



Sistema di monitoraggio INtelligente per la Sicurezza delle InfraStrutture urbane

Codice Progetto: ARS01_00913 (CUP E64E18000110005)

Durata del progetto: n. 42 mesi. Dal 01/05/2019 al 31/10/2022

DELIVERABLE

OR 1

Partners

- Università di Napoli Federico II (Soggetto Capofila)
- CNR ITC (socio di STRESS scarl)
- Consorzio Integra (socio di STRESS scarl)
- IOTSAFE
- MAPEI
- Politecnico di Torino
- STMicroelectronics
- STRESS scarl
- Tecno In (socio di STRESS scarl)
- Tecnosistem (socio di STRESS scarl)
- Università di Bergamo
- Università di Bologna
- Università di Palermo
- Università di Roma Tor Vergata



UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Informazioni del Deliverable		
Numero documento	D.1	
Diffusione documento	Privato	
Titolo del documento	Sensoristica avanzata per il monitoraggio strutturale	
Obiettivo Realizzativo	OR1	
Coordinatore OR	STMicroelectronics	
Stato del documento		
Verificato (Coordinatori OR)	02/12/2022	Ing. Francesco Pappalardo Ing. Agatino Pennisi
Approvato (Coordinatore Progetto)	21/12/2022	Prof. Ing. Edoardo Cosenza

PREMESSA

Il presente documento costituisce il prodotto atteso dell'OR1.

Questo obiettivo comprende lo studio, la specifica, la realizzazione e la caratterizzazione di I) prototipi di sensori a basso costo per il monitoraggio strutturale e II) dei relativi sistemi prototipali di raccolta dati.

I partner che hanno contribuito alla realizzazione del deliverable sono: STMicroelectronics, Mapei, UniBO e UniNA.

Tutte le informazioni e le analisi contenute nel documento hanno finalità di ricerca e la loro citazione può essere ricondotta al Progetto INSIST - Sistema di monitoraggio INtelligente per la Sicurezza delle InfraStrutture urbane (ARS01_00913).

Le opinioni e le conclusioni presentate non rispecchiano necessariamente quelle degli enti finanziatori.

SOMMARIO

1	DESCRIZIONE DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO E DELLE ATTIVITÀ.....	7
2	Sensore capacitivo STMicroelectronics.....	9
2.1	Descrizione dell'attività	9
2.2	Risultati attività	11
3	Sensore piezo-resistivo ceramico STMicroelectronics	18
3.1	Descrizione attività	18
3.2	Risultati attività	22
4	Sviluppo di un reference design basato su core RISC-V per la lettura di sensori capacitivi, implementato su dispositivo FPGA	23
4.1	Descrizione attività	23
4.2	Risultati attività	24
5	Sviluppo del reference design del sistema di acquisizione e raccolta dati dei sensori capacitivi STMicroelectronics.....	27
5.1	Descrizione attività	27
5.2	Risultati attività	27
5.2.1	Scheda Nodo Stand-alone	27
5.2.2	Nodo stand-alone - Caratteristiche.....	27
5.2.3	Nodo stand-alone - Configurazione	28
5.2.4	Nodo stand-alone - Applicazioni	29
5.2.5	Nodo light – Descrizione	32
5.2.6	Nodo light – Applicazioni.....	32
5.2.7	Nodo Smart - Descrizione.....	34
5.2.8	Nodo Smart - Caratteristiche.....	37
5.2.9	Nodo Smart - Configurazione	38
5.2.10	Nodo Smart - Applicazioni	42
6	Sviluppo del software applicativo e del FW sistema di acquisizione e raccolta dati dei sensori capacitivi STMicroelectronics	43

6.1	Descrizione attività	43
6.1.1	Architettura di sistema	43
6.1.2	GUI based system	43
6.1.3	Raspberry Pi based system.....	44
6.1.4	Descrizione del nodo.....	45
6.2	Risultati attività.....	46
6.2.1	Architettura FW	46
6.2.2	Protocollo CAN	47
6.2.3	Trasduzione della capacità del sensore mediante CVC	47
6.2.4	Trasduzione della capacità del sensore mediante TSC	49
6.2.5	Comparazione TSC-CVC	50
6.2.6	Il software per l’acquisizione/gestione dei dati (GUI).....	50
6.2.7	Il gateway RaspberryPi	52
6.2.8	Architettura del software per il gateway RaspberryPi	52
7	Studio della pre e post-installazione della sensoristica STMicroelectronics	54
7.1	Descrizione attività	54
7.2	Risultati attività.....	54
7.2.1	Post-Installazione sensoristica ST per il monitoraggio strutturale.....	54
7.2.2	Pre-Installazione sensoristica ST per il monitoraggio strutturale	62
7.2.3	Ricerca e sviluppo di prodotti chimici per la posa in opera della sensoristica: Studio e individuazione dei materiali per l’applicazione della sensoristica.....	65
8	Caratterizzazione accelerometri MEMS - ATTIVITÀ A.1.2	67
8.1	Descrizione attività	67
8.2	Descrizione dei sensori inerziali	68
8.2.1	La configurazione gimbaled.....	70
8.2.2	La configurazione strapdown.....	72
8.2.3	Classificazione dei sensori inerziali.....	74
8.2.4	Tecnologie di costruzione	76

8.2.5	Accelerometri.....	78
8.2.6	Accelerometri meccanici.....	78
8.2.7	Accelerometri a vibrazione	80
8.3	Sorgenti di incertezza nei sensori per piattaforme inerziali.....	82
8.3.1	“Errori” tipici e loro origini	82
8.3.2	Contributi sistematici	84
8.3.3	Modellazione delle misure	92
8.4	Background teorico	94
8.4.1	Allineamento degli assi sensore.....	94
8.4.2	Varianza di Allan	96
8.5	Metodo proposto	97
8.5.1	Procedura di allineamento.....	98
8.5.2	Valutazione dei parametri di rumore	100
8.6	Prototipo ridondante.....	101
8.6.1	Reference IMU.....	101
8.6.2	Architettura hardware	102
8.6.3	Architettura software.....	103
8.6.4	Caratterizzazione del prototipo	104
8.7	Riferimenti	108
9	Reference design di un sistema di raccolta dati - ATTIVITÀ A.1.3	110
9.1	Descrizione attività	110
9.1.1	LoRa e LoRAWAN	112
9.1.2	Struttura del pacchetto LoRA	117
9.1.3	Piattaforma LoRaWAN per il monitoraggio.....	119
9.1.4	Topologia della rete	121
9.1.5	End-devices.....	122
9.1.6	Software per la rete di monitoraggio LoRa.....	124
9.1.7	Il protocollo MQTT	125

9.2	Risultati attività	128
9.2.1	Architettura di sistema	128
9.2.2	Risultati	129
10	Progettazione hardware del NODO Sensore basato su microcontrollore STM32L476	134
10.1	Firmware e acquisizione dati	135
10.2	Stima della durata della batteria.....	136
10.3	Validazione in laboratorio.....	137
10.4	Considerazioni	139
11	NODI sensore basati su Raspberry Pi4	140
11.1	Scheda prototipo RPi4	140
11.2	Valutazione della sincronizzazione.....	142
11.3	Analisi del rumore.....	144
12	IMPATTO ATTESO	145
13	CONCLUSIONI.....	145
14	RIFERIMENTI	145

1 DESCRIZIONE DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO E DELLE ATTIVITÀ

L'obiettivo realizzativo dell'OR1, come da capitolato, è stato articolato nei seguenti punti:

1) Sensore di sforzo

- a. Sono previste attività di ricerca di un innovativo sensore di sforzo da inserire nel calcestruzzo in fase di getto (o dopo per strutture esistenti); si tratta di una versione riprogettata di un prototipo precedente, che ne risolve i problemi riscontrati in fase di test attraverso l'utilizzo di nuovi materiali e di nuove tecniche costruttive e di assemblaggio.

Il sensore di sforzo inserito nel calcestruzzo rappresenta un componente unico sul mercato e può essere inserito nei conci delle gallerie, nelle pile dei viadotti e in altri elementi strutturali per misurare la distribuzione degli sforzi interni. Insieme ai sensori di sforzo verrà studiato e sviluppato un sistema elettronico dedicato di lettura del sensore, con caratteristiche innovative che possano aiutare la precisione della misura. In particolare, lo studio e lo sviluppo ottimizzato dell'intero sistema composto da sensore ed elettronica di misura massimizzerà precisione/sensibilità con minori costi del sistema e consumi di potenza.

Realizzare un sistema di acquisizione con sensori a basso consumo di potenza è importantissimo nelle applicazioni come quelle del presente progetto, in cui il numero di sensori da monitorare può anche superare le diverse migliaia. Il sistema di acquisizione realizzato sarà in grado di acquisire anche dati da sensori di temperatura e umidità. Inoltre, sarà equipaggiato con interfaccia RF per comunicazioni wireless, in accordo allo standard LoRa, per la gestione di eventi sismici in edifici in cui il rischio sismico risulta significativo.

