV/g (millivolt per g) o pC/g (picocoulomb per g), dove per g si intende l'accelerazione dovuta alla forza di gravità terrestre.

Mentre invece per quanto riguarda accelerometri digitali l'unità di misura per la sensibilità sarà LSB/g (*Least Significant Bit*, ossia *bit con peso minore*).

Per misurazioni di piccole vibrazioni, una sensibilità maggiore potrà fornire un segnale più accurato e pulito, mentre invece per misurazioni di vibrazione con ampiezze maggiori è necessaria una sensibilità inferiore.

- Range di misura (*Measurement range*): definisce l'intervallo di ampiezza massima dell'accelerazione che l'accelerometro è in grado di misurare in modo preciso e accurato prima di subire distorsione.

L'unità di misura per tale specifica è g (accelerazione dovuta alla forza di gravità).

- Rumore (*Noise*): Generalmente in elettronica il rumore è l'insieme di segnali non prevedibili che il sensore rileva, ma che non sono correlati alla grandezza che si vuole valutare, provocando una perdita d'informazione o un'alterazione del messaggio trasmesso.

In questo caso specifico, per quanto riguarda gli accelerometri, il rumore è un output indesiderato generato dall'accelerometro che non rappresenta la vera vibrazione subita da esso. Questo è prodotto dall'elettronica presente oltre l'accelerometro. Infatti, un accelerometro è solitamente saldato su un circuito insieme ad altri elementi che ne permettono facilità di utilizzo (es. pin) e forniscono maggiore protezione al componente (es. circuiti di protezione da sovraccarichi di tensione o inversione di polarità). È possibile ridurre il rumore eliminando certi elementi, ma aumentando quindi allo stesso tempo la vulnerabilità del sensore. Per quanto sia elevata la qualità non è possibile avere un componente elettronico con rumore pari a zero.

Talvolta sui datasheets si trova specificata la densità di rumore, la cui unità di misura è $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$. Tale termine converte il rumore ad una data frequenza nell'equivalente segnale in uscita in g.

- Larghezza di banda (*Bandwidth*): La larghezza di banda, nel caso di un accelerometro è l'intervallo di frequenze che esso può valutare, ossia la risposta in frequenza che l'accelerometro può misurare varia all'interno di un certo intervallo di frequenze, dal valore minimo al valore massimo della bandwidth. L'unità di misura, trattandosi di una frequenza, è in Hz.
- Variazione della sensibilità dovuta alla temperatura (*Sensitivity change due to temperature*): Tale parametro definisce come la sensibilità dell'accelerometro si modifichi al variare della temperatura. Essendo gli accelerometri dei sistemi meccanici, la temperatura influirà sulle proprietà del dispositivo e quindi sulla sensibilità dell'accelerometro. Tale parametro è generalmente definito come una variazione percentuale per grado Celsius ($\% / ^\circ\text{C}$). Talvolta per gli accelerometri che presentano una sensibilità alla temperatura elevata (ad esempio quelli piezoelettrici e

piezoresistivi), sarà necessaria una compensazione della temperatura per ridimensionare l'output.

- **Risoluzione (Resolution):** Tale parametro viene generalmente fornito solo per accelerometri con uscita digitale. Tipicamente la risoluzione viene specificata in *bit*, e rappresenta l'accuratezza con cui l'accelerometro comunica il valore di una misura. Ad esempio, se si considera un accelerometro a 16 bit, questo significa che esso è in grado di fornire un valore ad ogni misura corrispondente ad un numero intero $x \in [0, 65535]$ ($2^{16}-1=65535$).
- **Costo (Price):** Prezzo di mercato attuale dell'accelerometro in Euro (€).

Di seguito, nella *tabella 1* è riportato un confronto fra vari accelerometri comparabili in commercio, nella *tabella 2* sono riportati gli accelerometri dell'azienda *STMicroelectronics*, e nella *tabella 3* un resoconto dei lavori proposti con relativi sensori utilizzati. Nello specifico alcuni di questi elaborati e i sensori utilizzati sono spiegati più approfonditamente nella sezione "Applicazioni".

TABELLA 1 CONFRONTO ACCELEROMETRI IN COMMERCIO.

Accelerometer	Output Mode	Sensitivity (2g scale)	Measurement range (g)	Noise density ($\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)	Bandwidth (Hz)	Sensitivity change due to temperature ($\%/^{\circ}\text{C}$)	Resolution (-Bit)	Price €
ADXL 313	digital	256 LSB/g	$\pm 0.5, \pm 1, \pm 2, \pm 3$	xy-axis:150 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, z-axis:250 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	6.25-3200, user programmable	± 0.01	10-bit to 13-bit	≈ 3 €
ADXL 317	digital	500 LSB/g	± 16	xy-axis:55 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, z-axis:120 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	506,1012,2025,4051	X-Y axes $\pm 2.5\%$ Z-axis $\pm 4.5\%$	14-bit	\approx
ADXL 344	digital	256 LSB/g	$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$	xy-axis: 420 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, z-axis:530 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	0.1-3200, user programmable	± 0.02	10-bit, up to 13-bit	≈ 1 €
ADXL 345	digital	256 LSB/g	$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$	xy-axis: 290 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, z-axis:430 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	0.1-3200, user programmable	± 0.01	10-bit, up to 13-bit	≈ 4 €
ADXL 354	analog	400 mV/g	$\pm 2, \pm 4$ or $\pm 2, \pm 8$	20 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	1500	± 0.02	\	≈ 36 €
ADXL 355	digital	256000 LSB/g	$\pm 2.048, \pm 4.096, \pm 8.192$	25 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	1-1000, user programmable	± 0.01	20-bit	≈ 40 €
ADXL 357	digital	400 mV/g	$\pm 10, \pm 20, \pm 40$	75 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	2400	± 0.01	20-bit	≈ 26 €
ADXL 372	digital	Not specified	± 200	Not specified	Not specified	± 0.01	12-bit	≈ 5 €
ADXL 375	digital	20.5 LSB/g	± 200	5 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	0.1-3200, user programmable	± 0.02	16-bit	≈ 4 €
AIS1120SX	digital	68 LSB/g	± 120	Not specified	400-1600, user programmable	± 0.02	14-bit	≈ 5 €
AIS2DW12	digital	0.244 mg/digit	$\pm 2, \pm 4$	Not specified	Not specified	± 0.01	16-bit	≈ 2.5 €

AIS328DQ	digital	0.98 mg/digit	±2, ±4, ±8	218 µg/√Hz	0.25-5, ODR/2	Not specified	16-bit	≈ 9€
AIS3624DQ	digital		±6, ±12, ±24	600	0.25-5, ODR/2	Not specified	12-bit	≈ 8€
H3LIS100DL	digital	780 mg/digit	±100	50 µg/√Hz	0.25-5, ODR/2	±0.01	8-bit	≈ 16€
H3LIS200DL	digital	780 mg/digit	±100, ±200	50 mg/√Hz	25-500, ODR/2	±0.01	8-bit	≈ 5€
H3LIS331DL	digital	49 mg/digit	±100, ±200, ±400	15 mg/√Hz	0.25-5, ODR/2	±0.01	16-bit	≈ 9€
IIS2DH	digital	3.91 mg/digit	±2, ±4, ±8, ±16	Not specified	Not specified	±0.01	Not specified	≈ 3€
IIS2DLPC	digital	0.244 mg/digit	±2, ±4, ±8, ±16	90	800	±0.01	14-bit	≈ 18€
IIS2ICLX (steval-mki209v1)	digital	0.061 mg/LSB	±0.5, ±1.0, 2.0, ±3.0	15 µg/√Hz	260	±0.02	16-bit	≈35 € (Kit)
IIS3DWB	digital	0.061 mg/LSB	±2, ±4, ±8, ±16	75 µg/√Hz	6300	±1%	16-bit	≈ 13 €
LIS25BA	digital	0.122 mg/LSB	3.85	Not specified	2400	±0.08	16-bit	≈ 4€
LIS2DE12	digital	15.6 mg/digit	±2, ±4, ±8, ±16	Not specified	Not specified	±0.05	8-bit	≈ 1€
LIS331DLH	digital	1 mg/digit	±2, ±4, ±8	218	Not specified	±0.01	16-bit	≈4 €
LSM303DLHC	digital	Not specified	±2, ±4, ±8, ±16	220	Not specified	±0.01	16-bit	≈5€
LSM9DSO	digital	0.061 mg/LSB	±2, ±4, ±8, ±16	Not specified	Not specified	±1.5 %	16-bit	≈21€

TABELLA 2 ACCELEROMETRI ST MICROELECTRONICS [6]

Modello	Assi	Range (g)	Output	Supply Voltage			Noise Density	Current (mA)		
				Min	typ	max		Normal mode	Low power mode	Power down mode
AIS2IH	X, Y, Z	±2; ±4; ±8; ±16	Digital	1.62	1.8	3.6	90	140	0.67	0.1
AIS1200PS	X	±200	Digital	5	-	16	-	4000	-	-
AIS2120SX	X, Y	±120	Digital	3.1	3.3	3.5	-	6000	-	-
AIS2DW12	X, Y, Z	±2; ±4	Digital	1.62	1.8	3.6	120	5	0.38	0.05
AIS328DQ	X, Y, Z	±2; ±4; ±8	Digital	2.4	3.3	3.6	218	250	-	1
IIS2DH	X, Y, Z	±2; ±4; ±8; ±16	Digital	1.71	2.5	3.6	-	11	6	0.5
IIS2DLPC	X, Y, Z	±2; ±4; ±8; ±17	Digital	1.62	1.8	3.6	90	120	3	0.05
IIS2ICLX	X, Y	±0.5; ±1; ±2; ±3;	Digital	1.71	3.3	3.6	15	420	-	3
IIS328DQ	X, Y, Z	±2; ±4; ±8	Digital	2.16	3.3	3.6	218	250	10	1
IIS3DHHC	X, Y, Z	±2.5	Digital	1.71	2.8	3.6	45	2500	-	-
IIS3DWB	X, Y, Z	±2; ±4; ±8; ±16	Digital	2.1	3	3.6	75	1100	-	3
LIS25BA	X, Y, Z	±3.85	Digital	1.71	1.8	1.99	-	2130	1280	10
LIS2DE12	X, Y, Z	±2; ±4; ±8; ±16	Digital	1.71	2.5	3.6	-	6	-	0.5
LIS2DH	X, Y, Z	±2; ±4; ±8; ±16	Digital	1.71	2.5	3.6	-	11	6	0.5
LIS2DH12	X, Y, Z	±2; ±4; ±8; ±16	Digital	1.71	2.5	3.6	220	11	6	0.5

LIS2DS12	X, Y, Z	±2; ±4; ±8; ±16	Digital	1.62	1.8	1.98	120	150	8	0.7
LIS2DTW12	X, Y, Z	±2; ±4; ±8; ±16	Digital	1.62	1.8	3.6	90	90	3	0.05
LIS2DW	X, Y, Z	±2; ±4; ±8; ±16	Digital	1.62	3.6	1.8	120	-	6	0.5
LIS3LV02DL	X, Y, Z	±2; ±6	Digital	2.16	3.3	3.6	-	650	250	1
MIS2DH	X, Y, Z	±2; ±4; ±8; ±16	Digital	1.71	2.5	3.6	-	11	6	0.5
AIS1120SX	X	±120	Digital	3.1	3.3	3.5	-	4500	-	-
AIS326DQ	X, Y, Z	±2; ±6	Digital	3	3.3	3.6	-	670	-	2

TABELLA 3 ELABORATI PROPOSTI CON RELATIVI SENSORI UTILIZZATI.

Autore	Anno	Rif	Accelerometro	Altri sensori	Noise density ($10^{-3}m \cdot s^{-2}/\sqrt{Hz}$)	Sensitivity (mV/g)	Sensing range (g)	BW (Hz)	ADC (bit)
Leon	2007	[7]	n.s.	temperatura, vibrazioni,estensimetro	\	\	\	\	\
Kim	2007	[8]	ADXL 202E	\	0.2	\	±2	\	\
		[8]	1221L	\	0.032	\	±0.1	\	\
Nagayama	2007	[9]	LIS3L02DQ	\	1.03	67.3	±19.61	0-56	\
Pakzad	2008	[10]	SD-1221	\	0.05	203.96	±0.98	0.1-25	16
Cho	2008	[11]	CXL02LF	\	1.37	101.98	±19.61	0-50	16
Rice	2008	[12]	LIS3L02AS4	\	0.49	67.3	±19.61	0-50	16
Whelan	2009	[13]	LIS2L02AL	\	0.29	67.3	±19.61	0-50	12
Cerioti	2009	[14]	LIS3L02AL	sensore di deformazione a fibra ottica, sensore temperatura e umidità	\	\	±2 g	1.5KHz	\
Meyer	2009	[15]	LIS2L06AL	\	0.88	22.43	±58.84	0-100	12
Swartz	2010	[16]	CXL01LF	\	0.69	203.96	±9.81	0.03- 25	16
Park	2010	[17]	SD-1221L	\	0.05	203.96	±19.61	0.1- 100	16
Jo	2010	[18]	ASD-1221L	\	0.05	203.96	±1.96	0-15	16
Jang	2010	[19]	LIS344ALH	anemometro	\	\	±2	\	16
Naticchia	2010	[1]	\	True Tilt inclinometro	\	\	\	\	\
Antonacci	2011	[20]	LIS344ALH	Inclinometri, fessurimetri, sensore di temperatura, sensore di umidità	\	\	\	\	\
Papanikolas	2011	[21]	modello n.s-1	anemometri, sensore di temperatura e umidità, misuratore di distanza magnetico, estensimetri,	\	\	±20g	\	\
			modello n.s-2		\	\	±3g	\	\
			modello n.s-3		\	\	±3g	\	\
			modello n.s-4		\	\	±3g	\	\
Bocca	2011	[22]	LIS3L02DQ	\	1.03	67.3	±19.61	0-56	16
Chae	2012	[23]	AC310-002	\	0.13	203.96	±19.61	0-300	16
Araujo	2012	[24]	\	ICP Piezoelettrico	\	\	\	\	Low noise ADC
Kohler	2013	[25]	SF1500	\	0.003	122.37	±29.42	0.1- 1500	24
Sabato	2014	[26]	SF1600	\	0.003	122.37	±29.42	0-1500	-

Phanish	2015	[27]	LIS344ALH	\	x,y 0.025, z 0.05		±2, ±6		12
Hu	2015	[28]	SD-1221	\	0.05	203.96	±0.98	0-50	12
Gonzalez	2015	[29]	\	Smartphone accelerometer	\	\	\	\	\
Raju	2015	[30]	393B12	board sperimentale TI-MSP430F5438	\	10	0.5 g pk	0.05- 4000	8
		[30]	ADXL322	\	\	420	±2	0.5- 2500	
Giammarini	2015	[31]	MS9002	\	\	\	±2	\	16
Conti	2018	[32]	ADXL355Z		0.025	\	±2,±8		20
Gentile	2019	[33]	n.s.	inclinometri, estensimetri, sismometri, sensori di temperatura, igrometri	\	\	\	\	24
Vishnu	2020	[34]	MMA8451	CC1310	0.099	\	±2	\	24

2.3.3 Altri sensori per lo SHM

Oltre agli accelerometri, possono essere utilizzati anche altri componenti, quali ad esempio dei sensori di deformazione che si dividono in estensimetri piezoresistivi o da incasso. I primi, atti a misurare le deformazioni, sono in grado di generare segnali con una frequenza molto bassa, inferiore a 1Hz. I secondi sono solitamente utilizzati per la misurazione di deformazioni all'interno del calcestruzzo. Essi per avere un buon funzionamento, essendo sensibili alle sollecitazioni ambientali, devono essere protetti da adeguati involucri.

Altri elementi utilizzati per il SHM sono i sensori di corrosione, che solitamente misurano la variazione di resistenza causata dalla corrosione del wafer del sensore; i Linear Voltage Differential Transducers (LVDT) i quali sono adibiti alla misurazione dello spostamento. Sono formati da un involucro cavo di metallo con al suo interno un'anima anch'essa metallica in grado di muoversi liberamente. Quando esso è fermo, la tensione rilevata sarà pari a zero, ma non appena uno spostamento intercorre, l'anima inizia a muoversi all'interno dell'involucro metallico e crea una tensione proporzionale all'intensità dello spostamento.

Infine, sono utilizzati in questo campo anche sensori a fibra ottica, che possono misurare parametri come la temperatura, pressione e altre quantità modificando la fibra in modo tale che la quantità che si vuole misurare moduli l'intensità, la fase, la polarizzazione e la lunghezza d'onda o il tempo di transito della luce nella

fibra. Quest'ultimi sono utilizzati principalmente per misurare i parametri con un'altissima accuratezza [3].

Una recente applicazione di quest'ultimi la si può trovare nel sistema di monitoraggio del nuovo Ponte San Giorgio di Genova, costruito in sostituzione del vecchio Ponte Morandi, tragicamente crollato nell' Agosto del 2018. Questo è monitorato costantemente da un insieme di 240 sensori a fibra ottica [35].

Un altro tipo di sensori utilizzati nello SHM sono gli anemometri, ossia misuratori di vento, i quali possono essere ad elica, che possono misurare solo direzione e velocità del vento, oppure ad ultrasuoni, che sono in grado di misurare oltre a direzione e velocità del vento ma anche turbolenze in tutte e 3 le dimensioni. Tuttavia, vengono utilizzati frequentemente anche quelli ad elica in quanto sono più economici di quelli a ultrasuoni e consumano molta meno energia.

Inoltre, possono essere impiegati varie tipologie di termometri, quelli più utilizzati sono quelli a termocoppia, RTD (Resistance Temperature Detector) e termistori (Thermally Sensitive Resistor). I requisiti per un termometro per questo campo devono essere un range di misura da $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ o superiore e una risoluzione di $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ o superiore [23]. Solitamente affiancato ad un sensore di temperatura si trova spesso un sensore di umidità, utilizzato appunto per tenere sotto controllo tale fattore ambientale e valutare la correlazione fra misure effettuate e umidità.

Esempi di altri sensori per il monitoraggio strutturale possono essere gli inclinometri, sensori utilizzati per valutare appunto l'inclinazione di una superficie, più in particolare nello SHM sono utilizzati per valutare l'inclinazione della parete e la perdita di verticalità di queste. I fessurimetri, sensori per valutare lo spostamento fra due punti e permettono di monitorare l'evoluzione di un danno su una superficie strutturale sia in orizzontale che in verticale che rotazionale [20].

2.3.4 Tipologie di parametri rilevati dai sensori

I parametri rilevati dai sensori si dividono in due categorie, a seconda della causa che li produce: quelli dovuti al carico e quelli dovuti ai fattori ambientali.

I parametri dovuti al carico sono quelli che misurano la risposta della struttura alle forze che sono applicate su di essa. Essi possono essere statici ossia dovuti a fattori di tipo ambientale oppure dinamici, dovuti, ad esempio, al passaggio di veicoli o altri fattori non sempre presenti. In più, a loro volta essi possono essere globali o localizzati, ossia rispettivamente, agenti su tutta la struttura o solo in alcuni punti. Per osservare la risposta ai carichi globali si misurano l'accelerazione e la velocità di una struttura nel suo complesso. Per i carichi localizzati invece i parametri sono deformazione, fessurazione e forze di trazione. I parametri dovuti a fattori ambientali, sono quei parametri dipendenti solamente dall'ambiente in cui l'edificio è immerso. Sono tali ad esempio la temperatura, la salinità, umidità e acidità atmosferica.

Nel processo di monitoraggio strutturale è importante valutare la frequenza di campionamento dei dati rilevati. La frequenza dei modi dominanti è, in genere, di circa 10 Hz. Le frequenze di campionamento scelte sono solitamente superiori ai 100 Hz in quanto più le frequenze di campionamento sono alte e più vengono inclusi i modi ad alta frequenza "che possono essere utilizzati per il monitoraggio e la localizzazione dei danni" [3].

2.4 Sincronizzazione temporale

Come anticipato precedentemente, una delle più importanti e indispensabili caratteristiche che deve avere una Wireless System Network, è la sincronizzazione temporale dei sensori per l'allineamento temporale dei dati (*time synchronization*).

Nello Structural Health Monitoring, una mancanza di sincronizzazione temporale tra i nodi sensori può determinare errori nella stima dei parametri sopracitati, nel rilevamento e nella localizzazione del danno.

La sincronizzazione temporale mira a creare una scala temporale comune per tutta la rete [36].

Nello SHM in particolare le reti wireless necessitano di una sincronizzazione molto accurata in quanto vi è uno scambio di informazioni fra i nodi ancora maggiore.

Inoltre, la sincronizzazione nello SHM è importante in quanto le vibrazioni simultaneamente misurate dai vari sensori dislocati nella struttura sono solitamente trasmesse tramite una rete multi-hop dai sensori wireless. Durante tale trasmissione può accadere che alcuni dati giungano a destinazione con un certo ritardo imprevedibile. In questo modo quindi, anche se tutti i sensori della WSN inviano allo stesso istante un dato, il tempo di arrivo alla stazione base (dove poi vengono elaborati) può non coincidere. I dati quindi ricevuti necessitano di essere conformati in modo omogeneo così da mantenersi su un asse temporale comune e questo è un passo fondamentale per una rete WSN.

Possono essere distinti 3 elementi per descrivere al meglio la non-sincronizzazione degli elementi in una rete: l'*offset*, il quale indica la differenza temporale esistente tra i clock di due elementi, il *Clock Skew*, il quale indica la velocità con cui l'*offset* relativo a due nodi varia nel tempo e il *clock drift*, definito come la variazione temporale del clock skew tra due nodi. Partendo dall'eliminazione dell'*offset*, è possibile poi procedere ad una giusta sincronizzazione della rete [37].

Generalmente le principali cause di un errore nella sincronizzazione (TSE, *time synchronization error*) sono: un errore di sincronizzazione del clock dei nodi sensori, la non simultaneità nell'avvio del rilevamento, differenti frequenze di campionamento dei sensori nella rete e intervalli di campionamento non uniformi. Nel caso di sincronizzazione ideale il segnale viene campionato con un intervallo di campionamento T_s costante e tutti i sensori iniziano la rilevazione allo stesso tempo generale. Quindi, nel caso ideale, in un generico istante di campionamento k , il tempo rilevato è t_k :

$$t_k = kT_s$$

ma a causa delle fonti di errore sopraelencate e trattandosi di realtà e non del caso ideale, il tempo reale rilevato è t'_k :

$$t'_k = kT_s + \delta + ck + \varepsilon(k)$$

dove, δ rappresenta uno spostamento temporale (*time shift*), dovuto all'errore di sincronizzazione del clock e la non simultaneità nell'avvio del rilevamento, ck è uno spostamento temporale dovuto alla differente frequenza di campionamento dei sensori nella rete, mentre $\varepsilon(k)$ è uno spostamento temporale dovuto alla non uniformità degli intervalli di campionamento[38].

Altre cause del ritardo e della non sincronizzazione dei nodi in una rete, sono quelle elencate di seguito:

- Tempo di invio (*Send time*): si intende il tempo totale in cui viene generato, traferito e inviato il messaggio, ossia il dato raccolto da un sensore trasmettitore.
- Tempo di accesso (*Access time*): si intende il tempo necessario per accedere al canale.
- Tempo di propagazione: (*Propagation time*): è il tempo richiesto per trasmettere il messaggio in aria dal dispositivo trasmittente a quello ricevente [39].

- Tempo di ricezione (*Receive time*): è il tempo impiegato per ricevere, processare il messaggio e registrare il suo arrivo.

TABELLA 4 STIMA RITARDI SHM [37]

Sorgente di ritardo	Ritardo
Send e receive	0 - 100 ms
Access	10 - 500 ms
Transmission/reception	10 - 20 ms
Propagation	< 1 μs per distanze fino a 300 mt
Interrupt handling	5 μs - 30 μs
Encoding/decoding	100 μs - 200 μs
Byte alignment	0 - 400 μs

Dovendo essere la sincronizzazione nelle reti per lo Structural Health Monitoring, ancor più accurata rispetto ad altri campi, sono stati sviluppati nel tempo numerosi metodi al fine di ottenere risultati ottimali [38].

Si possono dividere in due approcci differenti:

- Sviluppo di algoritmi il cui scopo non è quello di sincronizzare tutti i sensori in una rete, bensì quello di essere in grado di rilevare i parametri necessari pur utilizzando dati non sincronizzati;
- Sviluppo di algoritmi di sincronizzazione, ossia che hanno come scopo quello di avere una rete composta da tutti sensori sincronizzati fra loro. Possono essere a loro volta suddivisi in algoritmi basati sul software e basati sull'hardware[3].

TABELLA 5 LAVORI E RELATIVA MODALITÀ DI SINCRONIZZAZIONE ADOTTATA.

Autore	Anno	Rif	Sincronizzazione	Applicazione
Lynch	2003	[40]	Frequency modulated (FM) beacon signal	Alamosa Canyon Bridge, New Mexico
Kim	2007	[8]	FSTP	Golden Gate Bridge, California
Nagayama	2007	[9]	FTSP	Smart Sensing Technology
Ceriotti	2009	[14]	TSPN modificato	Torre Aquila, Italia
Jiang	2009	[41]	TPSN	Monitoraggio edifici, ponti, strade
Goldoni	2010	[42]	TPSN	W-Tremors
Papanikolas	2011	[21]	SNTP protocol	Rion Antiron Bridge, Grecia
Weiss	2011	[43]	FSTP modificato, GPS	Sistema monitoraggio vibrazioni sismiche
Araujo	2012	[24]	sync-module IEE 802.15.4 based	sistema di monitoraggio strutturale
Chae	2012	[23]	Real Time Clock (RTC),GPS ZigBee	Monitoraggio ponte sospeso
TANG Yu-liang	2012	[44]	FTSP	WSN per monitoraggio online
Kohler	2013	[25]	FTSP	ShakeNet
Giammarini	2015	[31]	GPS	Sistema di monitoraggio adattabile
Phanish	2015	[27]	UTTM	Bobby Dodd Stadium, Georgia
Conti	2018	[32]	WiFi, GPS, RBS	Torre Università politecnica delle Marche

2.4.1 Metodi di sincronizzazione

Nel tempo sono stati sviluppati numerosi metodi di sincronizzazione temporale. Ad esempio, il NTP (*Network Time Protocol*), sviluppato dal professore dell'Università del Delaware David L. Mills [45] che è molto utilizzato in Internet, ma per nulla economico dal punto di vista energetico e difficile da implementare[39]. Il principio di funzionamento si basa sul calcolo dei tempi di latenza nella trasmissione dei *time-packet* nella rete. Si può definire una gerarchia a piramide, dove al vertice si trovano elementi sincronizzati con orologi esterni estremamente accurati, quali ad esempio orologi atomici o GPS. In questo modo scendendo nella struttura piramidale ogni strato può sincronizzarsi basandosi sui dati temporali ricevuti dallo strato superiore e dello stesso strato, e continuando così via per tutti gli strati e questo permette di raggiungere un'accuratezza di sincronizzazione di alcuni millisecondi [37] [45].

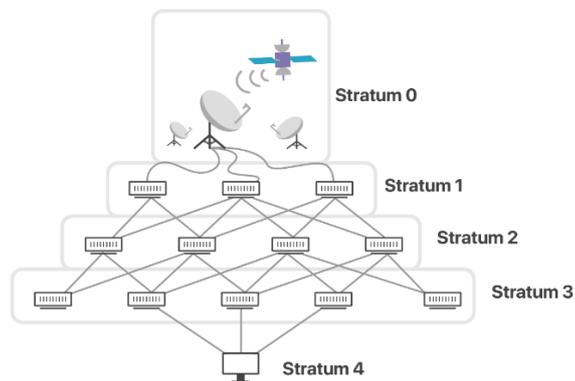


FIGURA 1 ARCHITETTURA A STRATI NTP. [46]

Un altro metodo di sincronizzazione è quello GPS (*Global Position System*), utilizzato nei [43][31], il quale è uno dei sistemi più diffusi al mondo. Questo non è molto pratico per quanto riguarda costi e copertura del segnale, e dato che spesso i sensori sono posti in luoghi e condizioni difficilmente accessibili, il segnale GPS risulta spesso scarso. Tuttavia esistono altri metodi di sincronizzazione più adatti per quanto riguarda l'utilizzo delle reti wireless[39]. Esistono metodi più rigidi, che consumano maggiori quantità di energia, che richiedono la sincronizzazione di tutti i nodi allo stesso tempo (*always-on*), ed altri invece che la richiedono di pochi nodi alla volta.

Di seguito ne vengono riportati alcuni:

- **TTS (*Traditional Time Synchronization*):** tale metodo è uno dei più semplici e si basa sull'invio e ricezione di messaggi. Un nodo trasmette al nodo ricevente (*Sender-Receiver*) un messaggio contenente l'ora locale corrente, il quale poi sintonizza il suo clock sull'orario di ricevimento del messaggio. Questo metodo quindi è utilizzabile per reti in cui il tempo di ritardo fra il nodo trasmettente e quello ricevente è trascurabile rispetto all'accuratezza totale desiderata. In caso il ritardo sia più elevato il nodo trasmettente considera che il nodo ricevente risponda istantaneamente, in questo modo può calcolare il tempo impiegato e usarlo per sincronizzarsi con gli altri nodi sensore.
- **RBS (*Reference Broadcast Synchronization*):** in questo metodo viene utilizzata la sincronizzazione fra 2 nodi ricevitori, a differenza di quello precedente in cui vi erano un nodo trasmettente e uno ricevente [39].

La RBS più semplice comprende un nodo trasmettitore e due nodi riceventi, ma può essere espansa ad un qualsiasi numero n di nodi riceventi. Il nodo trasmettitore invia il *timing packet* ai due (o più) nodi riceventi. Questi registrano l'ora di ricevimento in base al loro orologio, per poi scambiarsi reciprocamente tali informazioni e calcolare il loro tempo di offset. In questo modo i due (o più) nodi ricevitori condividono una scala temporale comune. Nella forma più complessa di RBS, ossia con più di due nodi riceventi, per una maggior precisione di sincronizzazione è opportuno inviare più volte un *timing packet*.

Il vantaggio del metodo RBS è quello di eliminare l'incertezza dovuta al tempo di invio del nodo trasmettitore rimuovendo il nodo trasmettitore dal processo di sincronizzazione. Eliminandolo dal processo, le fonti di errore saranno solo il tempo di propagazione e di ricezione[47]. Inoltre, assumendo che i nodi ricevano contemporaneamente il *timing packet*, possiamo considerare trascurabile anche il tempo di propagazione e quindi l'unica fonte di errore è il tempo di ricezione.

Con questo metodo si può raggiungere una precisione dell'ordine dei μs [39].

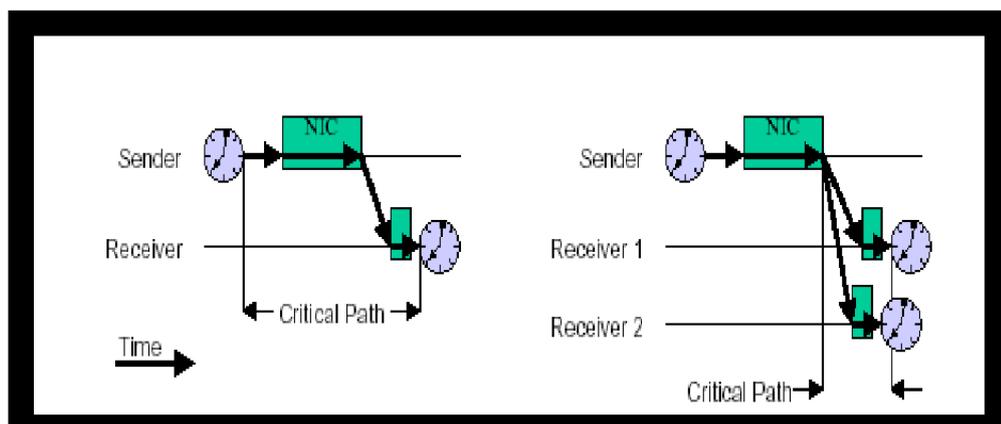


FIGURA 2 METODO TTS (A SINISTRA) E RBS (A DESTRA) [39]

- TPSN (*Timing-Sync Protocol for Sensor Networks*): tale protocollo viene utilizzato nei [41],[42],[14]. questo è un protocollo di sincronizzazione *Sender-Receiver* (come il TTS). È composto da due fasi fondamentali, quali la fase di rilevamento del livello e la fase di sincronizzazione. Nella prima fase viene assegnato ad ogni nodo della rete un livello. Il livello 0 viene assegnato solamente ad un nodo e questo è chiamato nodo radice, il quale può essere collegato ad un orario esterno di riferimento. Questo quindi invia un certo *timing packet* ai nodi vicini, e a quelli che lo ricevono viene assegnato il livello 1. Questi poi inviano a loro volta un *timing packet* ai nodi vicini assegnando loro il livello n superiore e questo processo continua finché a tutti i nodi della rete non è assegnato un livello. Nella seconda fase, il nodo radice invia un pacchetto di sincronizzazione (*time-sync packet*) per richiedere ai nodi di livello 1 informazioni sull'orario, e così accade lo stesso fra tutti gli altri nodi della rete. Il nodo A invia un *time-sync packet* contenente il suo orario locale T_1 , mentre il nodo B lo riceve all'istante T_2 che può essere calcolato come:

$$T_2 = T_1 + T_d + \Delta$$

dove, T_d è il ritardo dovuto alla propagazione mentre Δ è lo spostamento temporale fra i due nodi e si presume costante nello scambio di informazioni. In seguito il nodo B ad un certo istante T_3 invia un *timing packet* che include i valori di T_1 , T_2 , T_3 e del suo livello al nodo A, il quale poi può quindi calcolare il valore di T_d e Δ nel seguente modo:

$$\Delta = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2} \quad T_d = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2}$$

In questo modo, il nodo A di livello n si sincronizza con il nodo B di livello $n-1$, tramite uno scambio di informazioni a due vie (dal nodo A al nodo B e viceversa) e questo procedimento continua per tutti i nodi della rete finché i nodi di livello n non siano tutti sincronizzati con i nodi di livello $n-1$ [39][48].

- FSTP (Flooding Time Synchronization Protocol): tale metodo viene utilizzato nei [43],[8],[9],[44],[25]. Solitamente questo tipo di protocollo viene utilizzato per sincronizzare reti di grandi dimensioni e la sincronizzazione avviene nel seguente modo: viene selezionato dinamicamente un nodo detto radice, il quale fungerà da nodo di riferimento per la sincronizzazione di tutti gli altri nodi della rete. Questo crea e trasmette un messaggio di sincronizzazione nel quale inserisce il suo *time packet* che sarà considerato come tempo globale per la sincronizzazione. Questo messaggio viene trasmesso a tutti i nodi nel raggio di trasmissione del nodo radice. I nodi che ricevono tale messaggio di sincronizzazione, registrano l'orario in cui hanno ricevuto il pacchetto e sono in grado di calcolare il loro offset, come la differenza tra l'orario globale (quello del nodo radice) e il loro, ossia quello locale. A loro volta, questi trasmettono ai nodi vicini un messaggio di sincronizzazione contenente il tempo della ricezione del messaggio e il proprio offset. In questo modo i nodi che ricevono quest'ultimo pacchetto sono in grado di calcolarsi la scala temporale a cui devono allinearsi. Questo processo viene ripetuto finché tutti i nodi della rete non ricevono un messaggio di sincronizzazione e sono sincronizzati. Per avere una sincronizzazione più accurata viene riprodotto tale processo più volte, in modo tale che ogni nodo abbia più coppie di tempo globale e offset in modo da poter sincronizzarsi più accuratamente [49].
- UTTM (*Untethered Time Transmission Mapping*), un algoritmo sviluppato per monitorare uno stadio di calcio in Georgia [27]. La sincronizzazione in questa rete avviene basandosi su 3 istanti di tempo: quello in cui il dato è rilevato dal sensore e quindi viene creato il *time packet* da inviare, quello in cui il *time packet* viene inviato e quello in cui il *time packet* viene ricevuto. In questa rete, a causa della mancanza di un buon segnale GPS e per risparmiare energia, viene utilizzato un approccio *GPS-free* e *beacon-free*, ossia la sincronizzazione fra i nodi avviene senza l'ausilio di

tali tecnologie. Questo può arrivare ad avere un'accuratezza nella sincronizzazione temporale di 200-300 μs con un'affidabilità del 95%, più precisamente il 95% dei dati raccolti mostravano , risultati più che adeguati per una rete strutturale un ritardo di soli 216 μs [27].

Relativamente alla sincronizzazione temporale nel [24] è stata progettata una rete WSN per il monitoraggio di ponti. La sincronizzazione in questa rete è molto accurata, circa 125 ns, molto meno rispetto ai 120 μs richiesti per avere un'elevata accuratezza in una rete. Per raggiungere tale obiettivo è stato utilizzato un modulo di sincronizzazione basato sul protocollo IEEE 802.15.4.

Nel [32], un sistema di monitoraggio low-cost è stato progettato e testato sulla torre della facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche, ad Ancona. L'obiettivo è quello di testare se un sistema low-cost può sostituire degnamente i sistemi di monitoraggio tradizionale e i loro conseguenti costi superiori. In questo sistema per quanto riguarda la sincronizzazione viene usato un *GPS-Shield* come orologio globale di riferimento e la conseguente sincronizzazione di tutti i nodi della rete con questo. Per mantenere la sincronizzazione fra i nodi della rete, viene introdotto anche il metodo RBS, scelto per la sua semplicità, performance e largo uso nella letteratura. In questo modo il valore massimo di errore raggiunto è di circa 6 ms, che è un risultato accettabile considerando che le vibrazioni nella struttura in considerazione sono di circa 10 Hz.

2.5 Applicazioni

Nella letteratura esistono numerosi elaborati riguardanti applicazioni di reti per lo sviluppo di sistemi di monitoraggio e applicazioni a ponti, edifici e infrastrutture reali.

Di seguito viene riportata una tabella (tabella 6) riassuntiva dei principali elaborati riguardanti le applicazioni di reti WSN per il monitoraggio strutturale ed infine alcuni esempi più dettagliati di applicazioni in strutture e infrastrutture reali.