2) Caratterizzazione accelerometri MEMS

- a. Altri sensori che verranno impiegati nel monitoraggio strutturale sono accelerometri MEMS a basso costo per misure statiche (inclinometri biassiali a basso drift in temperatura e in offset) e dinamiche (accelerometri triassiali a bassa densità spettrale di rumore). Si tratta di nuovi componenti già sviluppati ma non ancora caratterizzati per l'impiego in campo strutturale. La loro applicazione è prevista su travi e pile di ponti e all'interno di gallerie, oltre che nei sistemi per il monitoraggio delle frane.

3) Reference design di un sistema di raccolta dati

- a. In questa fase viene creato un progetto di riferimento che integra i sensori sopra descritti con microcontrollori (e relativo firmware) e componenti per la trasmissione locale dei dati verso uno o più concentratori. Questo progetto di riferimento include linee guida sull'utilizzo di:
 - i. modem a onde convogliate per trasmettere le misure ad una centralina attraverso lo stesso cavo di alimentazione che collega i sensori inclinometrici;
 - ii. CAN (Controller Area Network) bus per collegare i lettori dei sensori di pressione inseriti nei conci delle gallerie o all'interno di altri elementi strutturali agli inclinometri da cui poi raggiungono i concentratori;
 - iii. CAN bus o altri bus di campo (ad es. Ethercat) laddove occorra monitorare le accelerazioni della struttura in diversi punti, in modo tale da consentire l'identificazione dinamica, utile per misurare sia eventuali variazioni pre- e post-evento sismico, sia il normale degrado.
 - iv. collegamento wireless tra lettore e concentratore, per i quali verranno utilizzati moduli RF operanti a frequenze Sub-GHz a basso consumo. Pertanto si svilupperanno dei lettori e dei concentratori che siano in grado di comunicare a RF utilizzando frequenze della portante e bit rate che rispettino gli standard più adatti all'applicazione (LoRa). L'attenzione si focalizzerà principalmente sui consumi, sui range di comunicazione e sulla sicurezza della comunicazione.

4) Algoritmi per il condizionamento distribuito del segnale

- a. I sistemi di acquisizione sono caratterizzati da un'ottima capacità di calcolo, grazie all'utilizzo di microcontrollori potenziati di cui STMicroelectronics è leader di mercato. L'attività proposta intende studiare l'applicazione di algoritmi innovativi per l'analisi e il condizionamento del segnale direttamente nel nodo sensore. Possibili applicazioni sono algoritmi che auto-apprendono il comportamento 'normale' del segnale acquisito segnalando eventuali anomalie. Il concentratore che raccoglie localmente i dati di sensori eterogenei è quindi in grado di prendere decisioni rapide, laddove necessario.

2 Sensore capacitivo STMicroelectronics

2.1 Descrizione dell'attività

Il sensore capacitivo proposto da STMicroelectronics per il progetto INSIST (Figura 2.1.1) si basa su una profonda esperienza sul sensore di forza di deformazione per il monitoraggio della salute strutturale. Il primo sensore, sviluppato tra il 2012 e il 2015, era molto piccolo e si basava sull'effetto piezoresistivo di transistor CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) su die di silicio. Tale studio preliminare ha evidenziato che la dimensione dei sensori per il monitoraggio delle sollecitazioni nelle grandi strutture gioca un ruolo chiave. Pertanto, un ulteriore sforzo di ricerca è stato orientato verso lo sviluppo di un sensore capacitivo, di dimensioni più grandi, più adatto ad essere installato in strutture di calcestruzzo o ad altri materiali da costruzione, portando a un nuovo brevetto nel 2019 [1].

Il sensore capacitivo sviluppato consiste in un condensatore a piastre parallele dove come strato dielettrico è stato utilizzato uno strato di Kapton™: in questo caso l'area dell'elemento sensibile è quella dell'intera superficie della piastra. Inoltre, l'area può essere realizzata quanto basta per essere paragonabile alle macro-caratteristiche degli elementi costruttivi (Figura 2.1.1a). I sensori capacitivi hanno un diametro di 40 mm (Figura 2.1.1b) e uno spessore di 1,65 mm; inoltre i sensori verticali possono essere dotati di due staffe (Figura 2.1.1c). Questi ultimi consentono ai sensori di lavorare anche sotto carico di trazione oltre che di compressione.

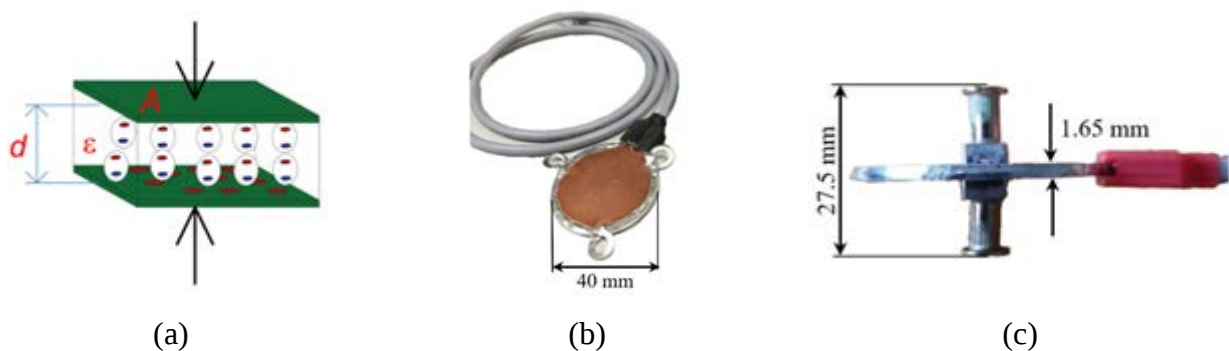


Figura 2.1.1 Sensore capacitivo: (a) schema elettrico; (b) vista del sensore con cavo di segnale e ancoraggi laterali. (c) vista delle misure e delle staffe del sensore.

La capacità, C , di un condensatore a piastre parallele è data da:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1)$$

dove ε , A e d sono la permittività del dielettrico, l'area degli elettrodi e lo spessore del dielettrico, rispettivamente. Per il dielettrico in Kapton™ si è considerata una costante dielettrica nominale pari a $\varepsilon_r = 3.4$.

La variazione di capacità è proporzionale alla variazione di deformazione in funzione della variazione della distanza tra le piastre degli elettrodi, ovvero la distanza tra le piastre. Nella Figura 2.1.2, la relazione capacità-distanza nell'equazione (1) è tracciata assumendo $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ con costante dielettrica del vuoto $\varepsilon_0 = 8.8542 \cdot 10^{-3}$ pF/mm e $A = 346.36$ mm². È importante sottolineare che, a seconda dell'intervallo di lavoro della capacità del sensore, la variazione della distanza dell'elettrodo fornirà un diverso intervallo di capacità, secondo l'Eq. (1).

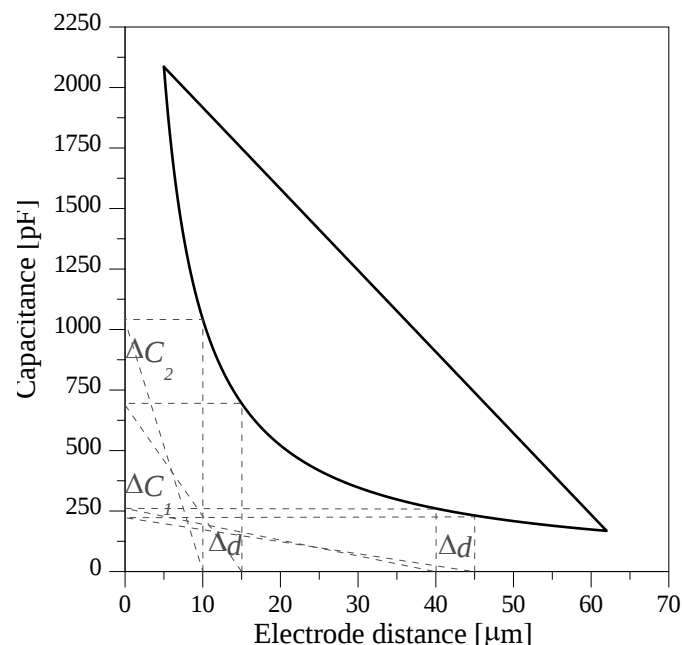


Figura 2.1.2 Relazione fra capacità e distanza degli elettrodi del sensore capacitivo.

Il sistema di lettura dei sensori è una scheda elettronica di condizionamento del segnale che converte il segnale di capacità in tensione, corrente o frequenza. Il lettore utilizzato da STMicroelectronics per i sensori capacitivi è basato su microcontrollore STM32 ed è posizionato esternamente alla struttura in prova, vicino al sensore per ridurre la capacità parassita, inoltre può leggere diversi sensori in parallelo. In questo caso solo il sensore è incorporato nella struttura e tutti i dispositivi elettronici sono esterni. Quindi, è possibile sostituirli molto facilmente in caso di guasti o altri problemi.