Autore	Anno	Rif	N. nodi	Protocollo Wireless	Applicazione
Lynch	2003	[50]	\	Proxim RangeLAN2 radio modem	Ponte Alamosa Canyon in New Mexico
Hedley	2004	[51]	200	data link layer protocol, Link Control Protocol (LCP)	sviluppo di CSIRO, rilevazione impatti veicoli spaziali
Lynch	2005	[40]	14	\	Monitoraggio del ponte Geumdang in Korea del sud
Nagayama	2007	[52]	\	protocollo ARQ modificato	Smart sensing technology
Leon	2007	[53]	\	\	Test di simulazione su EMP60 power system model
Kim	2007	[8]	64	\	Golden Gate Bridge di San Francisco, California
Cho	2008	[11]	\	\	Sistemi per il monitoraggio per lo SHM
Chin	2008	[54]	56	\	Test su struttura edile in cemento armato
Meyer	2009	[15]	\	\	Sistema di monitoraggio strutturale basato sui MEMS
Jiang	2009	[41]	\	IEEE 802.15.4 , ZigBee	Monitoraggio edifici, ponti e strade
Whelan	2009	[13]	30	IEEE 802.15.4	Ponte autostradale a fine servizio
Cerioti	2009	[14]	\	routing protocol developed by the autors	Torre Aquila, Trento
Swartz	2010	[16]	4	\	Monitoraggio di turbine a vento
Park	2010	[17]	\	\	progettazione di nodi intelligenti per monitoraggio di ponti
Naticchia	2010	[1]	\	ZigBee standard IEEE 802.15.4	Prototipo sistema di monitoraggio accurato e versatile
Goldoni	2010	[42]	\	IEEE 802.15.4, PRISM	W-TREMORS, sistema di rilevamento wireless
Jang	2010	[19]	70	FTP File Transfer Prtocol	Monitoraggio del Jindo Bridge, Korea del Sud
Weiss	2011	[43]	\	IEEE 802.15.4, 2.4 GHz ISM,MQTT	sistema ad alta efficienza energetica per il monitoraggio di vibrazioni sismiche
Antonacci	2011	[20]	15	\	Monitoraggio della Basilica di S. Maria di Collemaggio
Papanikolas	2011	[21]	\	\	monitoraggio ponte Rion Antirion in Gracia
Chae	2012	[23]	\	ZigBee (IEEE 802.15.4), Code Division Multiple Access (CDMA)	sviluppo di una WSN per un ponte sospeso
Araujo	2012	[24]	\	ZigBee radio protocol	sistema di monitoraggio ad alta accuratezza, testato su 3 ponti reali
Tang Yu-liang	2012	[44]	\	ZigBee Protocol	WSN per monitoraggio online
Kohler	2013	[25]	10	\	Sviluppo di ShakeNet
Cheng	2013	[2]	\	IEEE 802.15.4 Protocol	Sistema di accumulo di energia per una rete SHM
Berešík	2014	[55]		\	Sistema di rilevamento sismico per rilevare attività umane e movimenti di veicoli

Sabato	2014	[26]	\	\	Board accelerometrica per misurare vibrazioni strutturali
Gonzalez	2015	[29]	\	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) protocol	Sviluppo di una Wsn per il SHM usando l'accelerometro interno degli smartphone
Raju	2015	[30]	3	IEEE 802.15.4 standard based TIMAC protoco	implementazione di una rete WSN per lo SHM su edifici civili
Giammari ni	2015	[31]	\	IEEE 802.15.4, ZigBee	Sistema flessibile e adattabile per il monitoraggio di edifici
Phanish	2015	[27]	50	IEEE 802.15.4	Bobby Dodd Stadium, Atlanta, Georgia
Pierleoni	2018	[56]	\	\	Applicazioni sismiche, testato durante il sisma del 2016 2017 nel centro Italia
Conti	2018	[32]	2	based on 802.15.4 standard	Monitoraggio Università Politecnica delle Marche con sistemi MEMS low-cost
Gentile	2019	[33]	\	\	Monitoraggio costante del Duomo di Milano
Muttillo	2019	[57]	\	\	sviluppo di un sistema automatico indoor per lo SHM
Selvakum aran	2019	[58]	\	\	InSAR - Satellite Interferometric Synthetic Aperture Radar
Vishnu	2020	[34]	\	FTP File Transfer Protocol	Sviluppo di una WSN low cost per infrastrutture civili.

TABELLA 6 ELABORATI RIGUARDANTI APPLICAZIONI DELLO SHM.

2.5.1 Golden Gate Bridge



FIGURA 3 IL GOLDEN GATE BRIDGE, CALIFORNIA. [59]

Nel Golden Gate Bridge di San Francisco è impiegata una WSN costituita da 64 nodi e si sviluppa lungo la campata principale e nella torre sud del ponte. Questa

misura le vibrazioni ambientali ad una frequenza di 1kHz con un ritardo di sincronizzazione pari a meno di 10 μ s e un'accuratezza di 30 μ G. I dati campionati sono raccolti da una rete a 46-hop, con una larghezza di banda pari a 441B/s al 46-esimo hop. Per quanto riguarda la sincronizzazione il protocollo usato è il FSTP. La componente hardware consiste nella Board TinyOS, la quale comprende oltre a un termometro anche gli accelerometri ADXL 202E, per rilevare vibrazioni più forti quali possono essere quelle causate da un terremoto e un SiliconDesigns 1221L, adibito al rilevamento di vibrazioni ambientali, del vento o causate dal traffico. Le principali caratteristiche di questi due accelerometri sono riassunte nella seguente tabella [8].

	ADXL 202E	Silicon Designs 1221L
Type	MEMS	MEMS
Range of System	-2G to 2G	-0.1G to 0.1G
System noise floor	$200(\mu G/\sqrt{Hz})$	$32(\mu G/\sqrt{Hz})$
Price	\$10	\$150

TABELLA 7 CARATTERISTICHE ACCELEROMETRI GOLDEN BRIDGE. [8]

2.5.2 Jindo Bridge



FIGURA 4 IL JINDO BRIDGE, KOREA DEL SUD. [60]

La WSN installata sul Jindo Bridge in Korea del Sud è la più vasta rete di monitoraggio su una infrastruttura civile. Essa è composta da 70 nodi e 2 stazioni

base e si estende su tutti i 484 metri di lunghezza del ponte, di cui 344 m occupano la campata principale e 70 metri quella iniziale e finale. La componente hardware utilizzata consiste di un nodo gateway collegato al pc della stazione di base e altri nodi alimentati da batterie ricaricabili e pannelli solari, lontani dalla stazione base. Sono impiegati due tipi di board, la SHM-A per misurare le vibrazioni e la SHM-W dotata di un anemometro, essendo il vento la maggiore fonte di vibrazione per il ponte. Ogni nodo è formato da un Imote2, una board di alimentazione IBB2400CA e una board SHM-A. in quest'ultima l'accelerometro impiegato è un LIS344ALH della STMicroelectronics, il quale ha un range di misurazioni di $\pm 2g$ e una risoluzione dell'ADC pari a 16 bit. Essa possiede anche sensori di temperature, umidità e luce. La SHM-W, è una modifica della SHM-A dotata di 3 input 0-5V e un canale per l'accelerazione, in grado di poter raccogliere ed elaborare dati provenienti da un anemometro (in questo caso un RM Young Model 81000). La SHM-A e la SHM-W condividono gli stessi drivers e quindi i dati sull'accelerazione raccolti dalla prima e quelli sul vento raccolti dalla seconda sono perfettamente sincronizzati [19].

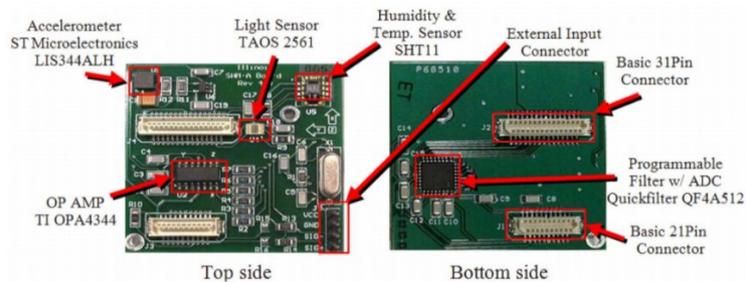


FIGURA 5 BOARD SHM-A [19]

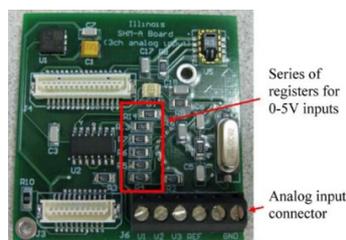


FIGURA 6 SHM-W.[19]

2.5.3 Torre Aquila



FIGURA 7 TORRE AQUILA, ITALIA. [14]

Un'altra applicazione di WSN è stata sviluppata per il monitoraggio di Torre Aquila, una torre medievale di 31 m situata nella città di Trento nel nord Italia. L'hardware utilizzato prevede una piattaforma 3MATE! dell'azienda TRETEC, un nodo WSN facilmente estensibile. I nodi in questa rete sono suddivisi a seconda dei parametri misurati e i loro obiettivi di rilevamento. Per quanto riguarda il monitoraggio di vibrazioni è stato usato l'accelerometro ST LIS3L02AL situato su una piattaforma 3MATE! modificata e connessa al nodo principale tramite cavo. Questo ha un range di misura di $\pm 2g$ ed è in grado di misurare accelerazioni su una larghezza di banda di 1.5KHz con una risoluzione di 1mg per 100Hz di larghezza di banda. Per quanto riguarda il monitoraggio della deformazione è stato sviluppato un sensore a fibra ottica e una board di estensione per la 3MATE!. Per il monitoraggio di fattori ambientali è stato sviluppato un'estensione per la 3MATE! contenente sensori per la temperatura, umidità e sensori per la luce. La sincronizzazione utilizzata in questa rete viene utilizzata una versione leggermente modificata del TSPN [14].

2.5.4 Basilica di S. Maria di Collemaggio



FIGURA 8 BASILICA DI SANTA MARIA DI COLLEMAGGIO, ITALIA. [61]

Un sistema di monitoraggio costante è installato anche nella Basilica di Santa Maria di Collemaggio situata a L'Aquila in Abruzzo, in seguito al sisma dell'Aprile del 2009 che ne ha causato parziale collasso. La rete di monitoraggio di questa struttura è costituita da accelerometri, fessurimetri e inclinometri situati nei punti opportunamente selezionati.

Per quanto riguarda la rete accelerometrica, essa è costituita da 15 nodi wireless. Ogni nodo è composto da una piattaforma Imote2 modello IPR2420, dotata di CPU e scheda radio, adibita alla comunicazione e trasmissione di dati wireless; dalla board ISM400 sviluppata dall' Illinois Structural Health Monitoring Project, sulla quale vi è installato un accelerometro LIS344ALH della ST Microelectronics le cui caratteristiche sono riportate nella *tabella 8* ed altri sensori per l'umidità, la temperatura e di luce a raggi infrarossi e una scheda PSB impiegata per l'alimentazione elettrica delle precedenti componenti.

Oltre agli accelerometri in questa rete sono impiegati 8 fessurimetri il cui scopo è quello di monitorare le lesioni interne alla basilica collegato alla scheda wireless tramite cavo schermato e morsettiera e 3 inclinometri i quali sono utilizzati per valutare la perdita di verticalità delle pareti del transetto e dell'abside della basilica[20].

Parameter	Test condition	Min	Typical specification	Max	Unit
Sensitivity	Full scale = $\pm 2g$	$V_{dd}/5 - 5\%$	$V_{dd}/5$	$V_{dd}/5 + 5\%$	V/g
Sensitivity change Vs Temperature	Delta from +25 °C		± 0.01		%/°C
Zero-g level	Full scale = $\pm 2g$; T = 25 °C		± 0.4		mg/°C
Zero-g level change Vs Temperature	Delta from +25 °C		± 0.4		mg/°C
Cross axis			± 2		%
Acceleration noise density	$V_{dd}=3.3$ V; Full scale = $\pm 2g$		50		$\mu g/\sqrt{Hz}$
Operating temperature range		-40		+85	°C
Product weight				0.04	gram

TABELLA 8 CARATTERISTICHE LIS344ALH [20].

2.5.5 Duomo di Milano



FIGURA 9 DUOMO DI MILANO, ITALIA. [33]

Come si può leggere nel [33], recentemente, è stata progettata una rete di vari sensori per il monitoraggio strutturale del Duomo di Milano, firmata Politecnico di Milano e l'istituzione *Veneranda Fabbrica del Duomo di Milano*.

Tale rete di monitoraggio comprende diverse tipologie di misurazioni e sensori. Essa impiega degli estensimetri a filo vibrante per monitorare le deformazioni quasi-statiche di certi tiranti all'interno del duomo, degli inclinometri con compensazione individuale di effetti della temperatura per monitorare le rotazioni quasi-statiche a 3 livelli della guglia principale (*figura 12*), dei sensori elettrodinamici, per monitorare la velocità, posizionati negli stessi punti del precedente e altri sensori per monitorare la temperatura e l'umidità sia interne che esterne.

Le misurazioni quasi-statiche e quelle relative ai fattori ambientali sono rilevate una volta ogni 2 ore, mentre per quanto riguarda quelle dinamiche avviene con una frequenza di campionamento pari a 100 Hz.

Per quanto riguarda le misurazioni quasi-statiche più nel dettaglio, il sistema di monitoraggio è composto da:

- 12 estensimetri a filo vibrante con un range di misura pari a $\pm 3000 \mu\epsilon$ e una risoluzione di $1 \mu\epsilon$;
- 12 inclinometri biassiali con un range di misura pari a $\pm 0.5^\circ$ e una risoluzione di $\pm 0.5 \text{ mm/m}$ posizionati all'interno della Cattedrale sulla sommità di determinati piloni (per maggiori dettagli [33]).
- 3 inclinometri biassiali installati a 3 differenti altezze della guglia principale;
- Sensori di temperatura (integrati con gli inclinometri), sia interni che esterni con range di temperatura da -20°C - $+60^\circ\text{C}$ e risoluzione di 0.2°C .
- 12 igrometri con un range di misura 0-100% e risoluzione dell'1%, posizionati in corrispondenza degli estensimetri;
- 1 stazione meteo posizionata sulla sommità della guglia principale, per la valutazione di parametri relativi al vento. La frequenza con cui vengono raccolti dati da essa è ogni 5 minuti.

Tutti questi elementi sono alimentati da batterie ad alta capacità. Con la frequenza di misurazione di 2 volte all'ora, il tempo stimato di funzionamento prima di sostituire le batterie è di circa 3 anni.

Invece per quanto riguarda le misurazioni dinamiche più nel dettaglio, queste sono affidate al sismometro SARA SS45, dotato di un'alta sensibilità di 78 V/[m/s]

e ottime performance a basse frequenze (≤ 100 Hz). Il monitoraggio dinamico è composto da:

- 13 sismometri biassiali e 1 mono assiale posizionati in cima a determinati piloni all'interno del Duomo che misurano la velocità sia in direzione longitudinale che trasversale.
- 3 sismometri monoassiali che affiancano gli inclinometri biassiali nei 3 punti della guglia principale (in totale quindi 9 sismometri monoassiali).

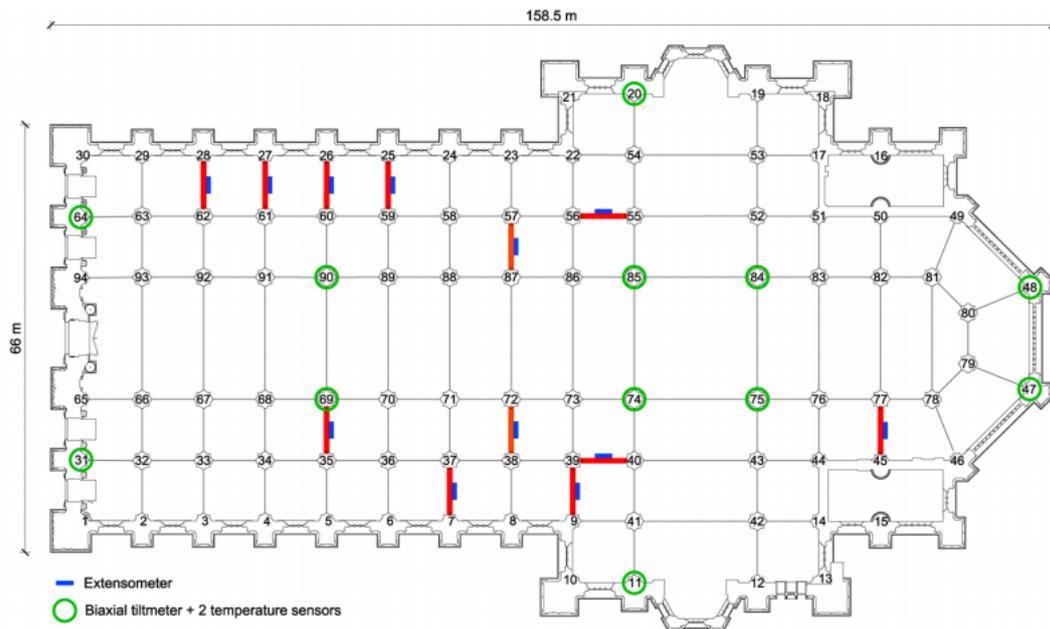


FIGURA 10 POSIZIONAMENTO ESTENSIMETRI E INCLINOMETRI ALL'INTERNO DELLA CATTEDRALE DI MILANO. [33]

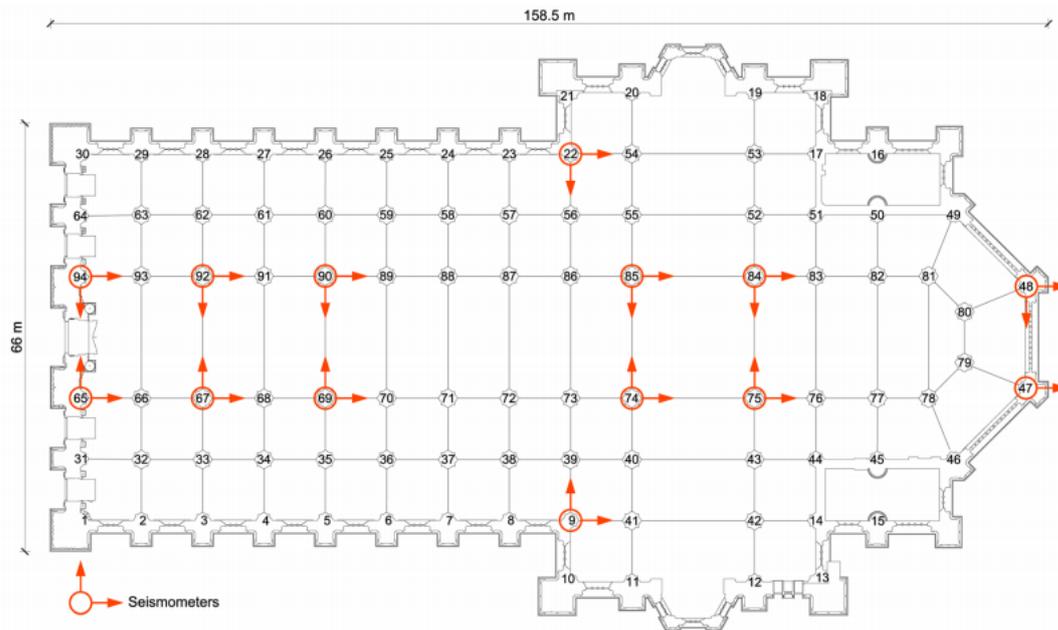


FIGURA 11 POSIZIONAMENTO SISMOMETRI ALL'INTERNO DELLA CATTEDRALE DI MILANO. [33]

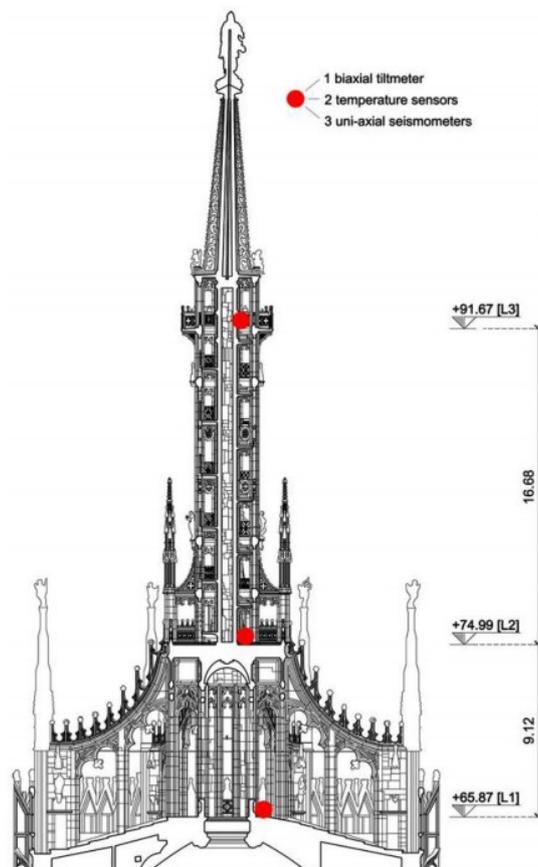


FIGURA 12 POSIZIONAMENTO SENSORI NELLA GUGLIA PRINCIPALE. [33]

2.5.6 Rion Antirion Bridge – “Charilaos Trikoupis”



FIGURA 13 PONTE RION ANTIRON - "CHARILAOS TRIKOUPIS", GRECIA. [62]

Il Rion Antirion “Charilaos Trikoupis” è un ponte che collega la Grecia continentale al Peloponneso. È lungo 2252 m ed è diviso in 5 campate, 3 principali centrali lunghe 560 m e 2 lunghe 286 m posizionate all’inizio e alla fine, sorrette, per mezzo di cavi, da 4 piloni alti dai 189 ai 227m.

Per quanto riguarda il sistema di monitoraggio di questo ponte, è possibile dividerlo in 4 livelli, ossia: sensori utilizzati, alimentazione e trasferimento dei segnali, conversione acquisizione ed elaborazione dei segnali, comunicazione e data management.

- Sensori: sono impiegati un vasto numero e tipologie di sensori ad esempio accelerometri anemometri, sensori di temperatura e umidità, estensimetri. Nella *tabella 9* sono riportati nel dettaglio la quantità e le principali caratteristiche e ruoli di questi.
- Alimentazione: per quanto riguarda l'alimentazione e rendere possibile il raggiungimento di tutti i sensori posizionati su tutto il ponte, sono installate delle scatole di derivazione contenenti un trasformatore AC/DC (~230 / 24 VDC). All'interno di quest'ultime, il segnale di alcuni sensori (i più lontani dall'unità di acquisizione) sono amplificati e trasmessi via cavo all'unità di acquisizione. Inoltre, per sicurezza, è stato installato anche un sistema di

dispositivi UPS che fungono da generatori d'emergenza per far essere sempre funzionante l'intero sistema.

- Conversione acquisizione ed elaborazione dei segnali: Sono installate 4 differenti unità di acquisizione, una su ogni pilone. In ogni unità avvengono i seguenti processi: filtro passa-basso a 10 kHz, campionamento del segnale a 500 Hz, conversioni in Engineering Units, controllo costante della soglia dei parametri, creazione e trasmissione dei dati. Inoltre, essendo la sincronizzazione un fattore fondamentale nel monitoraggio strutturale, tutto il sistema è sincronizzato per mezzo del protocollo SNTP (*Simple Network Time Protocol*), una variante semplificata dell'NTP.
- Comunicazione e data management: per quanto riguarda la comunicazione delle varie unità di acquisizione e la stazione di controllo centrale, viene usato un sistema di cablaggio a fibre ottiche installato lungo il ponte. In questo modo dalla stazione di controllo è possibile vedere i dati in tempo reale e accedere per modificare parametri, soglie e avere un ulteriore sicurezza nel monitoraggio [21].

Sensor	Quantity	Expected range of values	Actual sensor range	Monitored phenomenon
3D anemometers	2	0-50 m/sec	0-60 m/sec	Wind intensity
Temperature and Humidity sensor	2	50° C/0-100%RH	-50°C, up to 50°C/ 0-100% RH	Thermal loading
3D Pylon accelerometers	12	±1.9g (top) ±1.0g(base)	±20g(top) ±3g(base)	Pylon vibration (Earthquake/wind)
1D/3D Deck accelerometers	3/12	±2.7g	±3g	Deck vibration (Earthquake/wind)
3D Ground accelerometers	2	±0.48g	±3g	Earthquake
3D Cable accelerometers	13	-	±3g	Cable vibration Wind
Monostrand load of cables	16	0 up to 75% F_{GUTS} (199 kN)	0-320 kN	Cable load variation (Wind/Earthquake/Balance)
Magnetic distance meter	2	+1260/-1150 mm	3 m	Expansion joint opening (Earthquake/Balance/Thermal)
Strain gauges (full bridge)	4	±10500 kN	±1500με ±17000 kN	Wind induced lateral load
Road temperature sensors	4	-	-50°C, up to 50°C	User safety (black ice risk)
Deck temperature sensors	5	-	-10°C, up to 80°C	Thermal loading

TABELLA 9 SENSORI DI MONITORAGGIO SUL PONTE RION ANTIRON [21]

3 Progetto

Per quanto riguarda la pratica relativamente al monitoraggio strutturale, sono stati effettuati vari test di performance con un sensore low-cost della casa produttrice Analog-Device modello ADXL 355Z.

I test sono stati effettuati utilizzando come hardware l'accelerometro ADXL355Z, il microcontrollore ESP8266 e vari oggetti per testare i differenti condizioni le performance dell'accelerometro, quali una mensola di metallo per simulare oscillazione, dei pesi da 0.8Kg sui quali è possibile avvitare saldamente l'ADXL355Z per testarlo in diverse condizioni, sia in posizione orizzontale, che verticale.

3.1 Hardware Utilizzato

3.1.1 Analog Device ADXL355Z

L' Analog Device ADXL 355 è un accelerometro MEMS digitale, dotato di convertitore analogico-digitale da 20-bit integrato. Esso supporta la configurazione di filtri integrati agendo su opportuni registri e permette la comunicazione sia tramite il protocollo SPI sia tramite quello i2c.

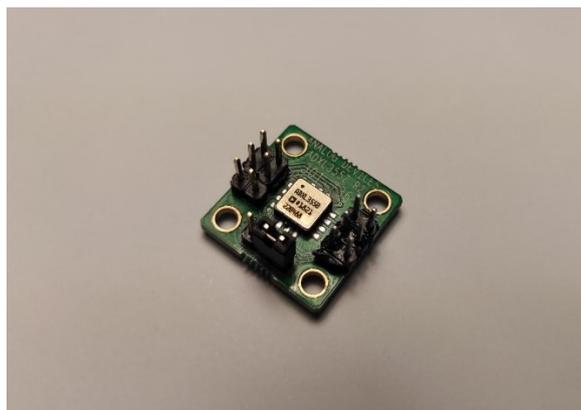


FIGURA 14 ADXL355Z.

Tale accelerometro, come tutti quelli MEMS misura l'accelerazione calcolando la differenza di capacità fra due micro-masse inerziali.

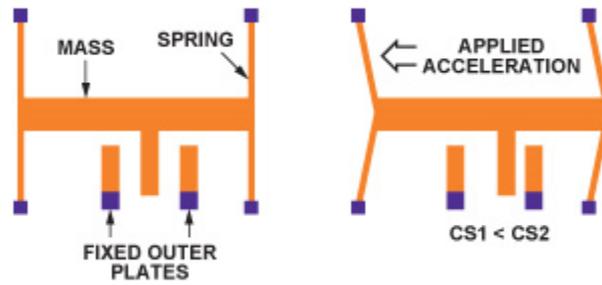


FIGURA 15 ELETTRDI FISSI E MOBILI [63]

Ci sono degli elettrodi fissi e degli elettrodi liberi di muoversi. In assenza di forze sull'accelerometro, i due elettrodi sono in quiete l'uno rispetto all'altro, così come è costante la capacità fra essi, ma una forza che agisce sull'accelerometro provocherà uno spostamento dell'elettrodo mobile rispetto a quello fisso, e grazie alla sua inerzia continuerà a muoversi variando la distanza fra esso e l'elettrodo fisso. Proprio questo movimento causa una differenza di capacità fra gli elettrodi la quale poi viene poi convertita e campionata dall' ADC integrato nell'accelerometro per poter essere analizzata[64].

TABELLA 10 SPECIFICHE ADXL355.

Parametro	ADXL355	Unità di misura
Sensitivity	400	mV/g
Measurement Range	±2, ±8	g
Noise Density	22.5	µg/√Hz
Bandwidth	1.9	kHz
Sensitivity change due to temperature	±0.01	%/°C
Power supply	2.25-3.6	V

3.1.2 Espressif System ESP8266

L'ESP8266 (figura 16), è una board low-cost che offre supporto completo al protocollo TCP/IP. È dotata di un microcontrollore a 32-bit e una porta hardware SPI tramite la quale è possibile collegare e comunicare con l'ADXL355Z. È dotata inoltre di un modulo Wifi ESP-12E con antenna a 2.4 GHz, il quale ne permette la comunicazione WiFi. Inoltre, tale scheda è programmabile attraverso Arduino IDE. Tutte le specifiche di questo dispositivo sono riportate nella tabella 11.



FIGURA 16 MICROCONTROLLORE ESP8266 [65]

TABELLA 11 SPECIFICHE ESP8266 [66]

Microcontrollore	Tensilica 32-bit RISC CPU Xtensa LX106
Tensione	3.3V
Tensione di alimentazione	7-12V
Digital input pins	16
Analog input Pins	1
Porte SPI	1
Porte I2C	1
Memoria flash	4 MB
Sram	64KB
Clock Speed	80MHz

3.1.3 Altri elementi per i test

Oltre ai componenti elettronici sopraelencati, per fornire varietà e diverse situazioni di test sono stati utilizzati altri elementi di supporto. Una mensola di alluminio dallo spessore di 1,5mm (*figura 19*), ancorata saldamente ad un tavolo piano, della quale viene variata la lunghezza; dei pesi di 0,8 kg (*figura 17-18*) ai quali è possibile avvitare l'ADXL355Z, sia in posizione orizzontale, sia in posizione verticale con l'ausilio di un supporto a T (*figura18*), da utilizzare sia insieme alla mensola che sul pavimento per rilevare le vibrazioni strutturali.

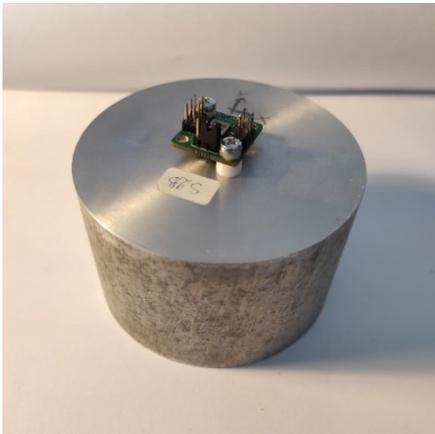


FIGURA 17

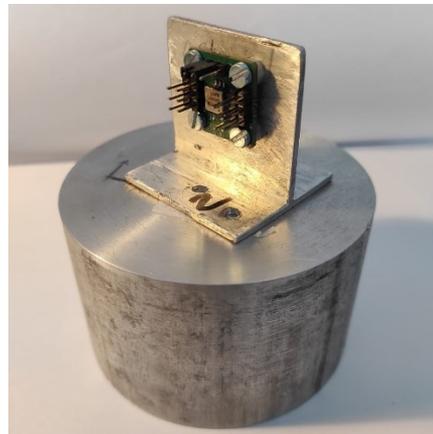


FIGURA 18

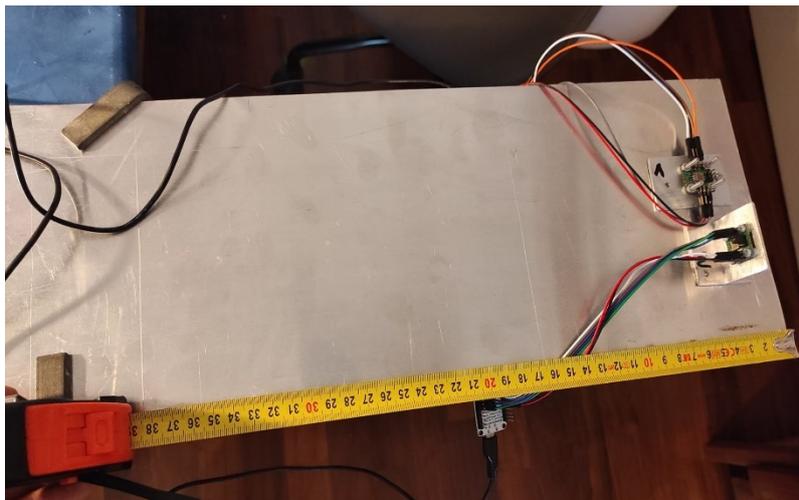


FIGURA 19 ESEMPIO DI SETUP CON LA MENSOLA.

3.1.4 Connessione ESP8266-ADXL355

Di seguito viene riportato per mezzo di una tabella lo schema di collegamento utilizzato per effettuare i test di prova. Per rendere il tutto più chiaro sono presenti anche gli schemi di pinout degli elementi coinvolti.

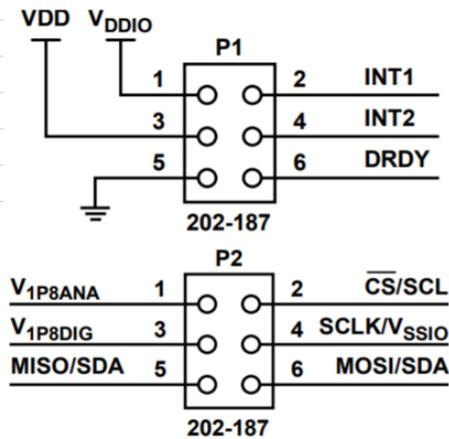


FIGURA 20 PINOUT ADXL355Z [67]

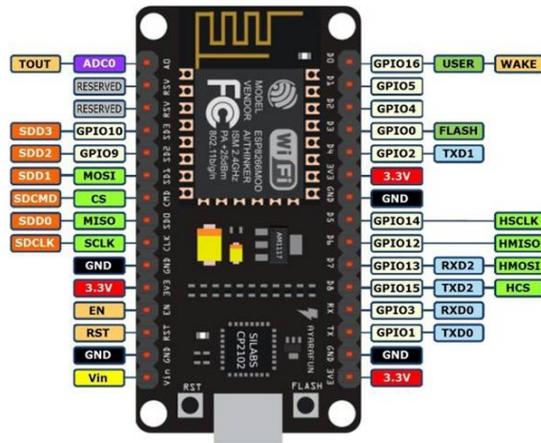


FIGURA 21 PINOUT ESP8266 [66]

ADXL355	ESP8266
P1-1	\
P1-2	\
P1-3	3.3 V
P1-4	\
P1-5	GND
P1-6	D3
P2-1	\
P2-2	D4
P2-3	\
P2-4	D5
P2-5	D6
P2-6	D7

TABELLA 12 COLLEGAMENTO FRA L'ACCELEROMETRO ADXL355Z E LA BOARD ESP 8266

3.2 Software

3.2.1 Rilevazione

Per quanto riguarda la parte software, è stato implementato un codice utilizzando Arduino IDE per l'acquisizione dei dati rilevati dall'accelerometro, caricato poi sulla board ESP8266.

Viene inizializzata la porta seriale con la funzione `Serial.begin(115200)`, con il corrispondente *baud rate* (in questo caso 115200) utilizzato per la comunicazione via seriale.

Per mezzo di una libreria creata ad hoc per l'ADXL355Z [64] per facilitarne l'utilizzo, viene inizializzato l'accelerometro per mezzo della funzione `accel.begin()` e vengono settati altri parametri per mezzo della scrittura sui registri, quali ad esempio l' *high pass filter* , frequenza di campionamento, range di misura. In questo caso non viene settato nessun filtro, la frequenza di campionamento è di 125Hz (per poi essere modificata a 500 e 4000 Hz) e il range di misura è di $\pm 2g$. In seguito tramite la funzione `millis()` viene settato un cronometro che tiene il tempo di esecuzione del programma.

Nel *loop* del programma una funzione *if* eseguirà un polling che, nel caso in cui l'accelerometro abbia effettuato la misura e i dati sono pronti per essere acquisiti dalla board, viene settata dalla *interrupt*, dichiarata inizialmente, per poi essere re-inizializzata in attesa di un'altra misurazione. I dati raccolti vengono letti e convertiti ed in seguito scritti sulla porta seriale secondo la seguente formattazione:

8.039	16.64063	-16.66406	1004.85547
8.047	29.74609	-18.10156	1005.19531
8.055	34.96484	-19.90625	1004.60938
8.063	33.66406	-18.74609	1007.41016
8.071	31.85547	-19.70703	1006.76563
8.079	29.58203	-21.73828	1004.58203
8.087	27.47266	-20.83984	1003.91406
8.095	25.00391	-19.92578	1004.61328

dove nella prima colonna si ha il tempo (in secondi) trascorso dall'inizio dell'esecuzione del programma, nelle altre in ordine sono riportate le misure delle

accelerazioni (in mg) rispettivamente lungo gli assi X,Y,Z rilevate dall'accelerometro .

3.2.2 Acquisizione dati

Per quanto riguarda l'acquisizione e la memorizzazione dei dati raccolti dall'ADXL355Z durante i vari test, è stato implementato uno script in Python3, attraverso il quale è possibile leggere la porta seriale indicata dall'utente, essendo l'ESP8266 dotata di un convertitore seriale-USB già integrato sulla board.

Per utilizzare tale script è stata utilizzata la Windows Powershell, lanciando la seguente stringa:

```
PS C:\Users\██████████\desktop> python .\serial_read.py --port=COM5 >> test_misura.txt
```

Con la funzione *python* si avvia lo *script serial_read.py*. Con la stringa *--port=* si seleziona la porta alla quale è connesso l'ESP8266 e con il simbolo *>>* vengono salvati i dati delle misurazioni raccolti dall'ADXL [64] in un file di tipo testo che permetterà poi di aprire e analizzare il segnale con MATLAB.

3.2.3 Elaborazione segnali con MATLAB

I segnali acquistati sono quindi importati nel software MATLAB dove viene facile analizzarli.

Per importare i file *.txt* precedentemente acquisiti contenenti il segnale da analizzare, viene utilizzata la funzione *dlmread* la quale poi restituisce una matrice avente numero di colonne e di righe pari a quelle del file di testo selezionato. In particolare in questo caso i file analizzati avranno 4 colonne, rispettivamente contenenti il valore del tempo e le accelerazioni rilevate lungo gli

assi X, Y e Z dell'accelerometro [64]. A questo punto per ogni segnale e quindi per ogni situazione analizzata viene riportato:

- un grafico nel dominio del tempo dell'intero intervallo di tempo misurato (univoco per i 3 assi) e corrispondente analisi in frequenza (uno per ogni asse);
- un grafico di uno zoom in un intervallo di rumore rilevato dal sensore in una situazione di quiete (univoco per i 3 assi) e corrispondente analisi in frequenza (uno per ogni asse);
- un grafico di uno zoom in un intervallo in cui è presente un impulso da circa 1000 mg a 500 mg (univoco per i 3 assi) e corrispondente analisi in frequenza (uno per ogni asse);

3.3 Misure

3.3.1 Misura 1

Per la prima misurazione il setup adottato è quello nelle *figure 22-23*, ossia sono presenti 2 accelerometri ADXL355Z, ancorati all'estremità della mensola ad una lunghezza di 35 cm. L'accelerometro numero 1 è posizionato in posizione orizzontale, mentre quello in posizione numero 2 in verticale tramite l'utilizzo del supporto a T. Non è stato applicato nessun filtro all'accelerometro e la frequenza di campionamento è di 125 Hz. Da notare che a causa della forza di gravità (1g), e il range di misura dell'accelerometro in questione pari a $\pm 2g$, nel primo tratto dell'impulso, accelerazioni maggiori di $\pm 2g$ non è stato possibile rilevarle, pertanto la misura dell'impulso sarà considerata dall'istante in cui inizia l'oscillazione fra $+1g$.

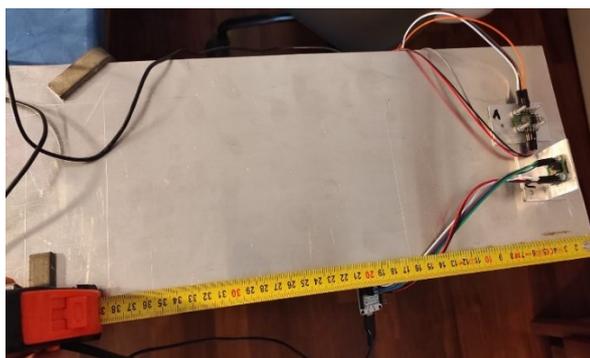


FIGURA 22 ACCELEROMETRI ADXL355Z ANCORATI ALLA MENSOLA.