Il sensore capacitivo offre diversi vantaggi, tra cui un'alta sensibilità, un'elevata stabilità e sensibilità alle basse temperature, un basso costo e una lunga durata (non essendoci elettronica all'interno che ne potrebbe limitare la durata).

La foto di figura 2.1.3 mostra le parti del sensore prima del suo assemblaggio finale.

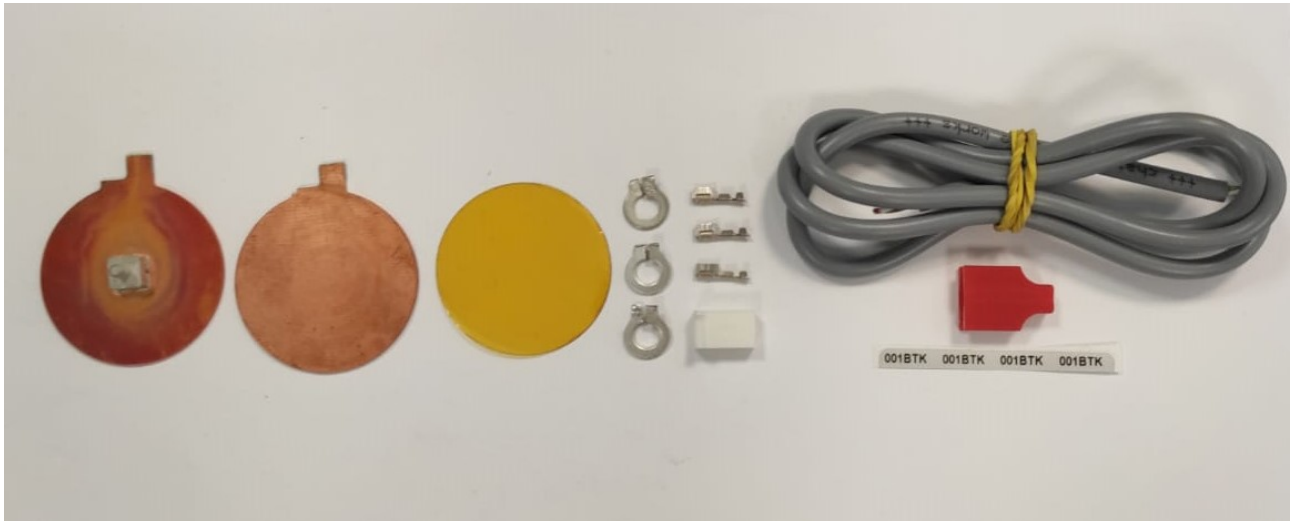


Figura 2.1.3 Relazione fra capacità e distanza degli elettrodi del sensore capacitivo.

2.2 Risultati attività

Il sensore capacitivo sviluppato da STMicroelectronics è stato sottoposto ad una campagna di caratterizzazione “in-house” presso i laboratori della sede di Catania, al fine di avere dei parametri caratteristici del sensore, indipendentemente dal materiale (malta o calcestruzzo) in cui è stato installato durante le varie sperimentazioni del progetto.

Il sistema basato su una cella di carico è mostrato in figura 2.2.1.

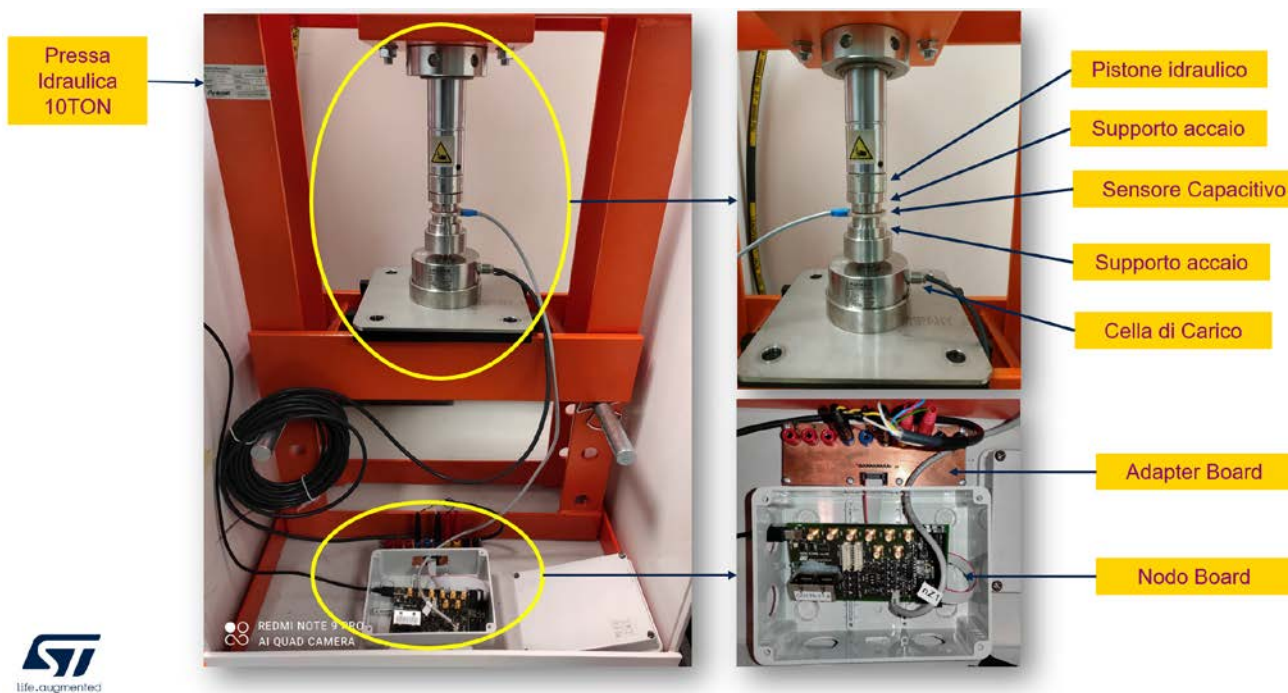


Figura 2.2.1 Sistema di caratterizzazione del sensore capacitivo

La cella di carico utilizzata è stata una Laumas CBL12500C3L, le cui caratteristiche sono mostrate in figura 2.2.2.

CARATTERISTICHE TECNICHE

Materiale	Acciaio inox 17-4 PH		
Carico nominale (E max)	500 - 1000 - 2000 - 5000 - 10000 - 20000 - 30000 - 60000 - 100000 - 150000 - 200000 kg		
Errore combinato	≤ 0.05%		
Grado di protezione	IP68 (500 - 60000 kg), IP67 (100000 - 200000 kg)		
Sensibilità	2 mV/V ± 0.3%	Resistenza di ingresso	700 Ω ± 20
Effetto della temperatura sullo zero	0.005% °C	Resistenza di uscita	700 Ω ± 5
Effetto della temperatura sul fondo scala	0.005% °C	Bilanciamento di zero	± 1%
Compensazione termica	-10 °C / +50 °C	Resistenza d'isolamento	> 5000 MΩ
Campo di temperatura di lavoro	-20 °C / +70 °C	Carico statico massimo (% sul fondo scala)	150%
Crea a carico nominale dopo 30 minuti	0.3%	Carico di rottura (% sul fondo scala)	300%
Tensione di alimentazione massima tollerata	15 V	Deflessione a carico nominale	0.3 mm



(a)



(b)

Figura 2.2.2 Cella di carico Laumas: (a) foto installazione della cella di carico; (b) caratteristiche meccaniche ed elettriche della cella di carico.

Al fine di realizzare delle misure contemporanee sia del sensore capacitivo che della cella di carico si è pensato di utilizzare la stessa scheda di acquisizione (basata su microcontrollore STM32) utilizzata per la lettura dei sensori capacitivi anche per leggere la tensione in uscita della cella di carico (visto che l'elettronica della scheda di acquisizione presenta dei canali di conversione analogico-digitale). Inoltre, si è sviluppata una estensione del software applicativo (GUI) per gestire anche questa tipologia di acquisizione dati, guidando l'utente a creare le rampe di carico-scarico necessarie al processo di caratterizzazione, come mostrato in figura 2.2.3.

Per la definizione della metodologia di acquisizione dei campioni si è fatto riferimento alla “Guida per la taratura di misuratori di pressione” (SIT/Tec-009/05). L'acquisizione dei valori viene effettuata tenendo conto dei seguenti valori iniziali:

- Condizioni ambientali
 - Temperatura
 - Umidità
 - Pressione atmosferica
- Definizione dei parametri di sistema
 - Misura minima e misura massima di pressione applicata al sensore
 - Sensibilità della cella di carico (da inserire direttamente nella GUI)
- Definizione della procedura di calibrazione e raccolta dei dati sperimentali
 - Procedura completa (3 ciclo di misura composti da 11 punti sperimentali, 11 solo punto di ripetibilità)



Figura 2.2.3 Interfaccia grafica (GUI) per la gestione della caratterizzazione dei sensori capacitivi.