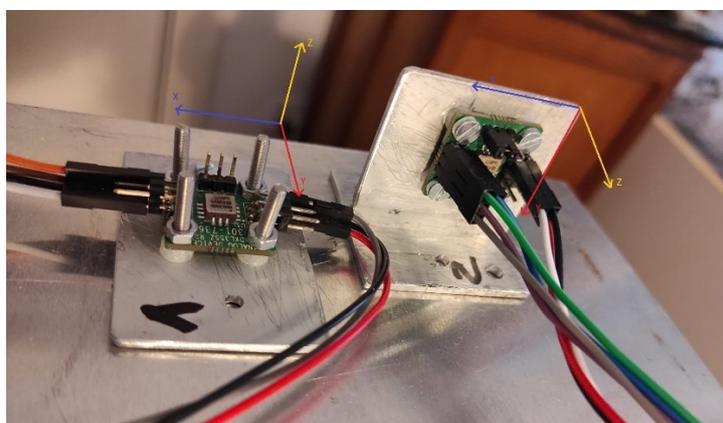


FIGURA 23 SETUP MISURA 1.

Di seguito sono riportati i grafici delle misurazioni rilevate conseguentemente ad una stimolazione.

Accelerometro ADXL355Z *numero 1*:

Intera misurazione:

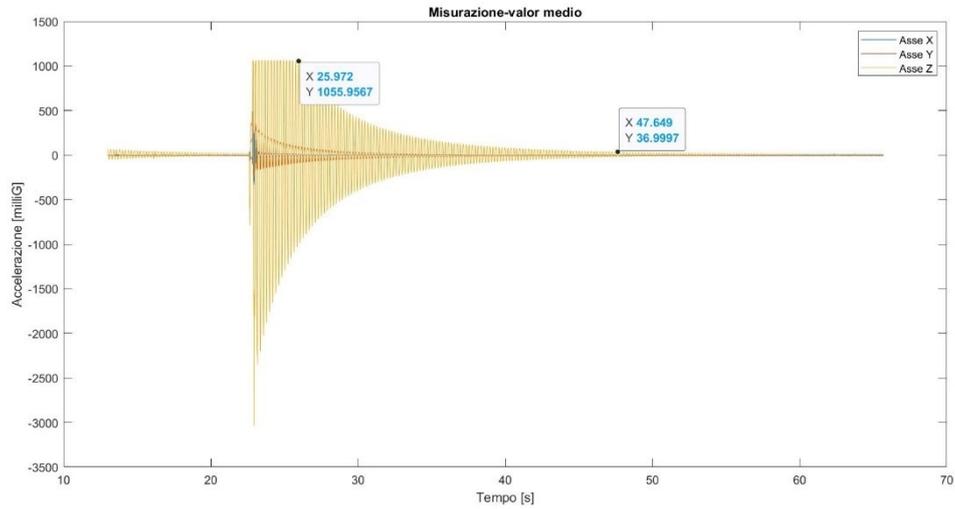


FIGURA 24

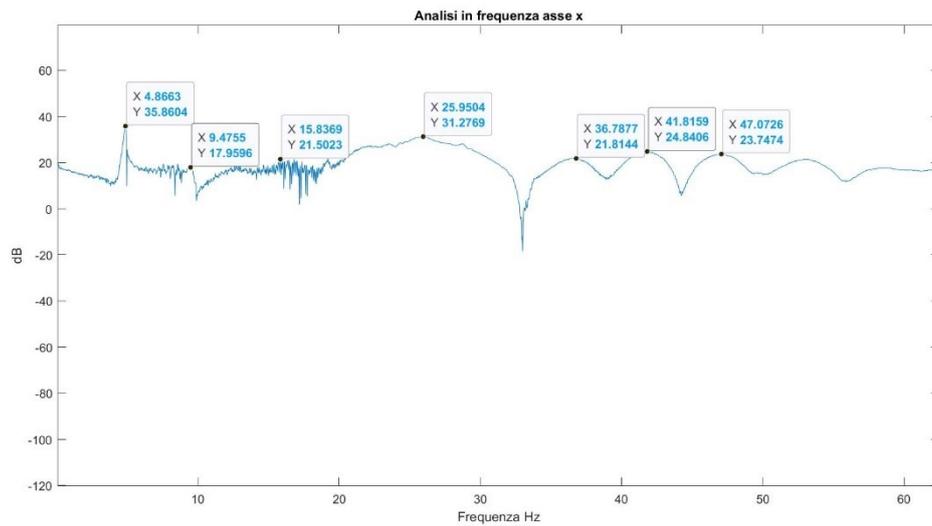


FIGURA 25

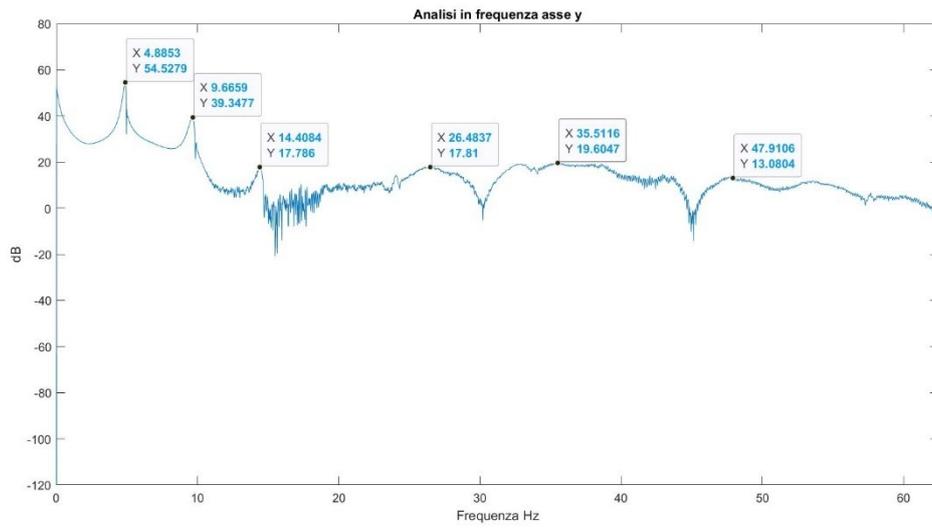


FIGURA 26

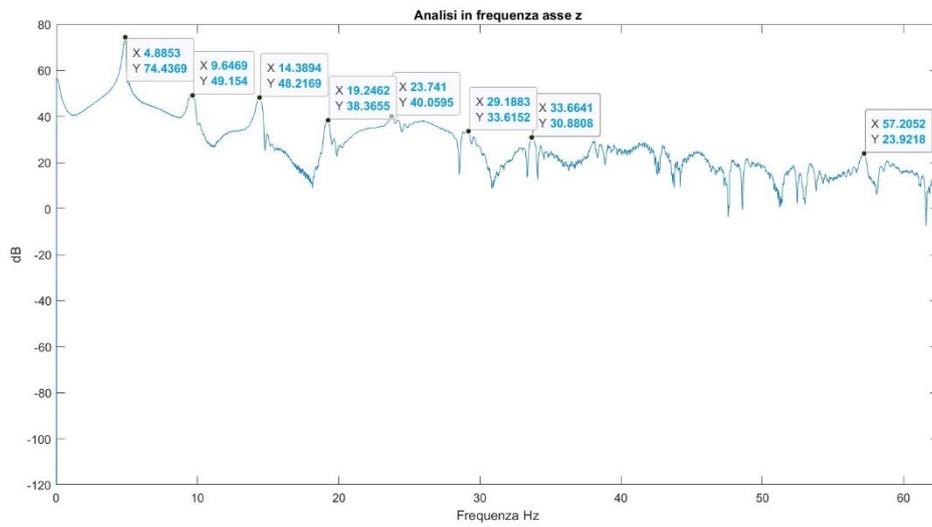


FIGURA 27

Zoom su intervallo di rumore: 16.5s – 22.5s

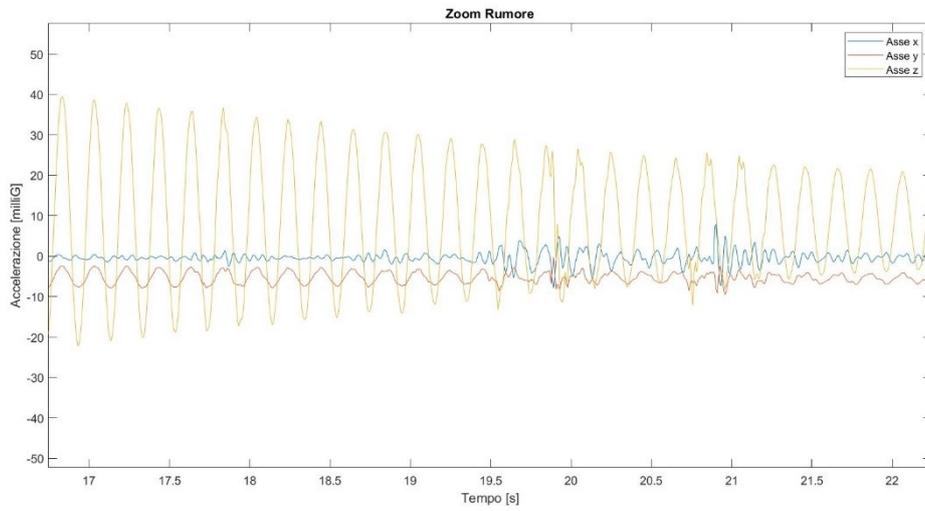


FIGURA 28

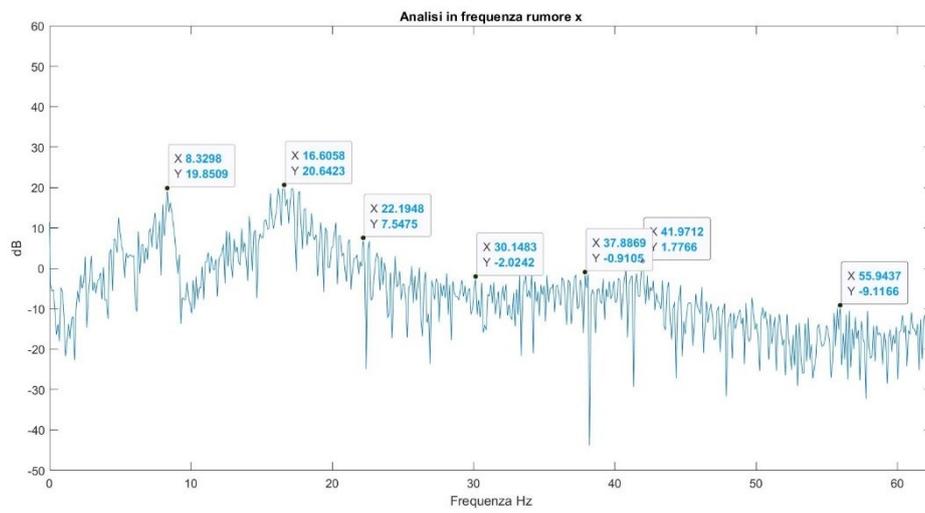


FIGURA 29

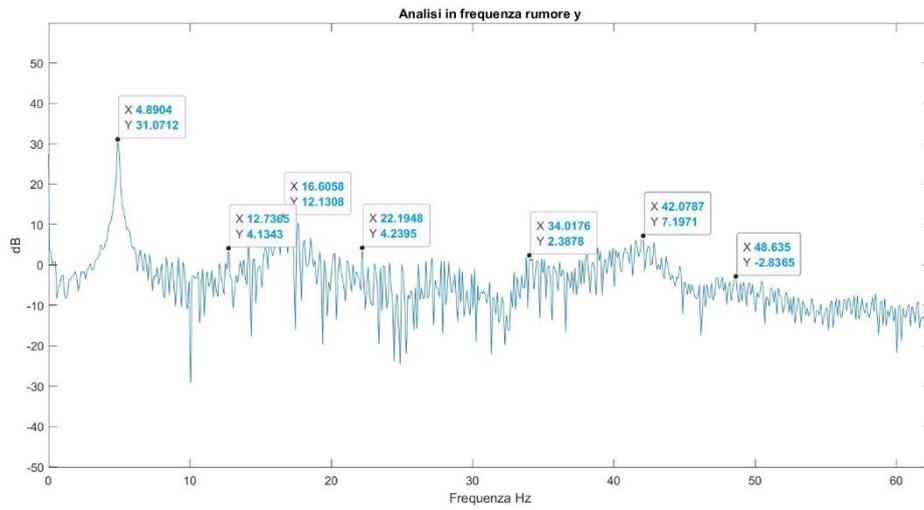


FIGURA 30

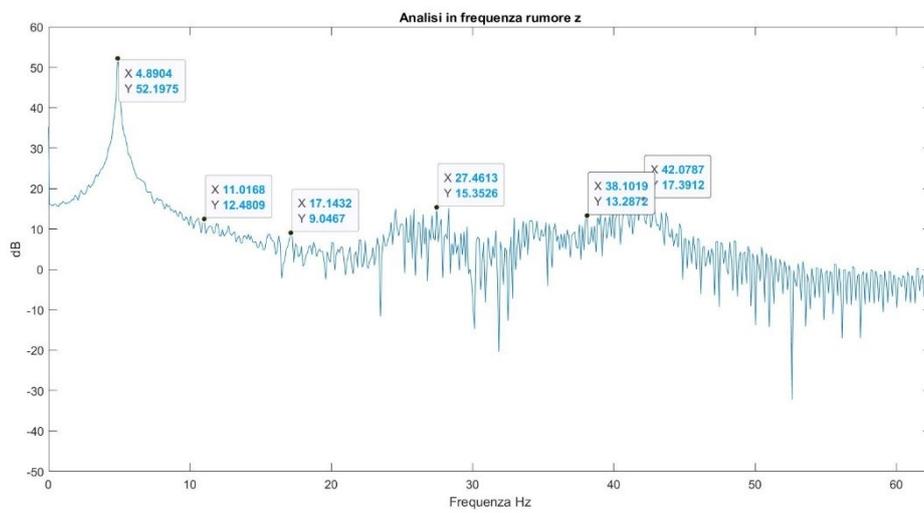


FIGURA 31

Zoom su impulso: 26s – 31s

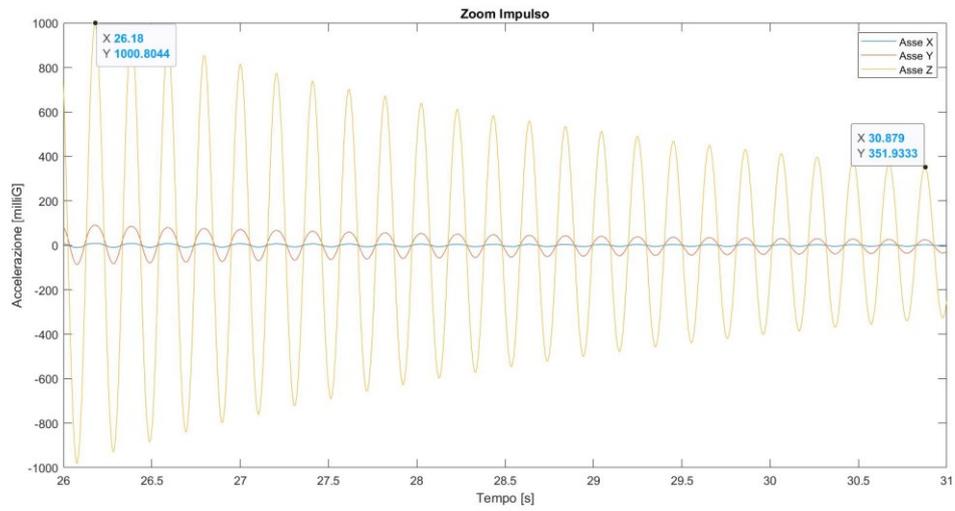


FIGURA 32

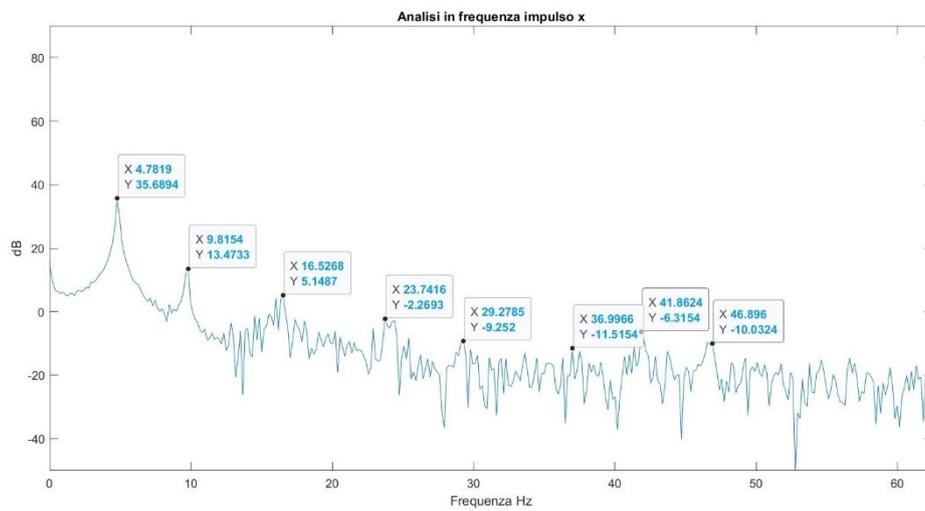


FIGURA 33

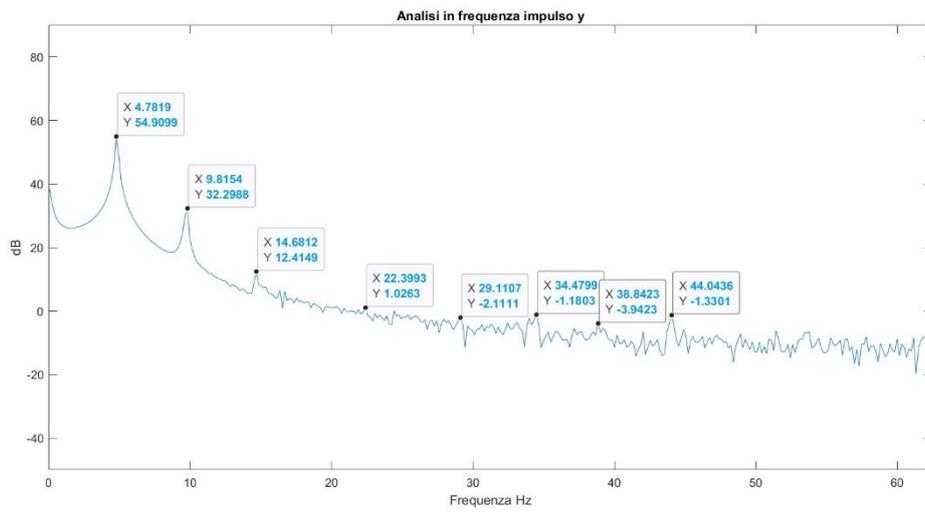


FIGURA 34

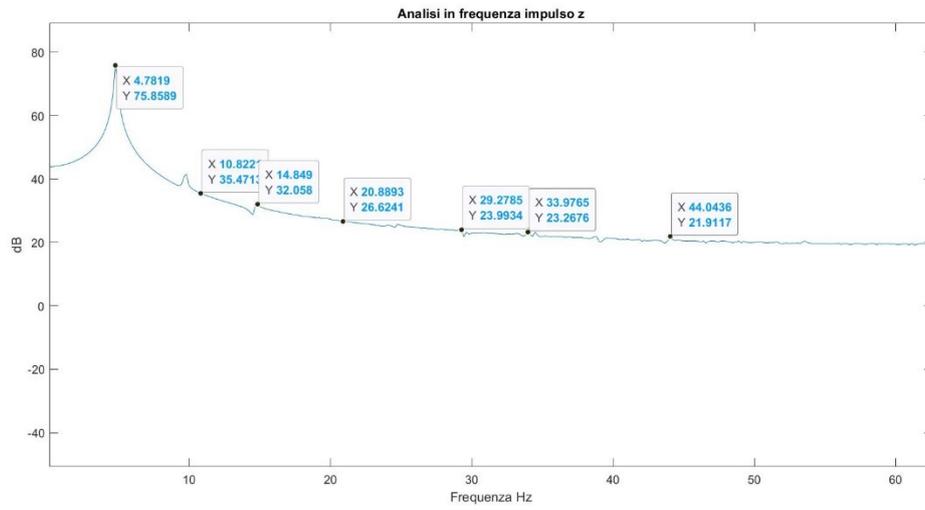


FIGURA 35

Accelerometro ADXL355Z numero 2:

Intera misurazione:

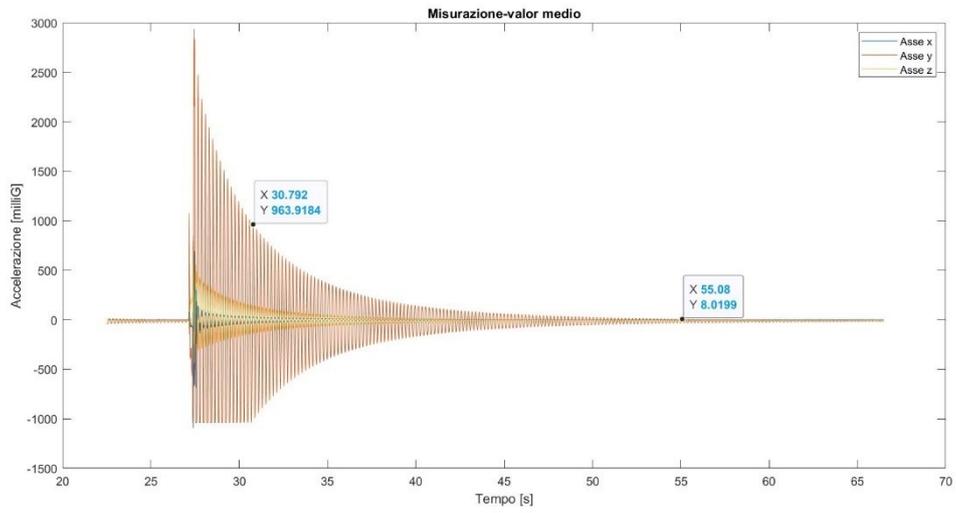


FIGURA 36

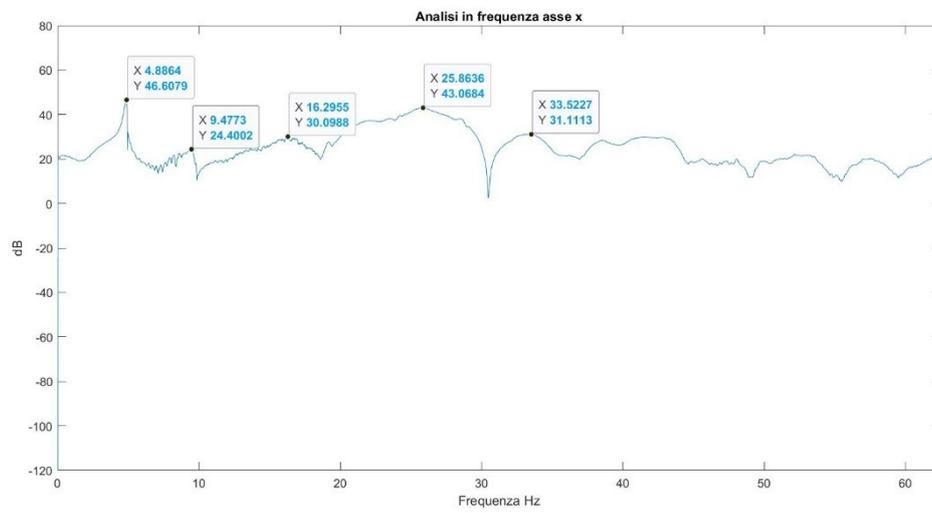


FIGURA 37

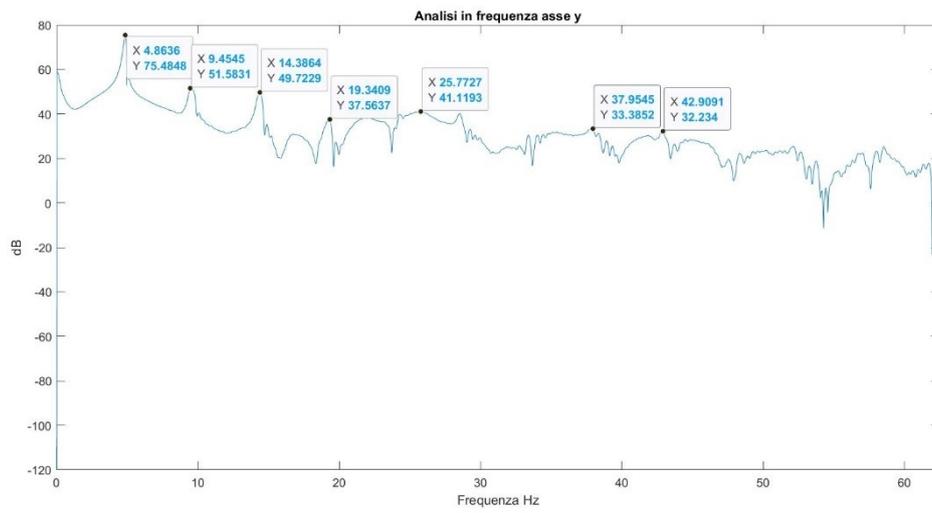


FIGURA 38

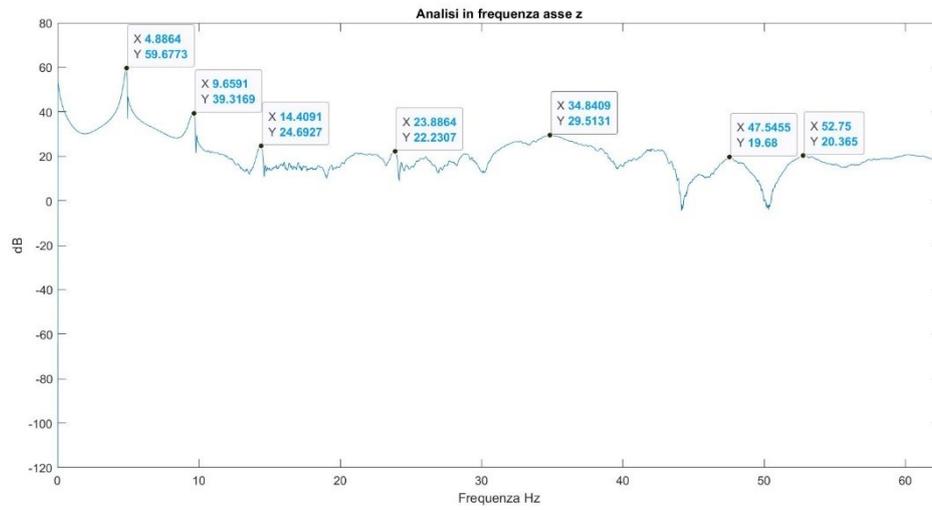


FIGURA 39

Zoom su intervallo di rumore: 22s - 27s

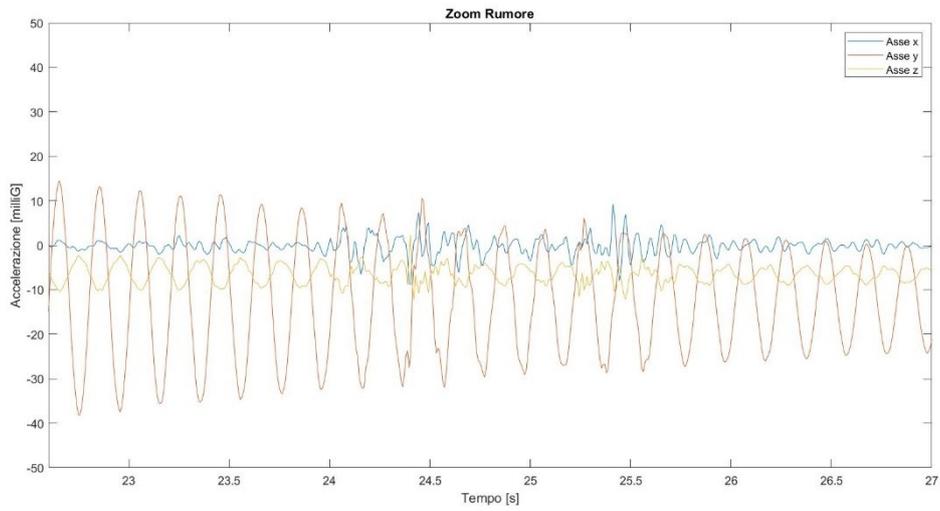


FIGURA 40

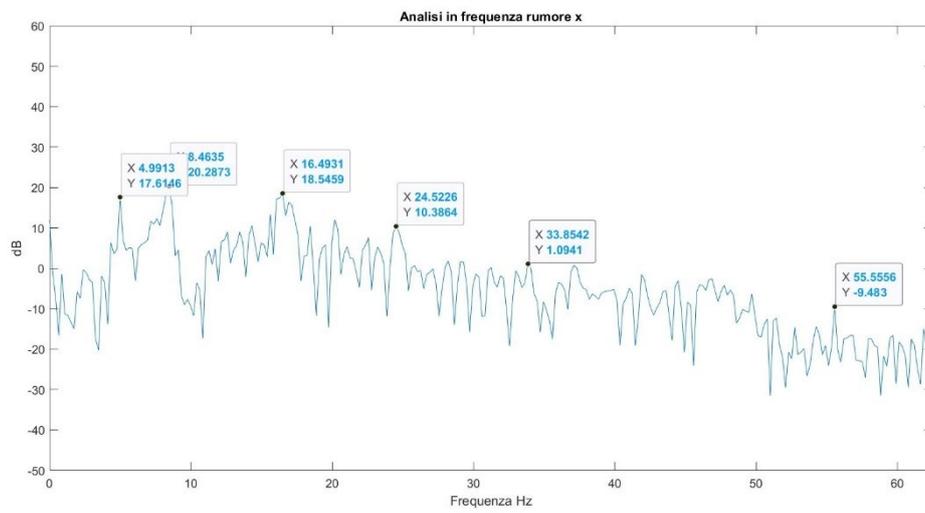


FIGURA 41

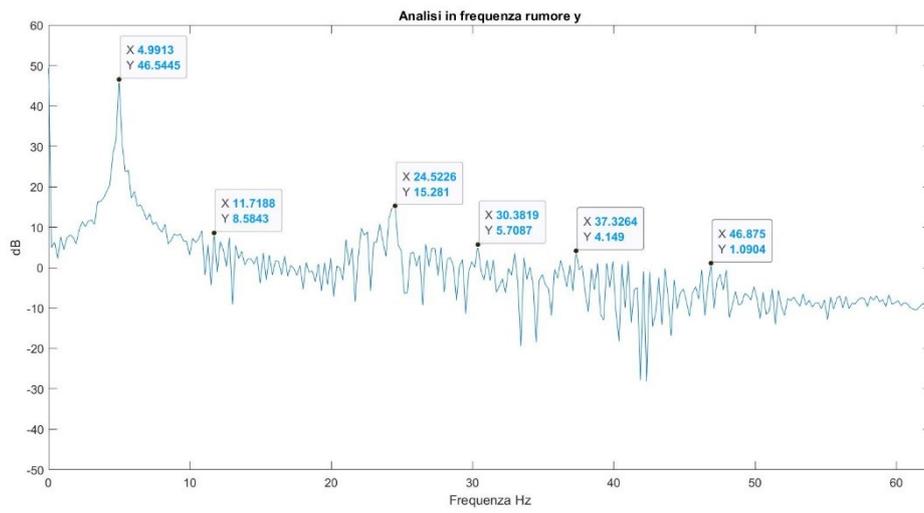


FIGURA 42

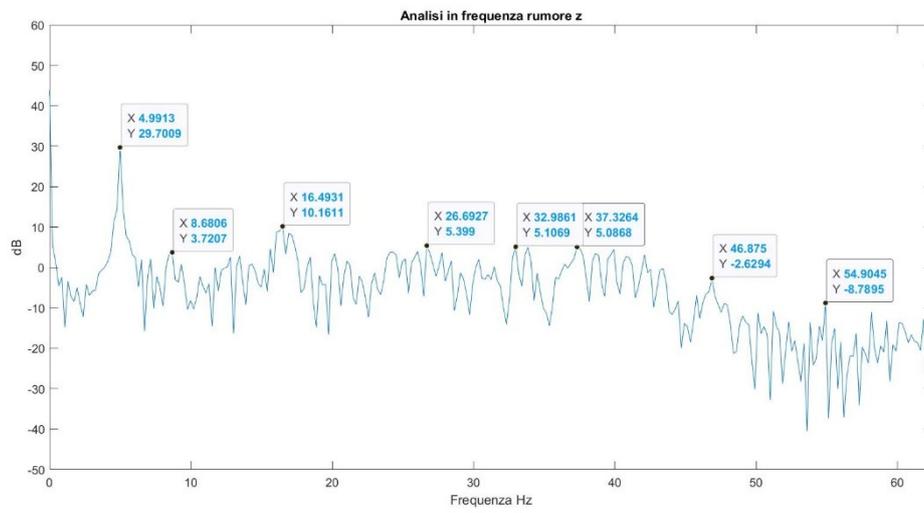


FIGURA 43

Zoom su impulso: 31s -36s

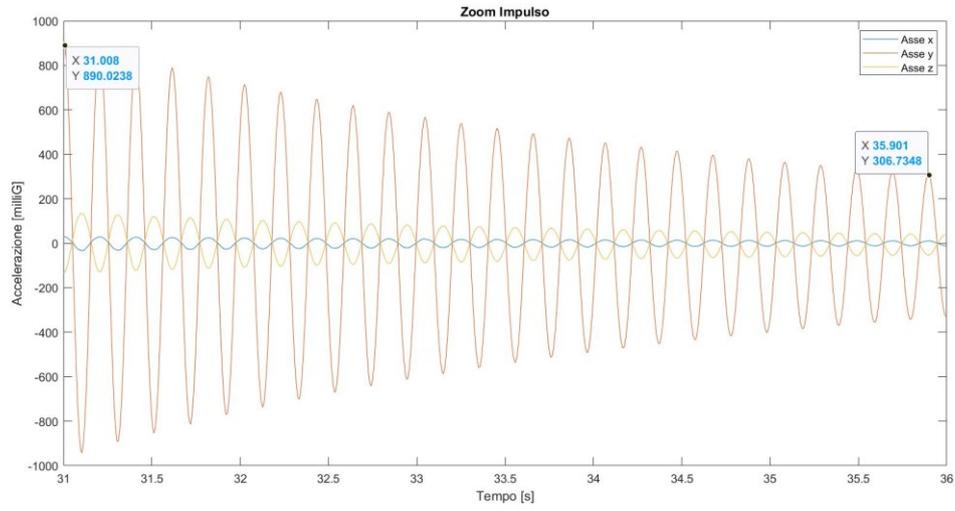


FIGURA 44

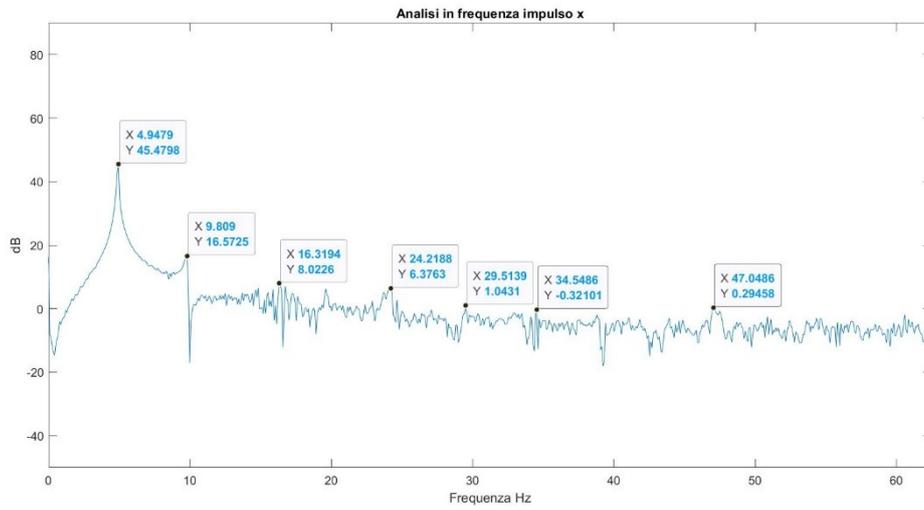


FIGURA 45

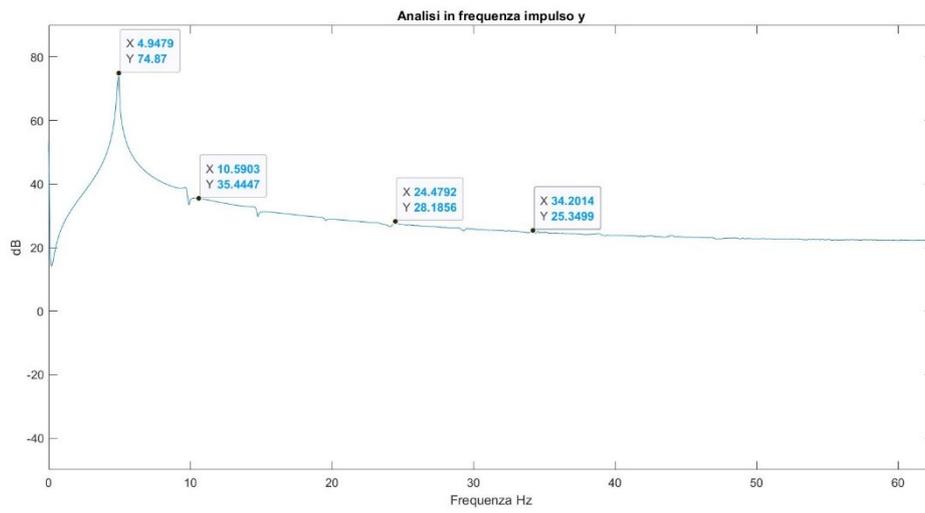


FIGURA 46

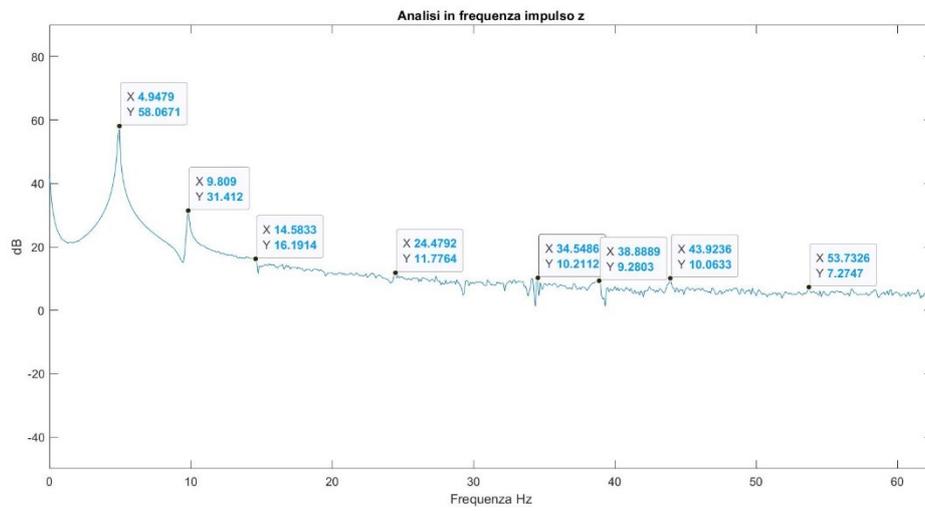


FIGURA 47

3.3.2 Misura 2

Per tale misurazione il setup adottato è quello nelle *figure 48-49* , ossia è presente l' ADXL355Z fissato al peso di 0,8 Kg all'estremità della mensola ad una lunghezza di 20 cm. L'accelerometro è posizionato in posizione orizzontale. Non è stato applicato nessun filtro all'accelerometro e la frequenza di campionamento è di 125 Hz.