Alla fine di una fase di caratterizzazione il software è in grado di fornire un report di caratterizzazione, come mostrato in figura 2.2.4.

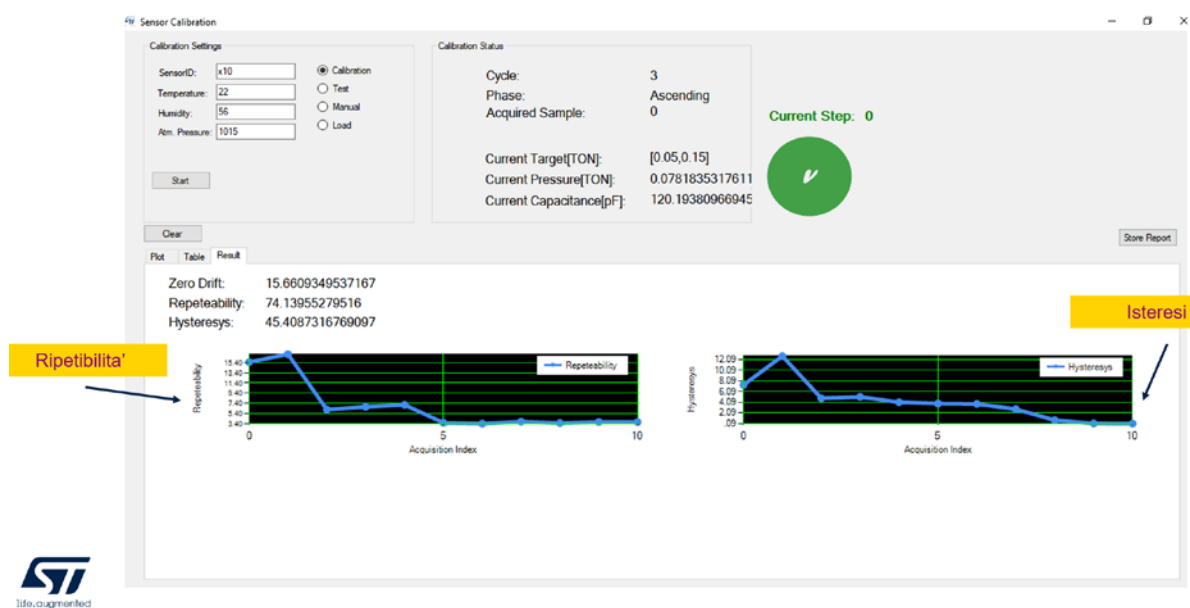


Figura 2.2.4 Generazione del report di caratterizzazione dei sensori capacitivi.

Nella figura 2.2.5 è mostrato un esempio di curva di caratterizzazione per uno dei sensori campione.

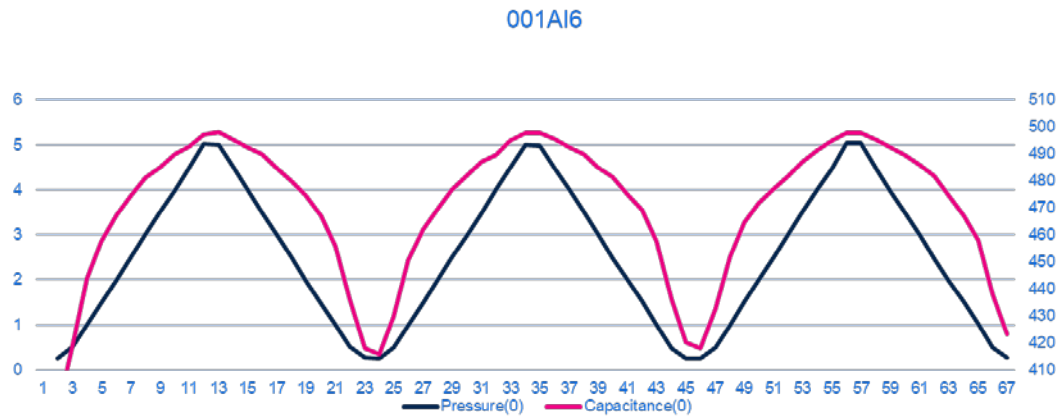


Figura 2.2.5 Esempio di curva di caratterizzazione di un sensore capacitivo campione.

Nell'ambito dell'attività di caratterizzazione dei sensori capacitivi, in collaborazioni con UniPA, è stata svolta anche un'attività di caratterizzazione dei sensori capacitivi installati all'interno di cilindri di malta del diametro di 160mm e 340mm di altezza (figure 2.2.6 e 2.2.7), disposti a 120° l'uno rispetto all'altro.

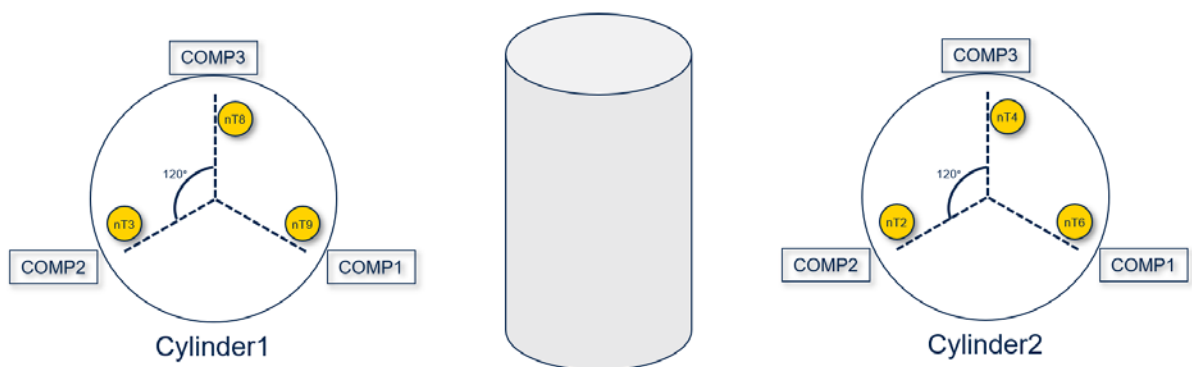


Figura2.2.6 Test di caratterizzazione dei sensori capacitivi in cilindri di malta.

Dall'analisi dei dati letti dai sensori, confrontati con le letture dei comparatori, si è riscontrata una buona linearità nei vari range di test (figura 2.2.8).



(a)



(b)

Figura 2.2.7 (a)(b) foto cilindri di malta usati per i test di caratterizzazione dei sensori capacitivi eseguiti presso i laboratori di UniPA.

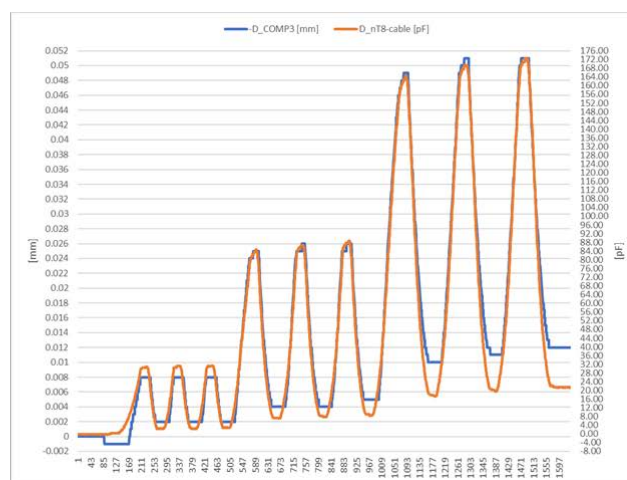
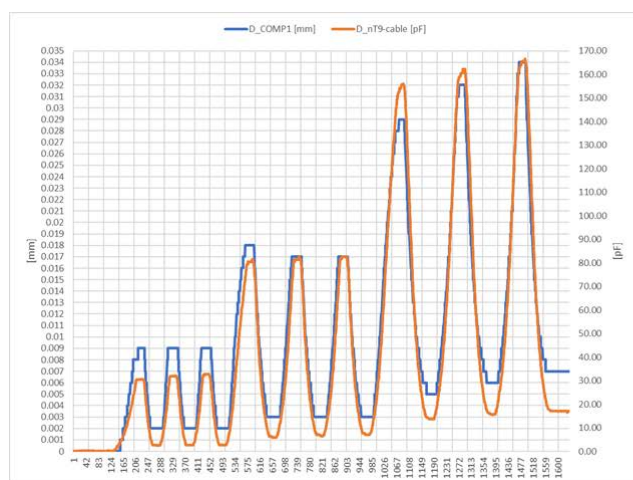


Figura 2.2.8 Confronto fra le letture dei comparatori e quelle dei sensori capacitivi nei test sui cilindri di malta eseguiti presso i laboratori di UniPA.

Nella tabella mostrata in figura 2.2.9, infine, sono riassunte le equazioni di interpolazione dei plot Δl rispetto a ΔC .

		Test1						Test2	
		1st Series		2nd Series		3rd Series			
		Sensor	Trendline	R ²	Trendline	R ²	Trendline	R ²	Trendline
Cylinder2	nT2		$y=0.0004 \cdot x$	0.9812	$y=0.0004 \cdot x - 0.0007$	0.9908	$y=0.0003 \cdot x - 0.0063$	0.9908	$y=0.0003 \cdot x + 0.0034$
	nT4		$y=0.0001 \cdot x$	0.9062	$y=0.0002 \cdot x - 0.0022$	0.9142	$y=0.0002 \cdot x - 0.0052$	0.9649	$y=0.0003 \cdot x - 0.0041$
	nT6		$y=0.0002 \cdot x$	0.9922	$y=0.0038 \cdot e^{0.0161 \cdot x}$	0.9830	$y=7 \cdot 10^{-10} \cdot x^4 - 2 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 0.0005 \cdot x + 0.016$	0.9831	$y=0.0018 \cdot x - 0.7421$
Cylinder1	nT3		N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*
	nT8		$y=3 \cdot 10^{-5} \cdot x$	0.9421	$y=3 \cdot 10^{-5} \cdot x + 3 \cdot 10^{-5}$	0.9874	$y=3 \cdot 10^{-5} \cdot x + 4 \cdot 10^{-5}$	0.9911	$y=0.0002 \cdot x$
	nT9		$y=3 \cdot 10^{-6} \cdot x$	0.9812	$y=2 \cdot 10^{-6} \cdot x + 3 \cdot 10^{-5}$	0.9740	$y=2 \cdot 10^{-6} \cdot x + 3 \cdot 10^{-5}$	0.9809	$y=0.0002 \cdot x$

*COMP2 Missing

Figura 2.2.9 Equazioni di interpolazione delle curve di ΔI rispetto a ΔC .

Un ulteriore risultato di questa attività di caratterizzazione dei sensori capacitivi all'interno dei cilindri di malta è stata l'attività di modellizzazione FEM del sensore capacitivo eseguita da PoliTO, in collaborazione con STMicroelectronics e UniPA.

Fondamentale risultato dell'attività di progettazione e realizzazione del sensore capacitivo è stato quello dei numerosi test eseguiti sia nei laboratori di STMicroelectronics, nelle fasi di sviluppo, test e preparazione dei sistemi da installare nelle varie campagne di test, sia presso i laboratori dei partner del progetto. In particolare:

- Provini e pareti in muratura presso i laboratori di UniPA (OR4)
- Anello di galleria presso i laboratori di UniRM2-Tor Vergata (OR4)
- Pilastri, telai ed elementi da ponte in c.a. presso i laboratori di UniNA (OR4)
- Dimostratore monitoraggio sul Viadotto Canalone (Salerno) gestito da UniNA (OR6)
- Dimostratore monitoraggio ex-ospedale di Agrigento, gestito da UniPA (OR6)

I risultati dettagliati di queste prove sperimentali saranno oggetto dei deliverable dei rispettivi OR.

3 Sensore piezo-resistivo ceramico STMicroelectronics

3.1 Descrizione attività

Nel 2015, STMicroelectronics insieme ad altri partner hanno iniziato a sviluppare un sensore di stress ceramico (piezo-resistivo), studi che negli anni successivi sono stati ulteriormente sviluppati e industrializzati, portando a un brevetto [2] e alla produzione dei primi prototipi di dispositivi nel 2016. Questo sensore è un disco ceramico delle dimensioni di una moneta (Figura 3.1.1a) ed è composto da tre strati di ossido di alluminio (Al_2O_3), con spessori rispettivamente di circa 1.5, 0.5 e 1.5 mm. Lo strato centrale viene incollato a quelli esterni mediante incollaggio di due strati di vetro fuso di spessore compreso tra 10 μm e 50 μm .

All'interno dello strato ceramico intermedio sono posizionate, all'interno di tagli e trincee orientate, diverse piezo-resistenze di ossido di rutenio, per misurare la deformazione del sensore in diverse direzioni, sia separatamente sia in combinazione. Due ponti di Wheatstone mostrati in Figura 3.1.1b sono realizzati sulla faccia superiore dello strato ceramico intermedio e incorporati all'interno dello strato di vetro fuso superiore. Il primo ponte è chiamato 'planare' in quanto dovrebbe essere influenzato solo dalle deformazioni che giacciono nel piano del sensore, mentre il secondo ponte è chiamato '3D' poiché dovrebbe essere influenzato dallo stato di deformazione completo all'interno del sensore. Il sensore ceramico impiegato nella campagna sperimentale include una circuiteria elettronica (basata su un microcontrollore STM32 con memoria flash embedded) incorporata nel sensore, come mostrato nella Figura 3.1.1c, per leggere il basso segnale elettrico dei ponti piezo-resistivi e convertirlo in valore digitale.

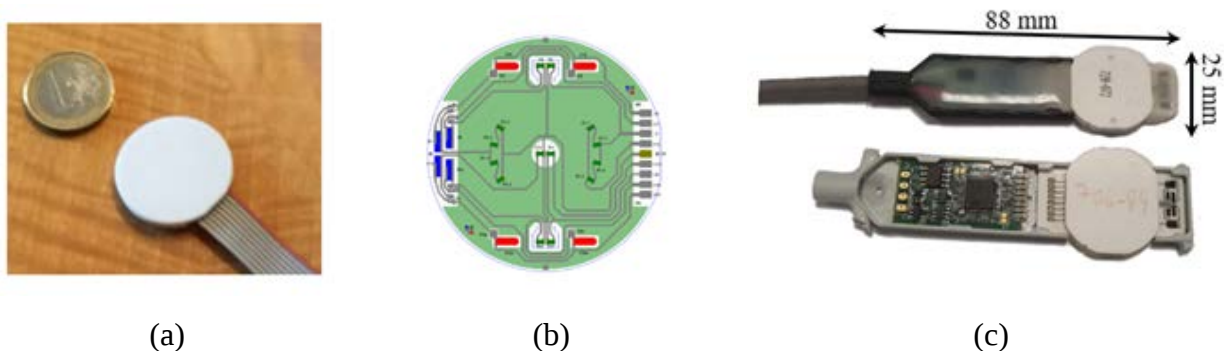


Figura 3.1.2 Sensore di stress ceramico: (a) panoramica; (b) schema elettrico dei ponti di Wheatstone; (c) dettaglio con elettronica integrata del sensore installato nei provini.

Poiché la ceramica è un materiale perfettamente elastico, è possibile un calcolo diretto della sollecitazione in una determinata direzione nel campo delle sollecitazioni tipiche del calcestruzzo. Il principio di funzionamento del dispositivo è la possibilità di misurare la forza agente sulla superficie

intorno al sensore, e quindi la pressione media ortogonale a tale superficie, senza alcuna misura diretta della deformazione del calcestruzzo.

Questi sensori sono caratterizzati singolarmente in fase di produzione e le caratteristiche sono riportate nella tabella 3.1.1:

Parameter	Value
Supply voltage range	from 6 to 13.2V
Supply current	Up to 100mA @ 6V
Idle supply current	15mA @6V
Communication type	CAN bus
Bus speed	up to 1000kbps (max distance 25m)
Bus length	1000m @50kbps
Temperature range	from -40 to 70 °C

Tabella 3.1.1 Caratteristiche del sensore ceramico piezo-resistivo.

È stato sviluppato un sistema di acquisizione dati utilizzato nei test sperimentali, basato su un convertitore USB2CAN da collegare ad un PC/laptop sul quale vengono utilizzati dei software applicativi, sviluppati in Python (a 32 bit), utilizzati per la raccolta dei dati e per il post-processing. Inoltre, vi è un alimentatore dedicato per fornire la tensione con cui si alimenta l'elettronica integrata nel sensore piezo-resistivo.