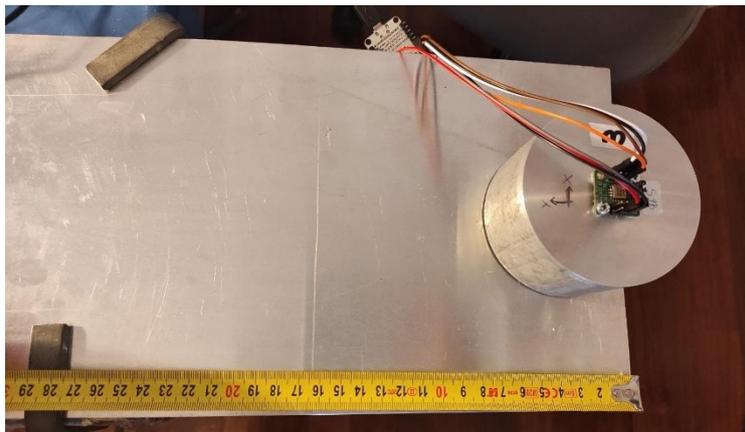


FIGURA 48 SETUP MISURA 2.

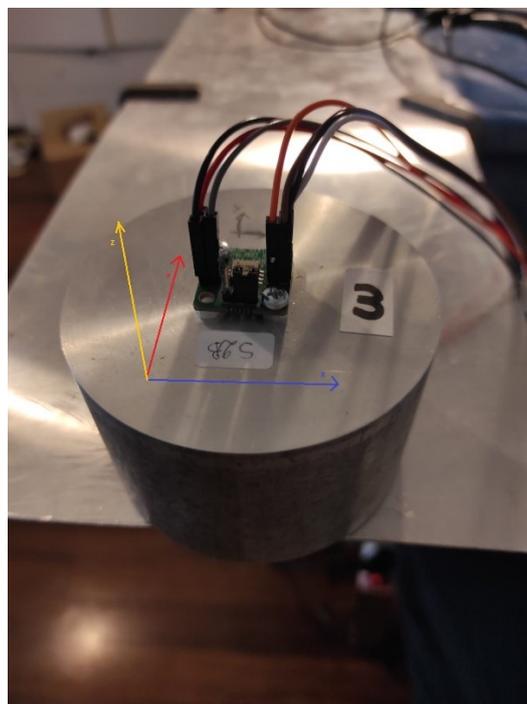


FIGURA 49 SETIP MISURA 2.

Intera misurazione:

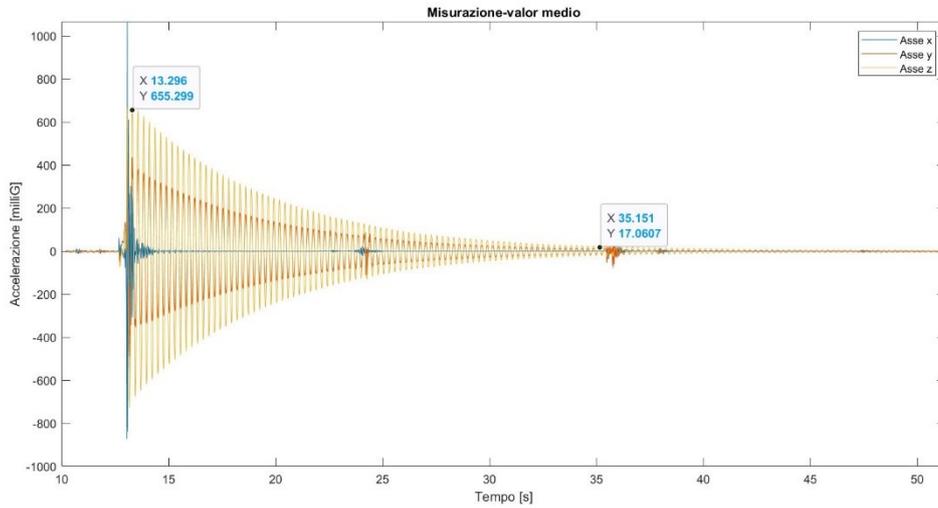


FIGURA 50

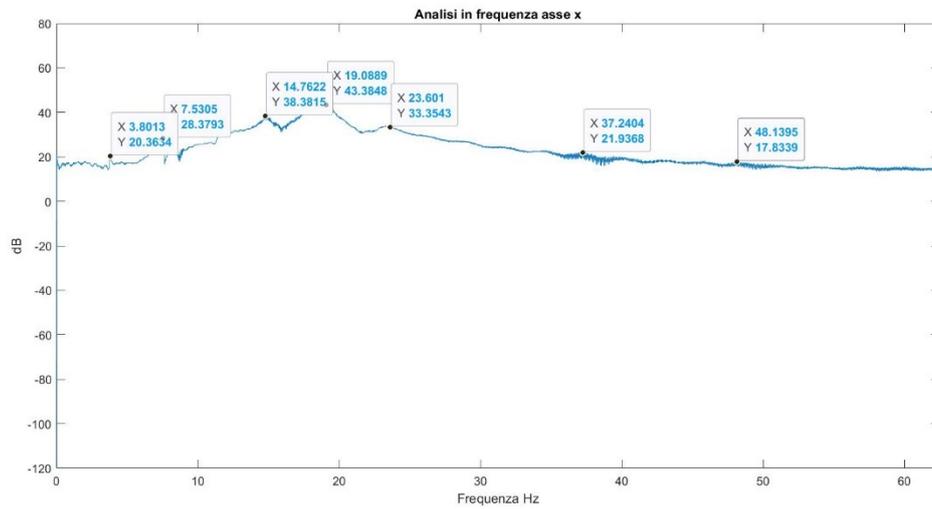


FIGURA 51

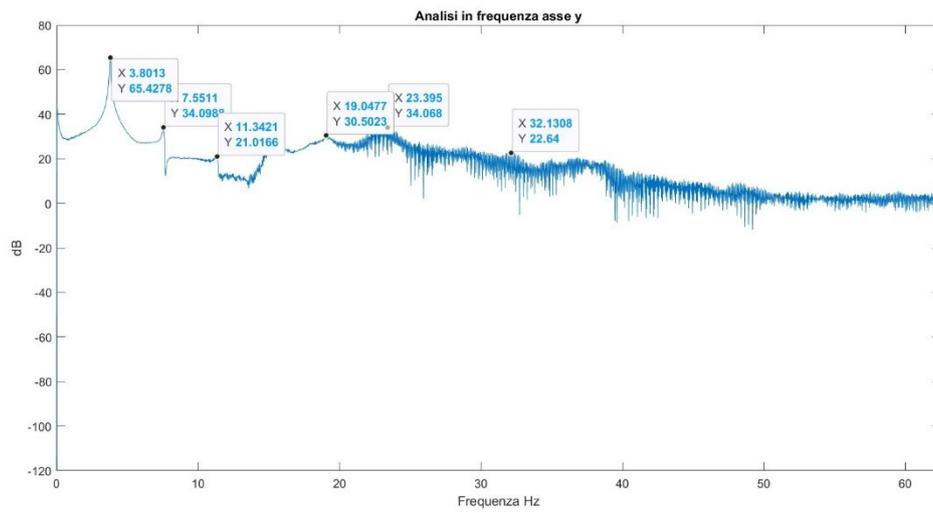


FIGURA 52

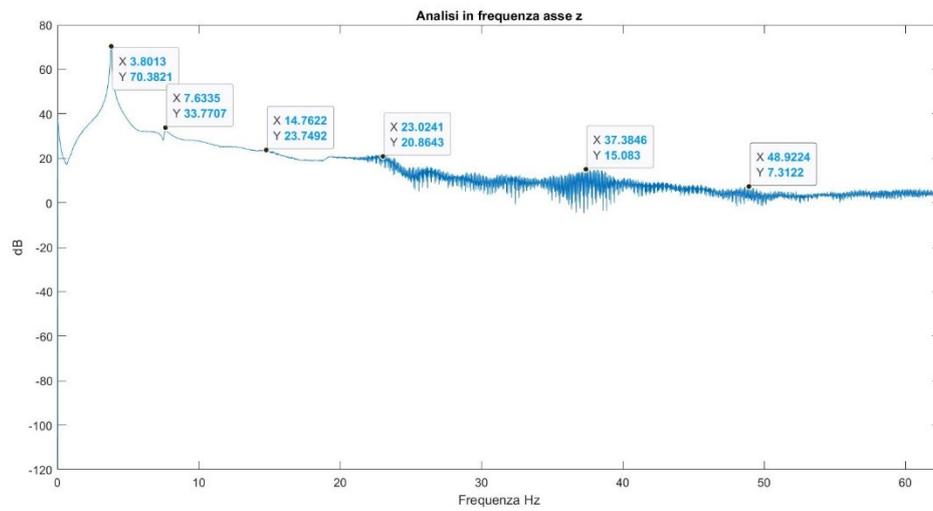


FIGURA 53

Zoom su intervallo di rumore: 10,5s – 12,5s

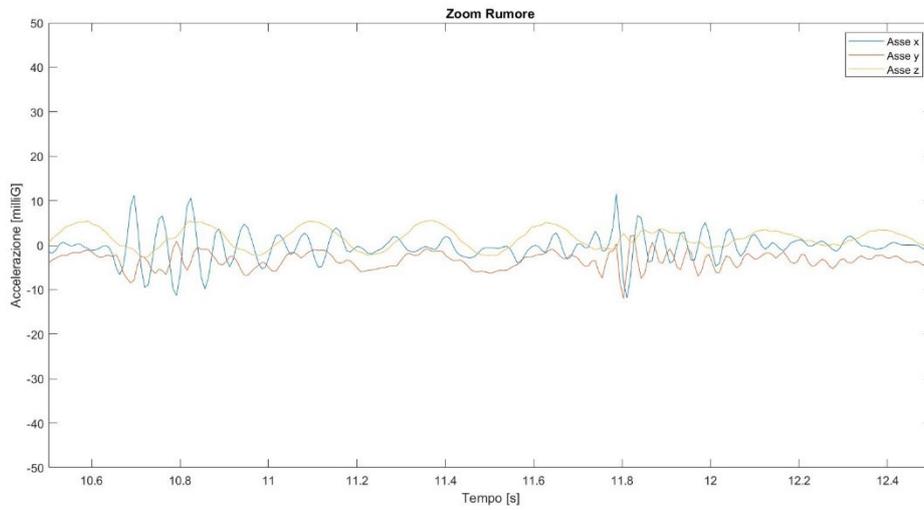


FIGURA 54

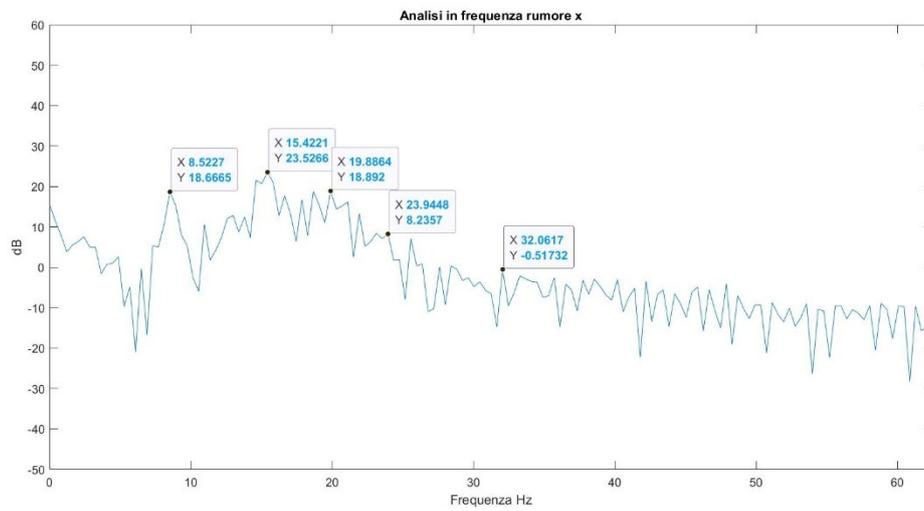


FIGURA 55

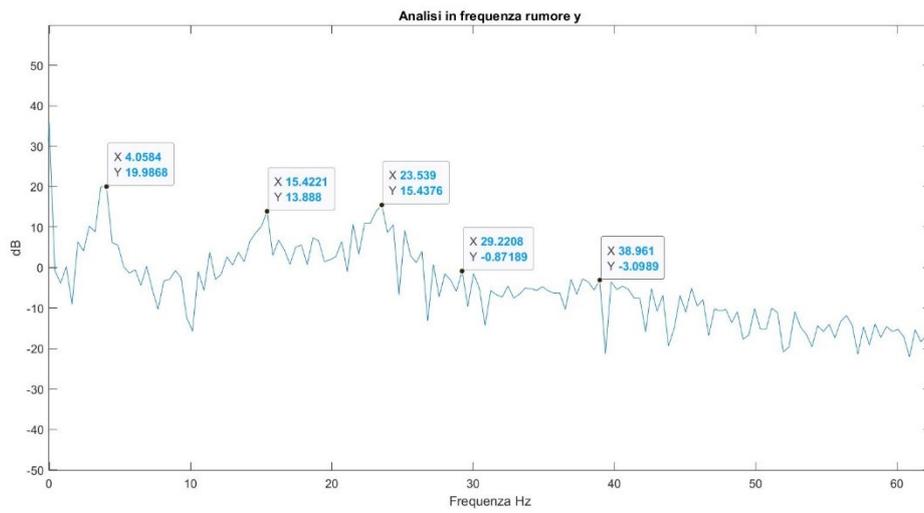


FIGURA 56

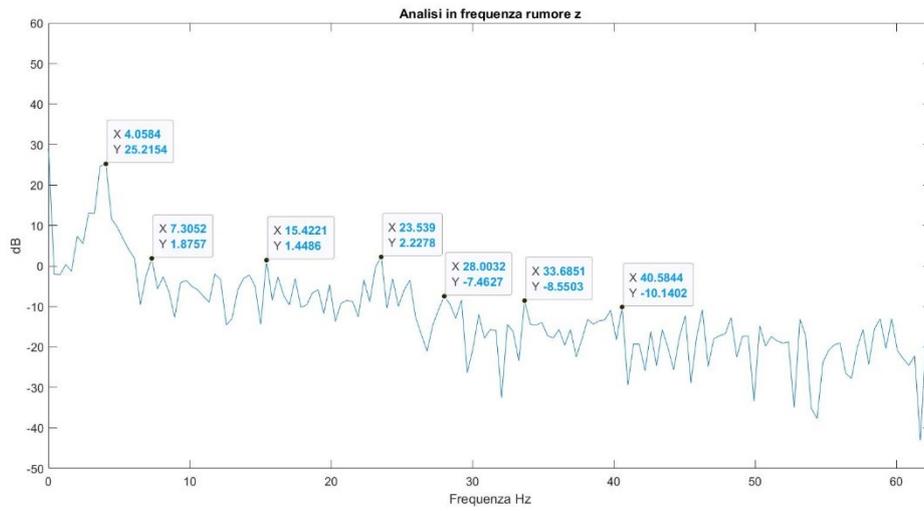


FIGURA 57

Zoom su impulso: 13s – 22s

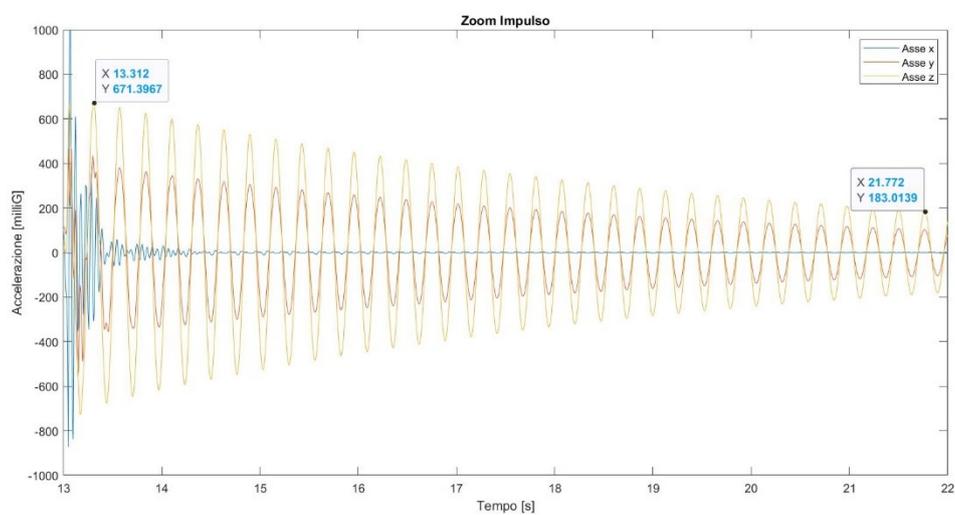


FIGURA 58

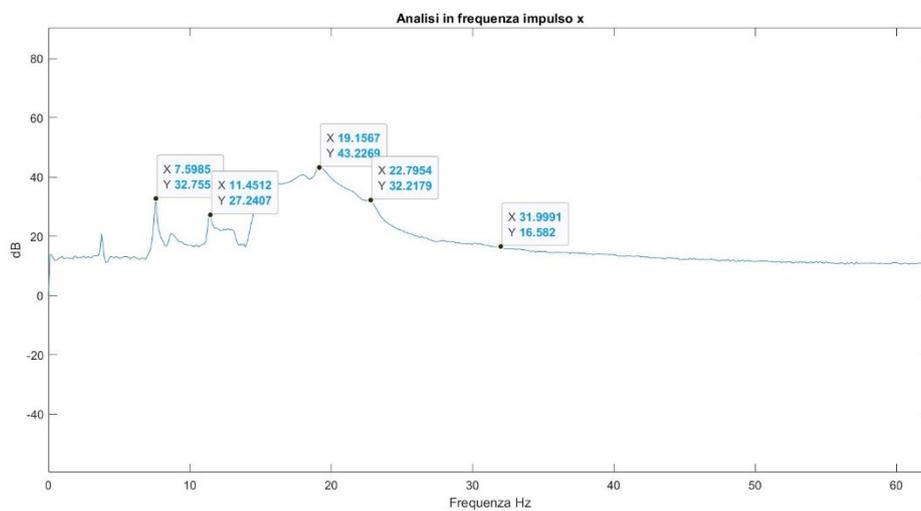


FIGURA 59

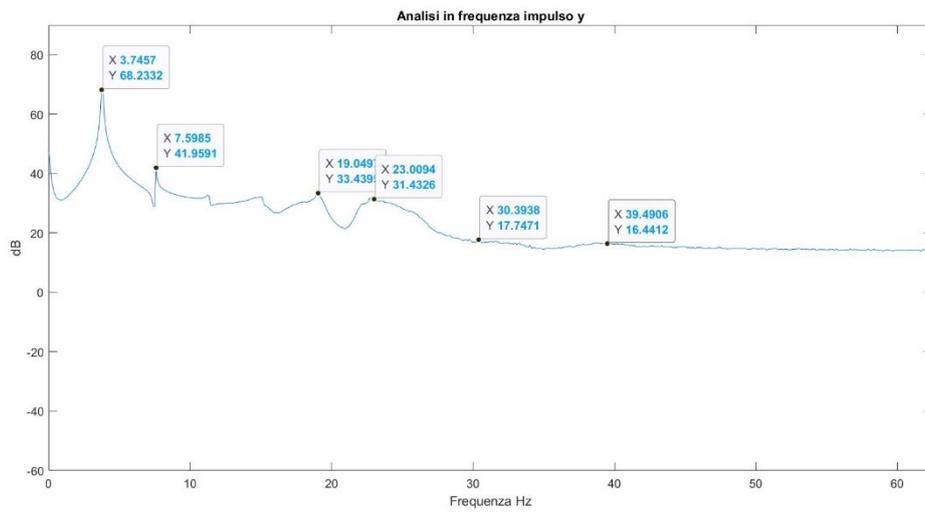


FIGURA 60

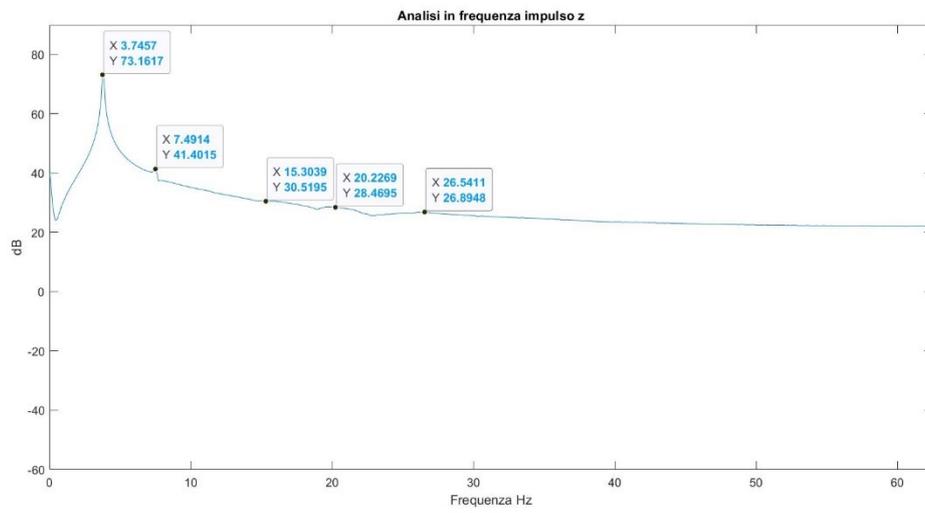


FIGURA 61

Conclusioni

Al termine di questo lavoro si può quindi asserire che lo Structural Health Monitoring è un vastissimo nonché importante ambito di ricerca in continua evoluzione. È importante in primo luogo per quanto riguarda la sicurezza di edifici, strutture e infrastrutture frequentate quotidianamente da cittadini, lavoratori, turisti, al fine di evitare il verificarsi di tragici eventi. Costanti controlli potrebbero facilmente evitarli. Inoltre, è parte integrante del processo di salvaguardia della cultura, di opere storiche e millenarie, di cui soprattutto la penisola italiana è estremamente ricca, fonte di attrazione per visitatori da tutto il mondo.