Una volta configurata la rete CAN di sensori da monitorare, ognuno con un proprio identificativo univoco, il programma applicativo di acquisizione dati cerca di identificare i sensori utilizzando gli indirizzi CAN specificati nel file tramite gli opportuni comandi ed acquisisce i dati solo dei sensori identificati. Una volta lanciata l'esecuzione vengono visualizzati dei dati di configurazione del sistema, gli esiti della ricerca e dell'identificazione dei sensori ed infine i dati grezzi, come mostrato in figura 3.1.2:

```

Checking Node: S1 Id: 01 - NODE NOT FOUND
Checking Node: S2 Id: 02 - NODE NOT FOUND
Checking Node: S3 Id: 03 - DETECTED
Info: [57575757][20363634][54335714][001B0031]
Manuf: [C2C][1.0][C2C-0.2.3-UniPA_test1]
Pr: [C2C_V2][2036363454335714001B0031][84:B4:1B:C0:4D:25]
SW: [bl_c2c_v1-][Jul 07 2021 13:45:05][C2C-0.2.3- UniPA_test1]
Checking Node: S4 Id: 04 - NODE NOT FOUND
Checking Node: S5 Id: 05 - NODE NOT FOUND
Checking Node: S6 Id: 06 - NODE NOT FOUND
Checking Node: S7 Id: 07 - NODE NOT FOUND
Checking Node: S8 Id: 08 - NODE NOT FOUND
Checking Node: S9 Id: 09 - NODE NOT FOUND
Checking Node: S10 Id: 0A - NODE NOT FOUND
Calling subscribe
{"ts": 1625654548000, "r": {"S1": -80, "S2": 63, "TR": 15352, "S1_std": 7,
"S2_std": 8, "TR_std": 1}}
{"ts": 1625654549003, "r": {"S1": -82, "S2": 61, "TR": 15352, "S1_std": 13,
"S2_std": 18, "TR_std": 1}}
{"ts": 1625654550006, "r": {"S1": -81, "S2": 63, "TR": 15352, "S1_std": 19,
"S2_std": 25, "TR_std": 1}}
{"ts": 1625654551010, "r": {"S1": -81, "S2": 63, "TR": 15352, "S1_std": 13,
"S2_std": 14, "TR_std": 1}}
{"ts": 1625654552013, "r": {"S1": -81, "S2": 61, "TR": 15352, "S1_std": 8,
"S2_std": 12, "TR_std": 1}}
{"ts": 1625654553016, "r": {"S1": -80, "S2": 62, "TR": 15353, "S1_std": 18,
"S2_std": 25, "TR_std": 1}}
{"ts": 1625654554019, "r": {"S1": -80, "S2": 63, "TR": 15353, "S1_std": 16,
"S2_std": 21, "TR_std": 1}}
{"ts": 1625654555023, "r": {"S1": -81, "S2": 62, "TR": 15353, "S1_std": 6,
"S2_std": 9, "TR_std": 1}}
{"ts": 1625654556026, "r": {"S1": -81, "S2": 62, "TR": 15352, "S1_std": 16,
"S2_std": 22, "TR_std": 1}}
{"ts": 1625654557029, "r": {"S1": -79, "S2": 64, "TR": 15353, "S1_std": 19,
"S2_std": 23, "TR_std": 1}}
{"ts": 1625654558033, "r": {"S1": -81, "S2": 63, "TR": 15352, "S1_std": 9,
"S2_std": 8, "TR_std": 1}}
{"ts": 1625654559036, "r": {"S1": -82, "S2": 61, "TR": 15352, "S1_std": 13,
"S2_std": 19, "TR_std": 2}}
{"ts": 1625654560039, "r": {"S1": -80, "S2": 63, "TR": 15351, "S1_std": 19,
"S2_std": 25, "TR_std": 1}}

```

Figura 3.1.2 Esempio di log del SW di acquisizione dei sensori piezo-resistivi.

I dati di ogni sensore vengono visualizzati ogni secondo in stringhe in formato JSON con i seguenti campi, mostrati nella tabella 3.1.2:

ts	Timestamp. Ad esempio, il valore 1625654548000 ad esempio corrisponde alle 13:45:05 del 7 luglio 2021
S1	Dato grezzo del valore di tensione 3D
S2	Dato grezzo del valore di tensione planare
TR	Dato grezzo del valore di temperatura
S1_std	Deviazione standard del valore di tensione 3D
S2_std	Deviazione standard del valore di tensione planare
TR_std	Deviazione standard del valore di temperatura

Tabella 3.1.2 Dati acquisiti del sensore ceramico piezo-resistivo.

Nota: i dati grezzi sono i valori medi su 100 campioni acquisiti alla frequenza di 100Hz

I dati vengono automaticamente salvati in un file di nome SensorName_data.jsonl con SensorName pari al nome del sensore letto dal file scenario.json. Il file viene sovrascritto ogni volta che si esegue il programma.

I dati grezzi, per poter essere convertiti in dati ingegneristici, devono essere elaborati utilizzando una procedura che necessita dei dati di calibrazione dei sensori (registrati in fase di produzione).

Il programma applicativo C2CProcess.exe integra l'elaborazione dei dati con la produzione di risultati e grafici.

The screenshot shows the 'C2C Data Process' application window. The 'Info' tab is active, displaying various input fields and processing options. The 'Sensor' section includes a text box for 'Sensor Name/Sn' containing 'S1', a 'Select Sensor' button, and a 'Data Process' button. Below this, the 'Sensor Info' section has fields for 'Sensor ID' and 'Sensor S/N' (containing '20353437434E5117001D0033'). To the right of these fields are two radio buttons: 'Process by sensor Name' (unselected) and 'Process by sensor SN' (selected). Further right are three checkboxes: 'Export Results', 'Export Also Raw Data', and 'Export General Info'. The 'Raw Input Data' section contains a table with columns S1, S2, TR, S1 Std, S2 Std, and TR Std, with rows for Min and Max. The 'Outputs' section contains a table with columns 3D pres [Mpa], PL pres [Mpa], and T [deg], with rows for Average, Min, Max, and Std Dev. A large empty box is to the right of the outputs table, and a 'Plot' button is at the bottom center.

Figura 3.1.2 Interfaccia grafica (GUI) Python per l'elaborazione dei dati dei sensori piezo-resistivi.

Il programma presenta le seguenti quattro pagine (tab):

- **Log data process:** pagina per l'elaborazione dei dati di un singolo sensore. I dati vengono caricati specificando il nome del file che li contiene ed i dati di calibrazione vengono recuperati da un file Excel a partire dal serial number del sensore; il serial number viene indicato esplicitamente o viene recuperato dal file che descrive lo scenario partendo dal sensor name.
- **Sensor group process:** pagina per l'elaborazione di catene di sensori partendo dalla directory che contiene i files coi dati grezzi.
- **Direct computation:** pagina per il calcolo diretto su valori grezzi inseriti manualmente.
- **General parameters:** pagine per specificare il file dello scenario ed il file di calibrazione.

Nella pagina Log Data Process è necessario specificare il nome del sensore o il serial number dello stesso. Volendo elaborare i dati a partire dal serial number è necessario specificarlo nell'opportuna casella e selezionare il radio-button "Process by sensor SN". L'elaborazione viene eseguita selezionando il tasto "Data Process"; il programma chiede il nome del file di acquisizione e procede ad elaborare tutti i record visualizzando le statistiche dei dati grezzi ed ingegneristici e la lista di tutti i dati ingegneristici. Tramite il tasto plot è possibile visualizzare e salvare il grafico dei dati ingegneristici, come mostrato in figura:

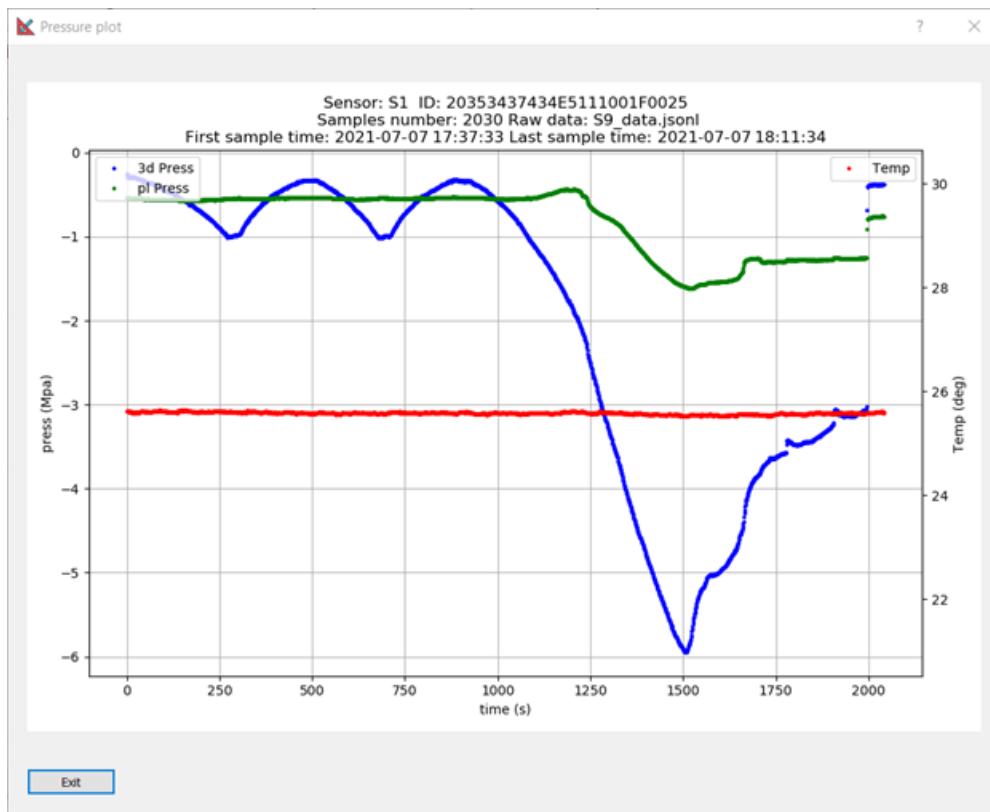


Figura 3.1.3 Plot dei dati dei sensori piezo-resistivi.

3.2 Risultati attività

I sensori ceramici piezo-resistivi sono stati utilizzati nei test eseguiti sia nei laboratori di STMicroelectronics, nelle fasi di sviluppo, test e preparazione dei sistemi da installare nelle varie campagne di test, sia presso i laboratori dei partner del progetto. In particolare, presso i laboratori di UniPA per i test sui provini e le pareti in muratura (OR4), presso UniRM2-Tor Vergata per i test sull'anello di galleria (OR4) e presso UniNA per i test sugli elementi in c. a. (OR4).

4 Sviluppo di un reference design basato su core RISC-V per la lettura di sensori capacitivi, implementato su dispositivo FPGA

4.1 Descrizione attività

Nell'ambito dell'attività di ricerca per l'OR1, STMicroelectronics ha sviluppato un reference design che utilizza un microcontrollore proprietario (nome in codice STRive) basato su un'architettura RISC-V, implementato su dispositivo programmabile FPGA (Field Programmable Gate Array) mostrato in figura 4.1.1.

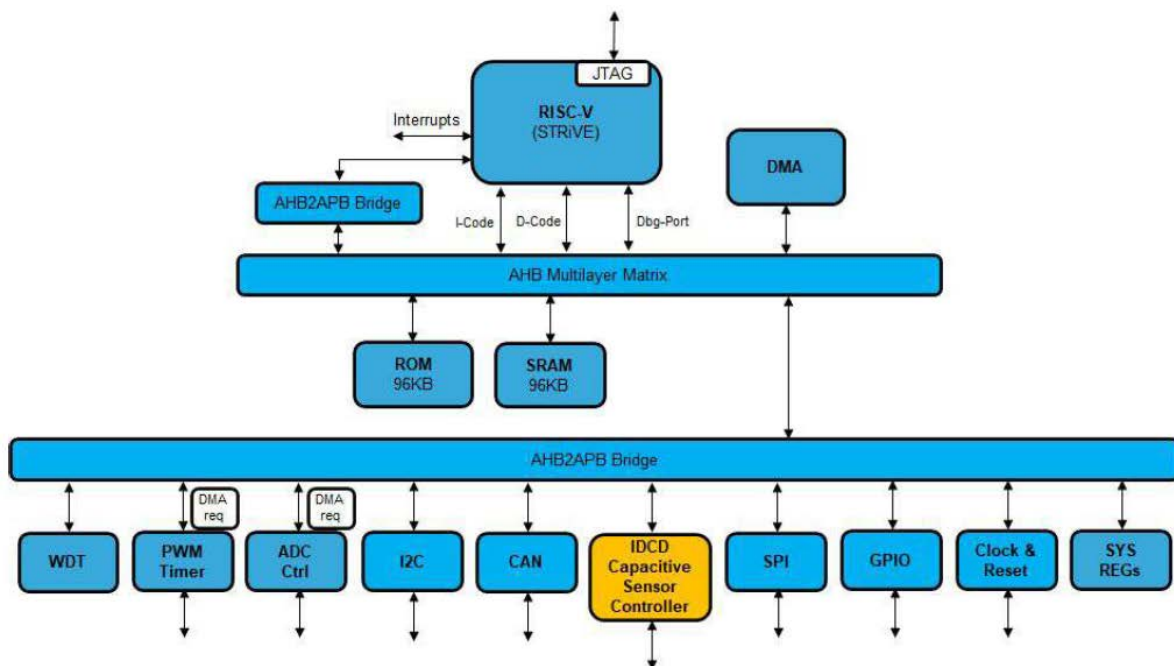


Figura 4.1.1 Architettura SoC (system-on-chip) basata su microcontrollore STRive per la lettura di sensori capacitivi.

Il cuore del SoC è lo STRive, un microcontrollore basato su RISC-V progettato da STMicroelectronics che trova la sua origine in Ibex, ovvero un core RISC-V a 32 bit scritto in SystemVerilog con una pipeline a due stadi che implementa l'ISA RV32IMC. Il microcontrollore STRive funge anche da controller di interrupt e da bus master attraverso i bus istruzioni e dati (ovvero I-Code e D-Code rispettivamente) collegati alla matrice di interconnessione basata su protocollo di comunicazione AMBA™ di ARM®, che specifica il comportamento dei bus AMBA Bus ad alte prestazioni (AHB) e Advanced Peripheral Bus (APB). Il microcontrollore STRive contiene, inoltre, un porta di debug master AHB dedicata (Dbg-Port) utilizzata dall'interfaccia JTAG (che è realizzata all'interno del microcontrollore stesso), una porta slave APB necessaria per configurare entrambi alcuni importanti registri interni (es. timer interno e controller) e la porta JTAG.

Collegati al bus AHB ci sono anche i blocchi funzionali più importanti di un SoC dopo il microcontrollore, cioè i blocchi SRAM/ROM (da 96 kB ciascuno) e il DMA, che è un blocco funzionale sfruttato per eseguire accessi indipendenti dal processore a memoria, consentendo al microcontrollore di continuare il suo funzionamento senza il collo di bottiglia causato da lunghi trasferimenti di memoria. Un altro bridge AHB-APB si comporta come un mezzo tra la parte primaria del sistema (ovvero tutti i componenti collegati al bus AHB) e la parte secondaria, dove sono disponibili diverse periferiche, quali: Watchdog Timer (WDT), Pulse-Width Modulation (PWM) timer, Analog-to-Digital Converter (ADC) controller, interfacce seriali Inter-Integrated Circuit (I2C) and Serial Peripheral Interface (SPI), Controller Area Network (CAN) bus, porte General-Purpose I/O (GPIO), blocco di generazione dei clock e reset, registri di sistema e l'interfaccia per la lettura dei sensori capacitivi IDCD (Iterative Delay-Chain Discharge).

4.2 Risultati attività

Focus dell'attività è stata l'interfaccia per la lettura dei sensori capacitivi STMicroelectronics, dotata sia di una parte "analogica" di condizionamento del segnale sia di una parte "digitale" di conversione del dato letto e di controllo. Senza entrare troppo nei dettagli implementativi di questa interfaccia, l'IDCD gestisce la conversione diretta capacità-valore digitale, secondo lo schema di figura 4.1.2.

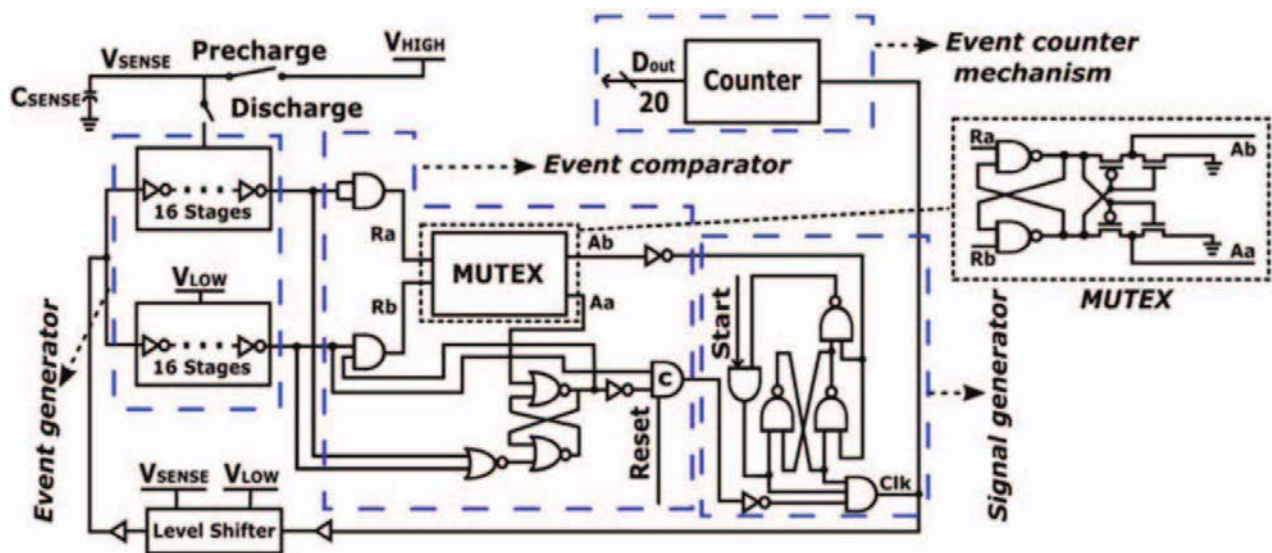


Figura 4.1.2 Schema circuito di conversione capacità-valore digitale controllato dall'interfaccia IDCD.