Nel presente elaborato è stato analizzato come un sistema low-cost, costituito da pochi elementi, facilmente programmabile ed utilizzabile, possa snellire il processo di monitoraggio strutturale. Infatti, se nel passato erano principalmente utilizzati metodi di monitoraggio cablati, estremamente invasivi, difficilmente installabili e mantenibili, l'avvento delle reti WSN per lo SHM ha decimato le problematiche relative al monitoraggio strutturale. Lo scopo principale di ricerche e sviluppi futuri è quello di ottimizzare sempre più tali reti, sia dal punto di vista delle performance, che dal punto di vista economico, implementando sempre più sensori e componenti a basso costo, ugualmente capaci di garantire un monitoraggio preciso, affidabile e facilmente accessibile.

Andando in questa direzione si potrà man mano dotare di queste tecnologie un numero sempre maggiore di edifici, strutture pubbliche, infrastrutture pubbliche e private ed opere storiche. Si rendono in questo modo capillari il controllo della sicurezza e la salvaguardia del patrimonio artistico/architettonico.

Bibliografia

- [1] B. Naticchia, A. Giretti, A. Carbonari, and M. Vaccarini, "A real-time and non intrusive structural health monitoring system for buildings," *2010 - 27th Int. Symp. Autom. Robot. Constr. ISARC 2010*, no. Isarc, pp. 306–315, 2010, doi: 10.22260/isarc2010/0033.
- [2] M. Y. Cheng, Y. Bin Chen, H. Y. Wei, and W. K. G. Seah, "Event-driven energy-harvesting wireless sensor network for structural health monitoring," *Proc. - Conf. Local Comput. Networks, LCN*, pp. 364–372, 2013, doi: 10.1109/LCN.2013.6761268.
- [3] A. B. Noel *et al.*, "Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey," vol. 19, no. 3, pp. 1403–1423, 2017.
- [4] G. Facchini, A. Mascarello, and P. Gaudenzi, "Wireless sensor network for structural health monitoring," *23rd Int. Conf. Adapt. Struct. Technol. ICASST 2012*, no. Iccse, pp. 386–389, 2012.
- [5] A. Sabato, C. Niezrecki, and G. Fortino, "Wireless MEMS-Based Accelerometer Sensor Boards for Structural Vibration Monitoring: A Review," *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 2, pp. 226–235, 2017, doi: 10.1109/JSEN.2016.2630008.
- [6] "HTTPS://WWW.ST.COM/EN/MEMS-AND-SENSORS/ACCELEROMETERS.HTML#PRODUCTS." .
- [7] R. A. León, Vijay Vittal, and G. Manimaran, "Application of Sensor Network for Secure Electric Energy Infrastructure," *Power*, vol. 22, no. 2, pp. 1021–1028, 2007.
- [8] S. Kim *et al.*, "Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks," pp. 254–263, 2007, doi: 10.1109/ipsn.2007.4379685.
- [9] B. F. Spencer Jr, T. Nagayama, J. a Rice, and G. a Agha, "Smart sensing technology: a new paradigm for structural health monitoring," *Proc. 39th Jt. Panel Meet. Wind Seism. Eff. UJNR*, no. January, 2007.

- [10] S. N. Pakzad, G. L. Fenves, and D. E. C. S. Kim, "Design and implementation of scalable wireless sensor network for structural monitoring." *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 89–101, 2008.
- [11] S. Cho, C.-B. Yun, J. P. Lynch, A. T. Zimmerman, B. F. J. Spencer, and T. Nagayama, "Smart wireless sensor technology for structural health monitoring of civil structures," *Steel Struct.*, vol. 8, pp. 267–275, 2008, [Online]. Available: <http://www-personal.umich.edu/~jerlynch/papers/IJOSSwireless.pdf>.
- [12] J. A. Rice and J. B. F. Spencer, "Structural health monitoring sensor development for the Imote2 platform." in *Proc. SPIE*, vol. 6932, pp. 693234–693244, 2008.
- [13] M. J. Whelan, M. V. Gangone, and K. D. Janoyan, "Highway Bridge Assessment Using an Adaptive Real-Time Wireless Sensor Network," *IEEE Sens. J.*, vol. 9, no. 11, pp. 1405–1413, 2009, doi: 10.1109/JSEN.2009.2026546.
- [14] M. Ceriotti *et al.*, "Monitoring heritage buildings with wireless sensor networks: The Torre Aquila deployment," *2009 Int. Conf. Inf. Process. Sens. Networks, IPSN 2009*, no. January, pp. 277–288, 2009, doi: 10.1145/1602165.1602191.
- [15] J. Meyer, R. Bischoff, and G. Feltrin, "Chapter 81 Microelectromechanical Systems (MEMS)."
- [16] R. Andrew Swartz, J. P. Lynch, S. Zerbst, B. Sweetman, and R. Rolfes, "Structural monitoring of wind turbines using wireless sensor networks," *Smart Struct. Syst.*, vol. 6, no. 3, pp. 183–196, 2010, doi: 10.12989/sss.2010.6.3.183.
- [17] J. H. Park, J. T. Kim, D. S. Hong, D. Mascarenas, and J. Peter Lynch, "Autonomous smart sensor nodes for global and local damage detection of prestressed concrete bridges based on accelerations and impedance measurements," *Smart Struct. Syst.*, vol. 6, no. 5–6, pp. 711–730, 2010, doi: 10.12989/sss.2010.6.5_6.711.

- [18]] H. Jo, J. A. Rice, and T. Nagayama, "Development of high-sensitivity accelerometer board for structural health monitoring." in Proc. SPIE, vol. 7647, pp. 764706–764716, 2010.
- [19] S. Jang *et al.*, "Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: Deployment and evaluation," *Smart Struct. Syst.*, vol. 6, no. 5–6, pp. 439–459, 2010, doi: 10.12989/sss.2010.6.5_6.439.
- [20] F. Graziosi *et al.*, "CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO DELLA BASILICA DI S. MARIA DI COLLEMAGGIO," 2011.
- [21] Panagiotis Papanikolas, Aris Stathopoulos-Vlami, and Akis Panagis, "THE STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM OF RION ANTIRION BRIDGE 'CHARILAOS TRIKOUPI,'"
Struct. Heal. Monit. Long-Span Suspens. Bridg., pp. 1–8, 2011, doi: 10.1201/b13182-4.
- [22] M. Bocca, L. M. Eriksson, A. Mahmood, R. Jäntti, and J. Kullaa, "A synchronized wireless sensor network for experimental modal analysis in structural health monitoring," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 26, no. 7, pp. 483–499, 2011, doi: 10.1111/j.1467-8667.2011.00718.x.
- [23] M. J. Chae, H. S. Yoo, J. Y. Kim, and M. Y. Cho, "Development of a wireless sensor network system for suspension bridge health monitoring," *Autom. Constr.*, vol. 21, no. 1, pp. 237–252, 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2011.06.008.
- [24] A. Araujo *et al.*, "Wireless measurement system for structural health monitoring with high time-synchronization accuracy," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 61, no. 3, pp. 801–810, 2012, doi: 10.1109/TIM.2011.2170889.
- [25] B. M. D. Kohler *et al.*, "ShakeNet : A Portable Wireless Sensor Network for Instrumenting Large Civil Structures," 2015.
- [26] A. Sabato, M. Q. Feng, Y. Fukuda, D. L. Carni, and G. Fortino, "A Novel Wireless Accelerometer Board for Measuring Low-Frequency and Low-

- Amplitude Structural Vibration,” *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 9, pp. 2942–2949, 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2522940.
- [27] D. Phanish *et al.*, “A wireless sensor network for monitoring the structural health of a football stadium,” *IEEE World Forum Internet Things, WF-IoT 2015 - Proc.*, no. December, pp. 471–477, 2015, doi: 10.1109/WF-IoT.2015.7389100.
- [28] X. Hu, B. Wang, and H. Ji, “A Wireless Sensor Network-Based Structural Health Monitoring System for Highway Bridges,” *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 28, no. 3, pp. 193–209, 2013, doi: 10.1111/j.1467-8667.2012.00781.x.
- [29] R. Gonzalez, G. Sagbay, R. Clotet, D. Rivas, and D. Rivas, “Structural Health Monitoring using WifiPhones Study of the network power consumption using simulation models,” 2015.
- [30] K. S. Raju, Y. Sahni, Y. Pratap, and B. M. Naresh, “Implementation of a WSN system towards SHM of civil building structures,” *Proc. 2015 IEEE 9th Int. Conf. Intell. Syst. Control. ISCO 2015*, 2015, doi: 10.1109/ISCO.2015.7282303.
- [31] M. Giammarini, D. Isidori, E. Concettoni, C. Cristalli, M. Fioravanti, and M. Pieralisi, “Design of Wireless Sensor Network for Real-Time Structural Health Monitoring,” *Proc. - 2015 IEEE 18th Int. Symp. Des. Diagnostics Electron. Circuits Syst. DDECS 2015*, pp. 107–110, 2015, doi: 10.1109/DDECS.2015.45.
- [32] S. Valenti *et al.*, “A low cost wireless sensor node for building monitoring,” *EESMS 2018 - Environ. Energy, Struct. Monit. Syst. Proc.*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/EESMS.2018.8405827.
- [33] C. Gentile, A. Ruccolo, and F. Canali, “Continuous monitoring of the Milan Cathedral: dynamic characteristics and vibration-based SHM,” *J. Civ. Struct. Heal. Monit.*, vol. 9, no. 5, pp. 671–688, 2019, doi: 10.1007/s13349-019-00361-8.
- [34] P. Vishnu, C. S. Lewangamage, M. T. R. Jayasinghe, and K. J. C.

- Kumara, "Development of Low-Cost Wireless Sensor Network and Online Data Repository System for Time Synchronous Monitoring of Civil Infrastructures," *MERCon 2020 - 6th Int. Multidiscip. Moratuwa Eng. Res. Conf. Proc.*, pp. 72–77, 2020, doi: 10.1109/MERCon50084.2020.9185231.
- [35] "https://www.wired.it/attualita/tech/2020/08/03/ponte-genova-san-giorgio-sensori-robot/?refresh_ce=" .
- [36] M. Elersy, T. M. Elfouly, and M. H. Ahmed, "Joint Optimal Placement, Routing, and Flow Assignment in Wireless Sensor Networks for Structural Health Monitoring," *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 12, pp. 5095–5106, 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2554462.
- [37] M. Conti, Iseini Festim, P. Nicola, and P. Diego, "Progettazione di una rete di sensori wireless per monitoraggio strutturale," 2018.
- [38] Z. Q. Feng and L. S. Katafygiotis, "A method for correcting synchronization errors in wireless sensors for structural modal identification," *Procedia Eng.*, vol. 14, pp. 498–505, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.062.
- [39] Sami M. Lasassmeh and James M. Conrad, "Time synchronization in wireless sensor networks," *Handb. Theor. Algorithmic Asp. Sensor, Ad Hoc Wireless, Peer-to-Peer Networks*, pp. 403–414, 2005, doi: 10.1201/9780203323687.
- [40] J. P. Lynch, Y. Wang, K. H. Law, J. H. Yi, C. G. Lee, and C. B. Yun, "Validation of a large-scale wireless structural monitoring system on the Geumdang Bridge," *Proc. 9th Int. Conf. Struct. Saf. Reliab.*, no. 2004, pp. 19–23, 2005.
- [41] X. D. Jiang, Y. L. Tang, and Y. Lei, "Wireless sensor networks in structural health monitoring based on ZigBee technology," *2009 3rd Int. Conf. Anti-counterfeiting, Secur. Identif. Commun. ASID 2009*, pp. 449–452, 2009, doi: 10.1109/ICASID.2009.5276977.
- [42] E. Goldoni and P. Gamba, "W-TREMORS, a wireless monitoring system

- for earthquake engineering,” *EESMS 2010 - 2010 IEEE Worskshop Environ. Energy, Struct. Monit. Syst. Proc.*, pp. 26–31, 2010, doi: 10.1109/EESMS.2010.5634185.
- [43] B. Weiss *et al.*, “A power-efficient wireless sensor network for continuously monitoring seismic vibrations,” *2011 8th Annu. IEEE Commun. Soc. Conf. Sensor, Mesh Ad Hoc Commun. Networks, SECON 2011*, pp. 37–45, 2011, doi: 10.1109/SAHCN.2011.5984921.
- [44] T. Yu-liang, L. Yu, H. Lian-fen, G. Jian, and Y. Lei, “Wireless Sensor Network for On-line Structural Health Monitoring,” *23rd Int. Conf. Adapt. Struct. Technol. ICAST 2012*, no. lccse, pp. 386–389, 2012.
- [45] D. Mills, “Network Time Protocol (Version 3) specification, implementation and analysis,” 1992, [Online]. Available: <http://www.eecis.udel.edu/~mills/database/reports/ntp3/ntpv3a.ps>.
- [46] “HTTPS://RES.INFOQ.COM/NEWS/2019/07/CLOUDFLARE-TIME-SERVICE/EN/RESOURCES/1TIME-STRATUM-@2X-1564528814450.PNG.” .
- [47] P. Ranganathan and K. Nygard, “Time Synchronization in Wireless Sensor Networks: A Survey,” *Int. J. UbiComp*, vol. 1, no. 2, pp. 92–102, 2010, doi: 10.5121/iju.2010.1206.
- [48] A. B. Kulakli and K. Erciyas, “Time synchronization algorithms based on Timing-sync Protocol in Wireless Sensor Networks,” *2008 23rd Int. Symp. Comput. Inf. Sci. Isc. 2008*, 2008, doi: 10.1109/ISCIS.2008.4717888.
- [49] M. Maróti, B. Kusy, G. Simon, and Á. Lédeczi, “The flooding time synchronization protocol,” *SenSys’04 - Proc. Second Int. Conf. Embed. Networked Sens. Syst.*, pp. 39–49, 2004, doi: 10.1145/1031495.1031501.
- [50] J. P. Lynch *et al.*, “Field validation of a wireless structural monitoring system on the Alamosa Canyon Bridge,” *Smart Struct. Mater. 2003 Smart Syst. Nondestruct. Eval. Civ. Infrastructures*, vol. 5057, no. August, p. 267, 2003, doi: 10.1117/12.482712.
- [51] M. Hedley *et al.*, “Sensor network for structural health monitoring,” *Proc.*

- 2004 *Intell. Sensors, Sens. Networks Inf. Process. Conf. ISSNIP '04*, pp. 361–366, 2004, doi: 10.1109/issnip.2004.1417489.
- [52] B. F. Spencer Jr, T. Nagayama, J. a Rice, and G. a Agha, “Smart sensing technology: a new paradigm for structural health monitoring,” *Proc. 39th Jt. Panel Meet. Wind Seism. Eff. UJNR*, no. May 2014, 2007.
- [53] Ramón A. León, V. Vittal, and G. Manimaran, “Application of Sensor Network for Secure Electric Energy Infrastructure,” *Power*, vol. 22, no. 2, pp. 1021–1028, 2007.
- [54] J. C. Chin, J. M. Rautenberg, C. Y. T. Ma, S. Pujol, and D. K. Y. Yau, “A low-cost, low-data-rate rapid structural assessment network: Design, implementation, and experimentation,” *2008 5th IEEE Int. Conf. Mob. Ad-Hoc Sens. Syst. MASS 2008*, pp. 173–182, 2008, doi: 10.1109/MAHSS.2008.4660014.
- [55] R. Berešik, J. Puttera, and F. Nebus, “Seismic sensor system for security applications based on MEMS accelerometer,” *Int. Conf. Appl. Electron.*, vol. 2015-Janua, no. January, pp. 31–36, 2014, doi: 10.1109/AE.2014.7011662.
- [56] P. Pierleoni *et al.*, “Performance Evaluation of a Low-Cost Sensing Unit for Seismic Applications: Field Testing during Seismic Events of 2016-2017 in Central Italy,” *IEEE Sens. J.*, vol. 18, no. 16, pp. 6644–6659, 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2850065.
- [57] M. Muttillio and L. Di Battista, “Structural health continuous monitoring of buildings – A modal parameters identification system,” pp. 17–20.
- [58] S. Selvakumaran, G. Webb, J. Bennetts, C. Rossi, E. Barton, and C. Middleton, “Understanding Insar Measurement Through Comparison with Traditional Structural Monitoring - Waterloo Bridge, London,” *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, vol. 1, no. 1, pp. 6368–6371, 2019, doi: 10.1109/IGARSS.2019.8898049.
- [59] “<https://edition.cnn.com/travel/article/golden-gate-bridge-secrets-california/index.html>.” .

- [60] “[HTTPS://SMARTSTRUCTURE.WEEBLY.COM/JINDO-BRIDGE.HTML](https://SMARTSTRUCTURE.WEEBLY.COM/JINDO-BRIDGE.HTML).” .
- [61] “<http://www.santamariadicollemaggio.it/#&gid=1&pid=1>.” .
- [62] J. Combault, “The Rion-Antirion bridge-when a dream becomes reality,” *Front. Archit. Civ. Eng. China*, vol. 5, no. 4, pp. 415–426, 2011, doi: 10.1007/s11709-011-0130-x.
- [63] “<https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/mems-accelerometers-as-acoustic-pickups.html>.” .
- [64] Massimo Conti and Diego Coccia, “Relazione interna Univpm 2020,” 2020.
- [65] “<https://www.az-delivery.de/it/products/nodemcu>.” .
- [66] “<https://components101.com/development-boards/nodemcu-esp8266-pinout-features-and-datasheet>.” .
- [67] “<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/EVAL-ADXL354-355-UG-1030.pdf>.” .