È stato fatto, quindi, un lavoro di partizionamento del circuito fra ciò che poteva essere incluso nella parte digitale del SoC, implementabile all'interno dell'FPGA. Il dispositivo FPGA utilizzato è della serie Artix-7 della Xilinx.

Nella figura 4.1.3 Schema circuito di conversione capacità-valore digitale controllato dall'interfaccia IDCD.

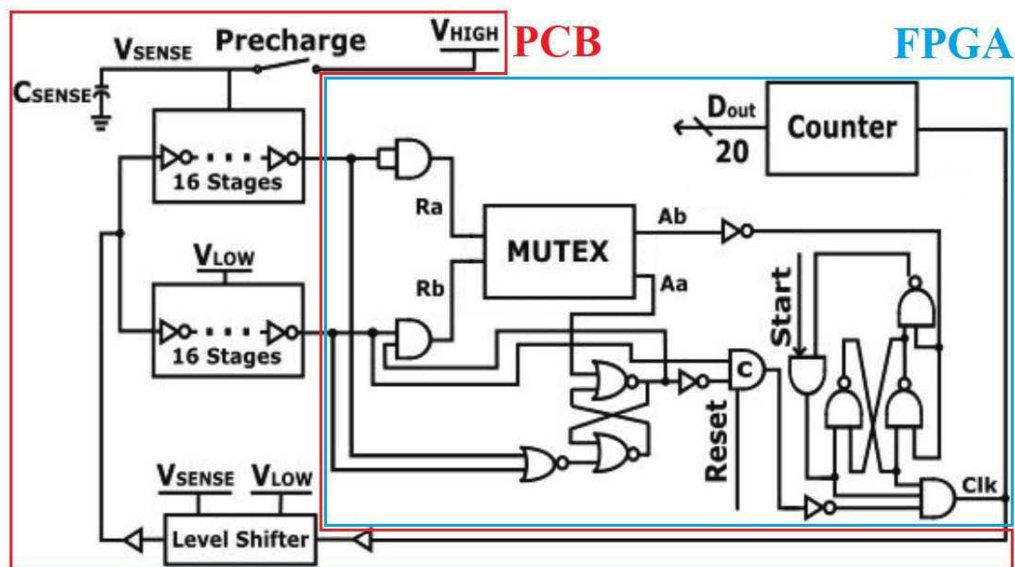


Figura 4.1.3 Partizionamento del circuito di conversione capacità-valore digitale controllato all'interfaccia IDCD (riquadro rosso: parte analogica realizzata su PCB dedicato; riquadro blu: parte digitale implementata nell'FPGA). Il risultato finale è quello mostrato nella foto di figura 4.1.4.

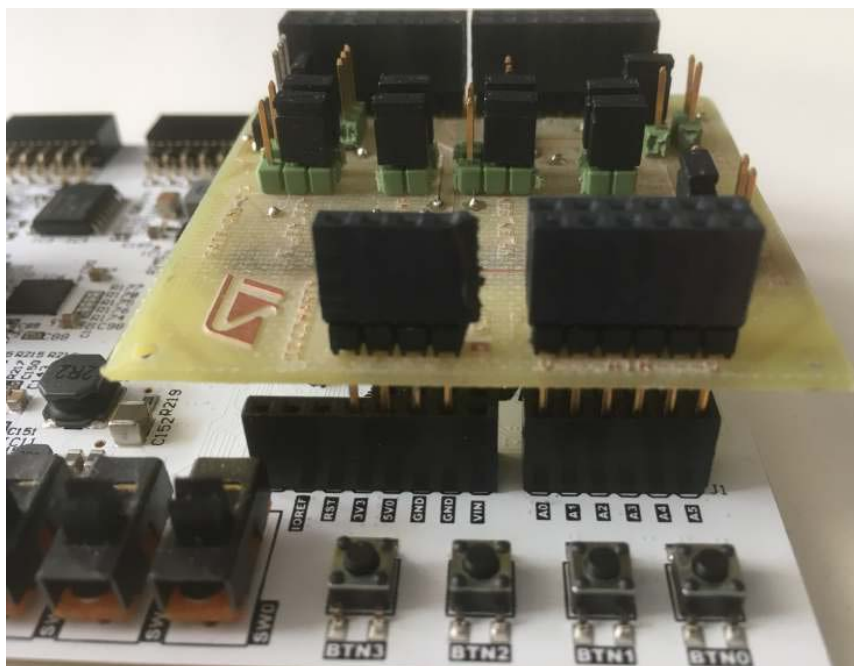


Figura 4.1.4 Foto del sistema PCB+FPGA.

Per la caratterizzazione del prototipo è stato utilizzato un LCR meter Iso-Tech LCR 819, con capacità campione nel range (1 ÷ 1000 nF), mentre i risultati sperimentali sono mostrati in figura 4.1.5.

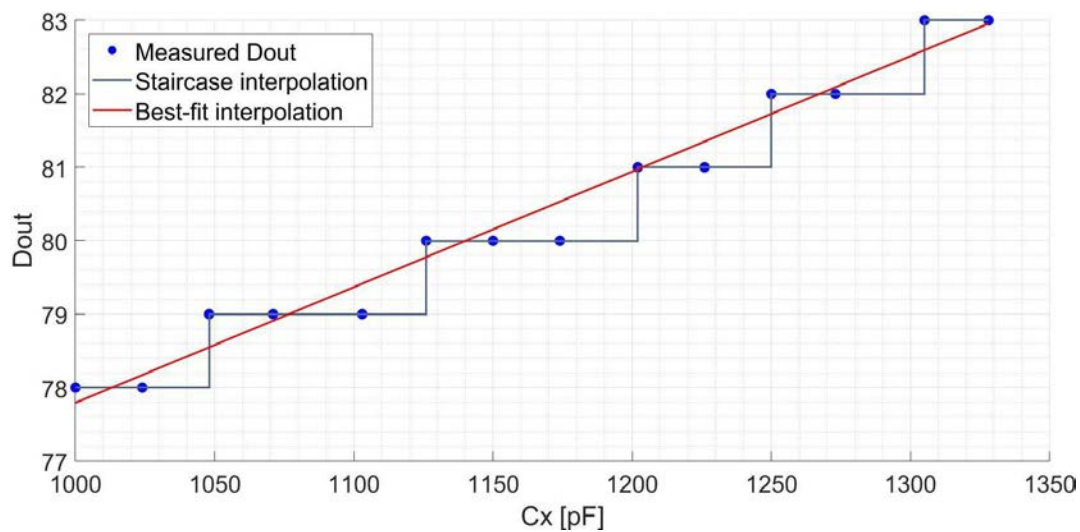


Figura 4.1.5 Grafici dei valori digitali misurati dall'interfaccia IDCD rispetto alle capacità campione.

5 Sviluppo del reference design del sistema di acquisizione e raccolta dati dei sensori capacitivi STMicroelectronics

5.1 Descrizione attività

Quest'attività di sviluppo del sistema è stata svolta in più fasi, partendo da un sistema custom basato su microcontrollore STM32, già testato per la lettura di sensori capacitivi, arrivando ad una sua implementazione ottimizzata e con feature aggiuntive, che saranno descritte in seguito.

5.2 Risultati attività

5.2.1 Scheda Nodo Stand-alone

La scheda Nodo Stand-alone è una piattaforma sviluppata da STMicroelectronics per la lettura di sensori di capacitivi utilizzati per il monitoraggio strutturale. Essa nasce come prodotto totalmente customizzato ed è basata sul performante microcontrollore a 32 bit STMicroelectronics STM32, che per questa applicazione garantisce ottime performance sia in termini di prestazioni che di connettività.

In particolare, in questa applicazione è stato impiegato il microcontrollore STM32L496RGT6, basato sul core ARM Cortex-M4, con una frequenza di clock 80 MHz e 1 Mbyte di Flash; dispone inoltre sia di canali di rilevamento capacitivo (TSC, Touch Screen Controller) che di canali di conversione Analogico/Digitale e garantisce diverse connettività quali USB-OTG, LCD, e molteplici protocolli seriali per l'inter-connettività con diverse periferiche a bordo scheda.

5.2.2 Nodo stand-alone - Caratteristiche

Il nodo è composto sostanzialmente da una sezione digitale che ospita il micro con tutte le sue periferiche ed ha una sezione dedicata per la misura dei sensori capacitivi, in particolare possiamo riassumere di seguito le caratteristiche della board (figura 5.2.1):

- Fino a 4 canali capacitivi,
- Accelerometro lineare 3 assi,
- Fino a 8 ID (node address) configurabili tramite micro-switches,
- Led di debug,
- USB port,
- Bus CAN over ethernet,
- Modulo RF LoRa (Opzionale),



Figura 5.2.1 Foto della board nodo stand-alone.

5.2.3 Nodo stand-alone - Configurazione

Il nodo è stato utilizzato in varie applicazioni e casi studio per l'acquisizione del valore capacitivo dei sensori installati per il monitoraggio strutturale. Per sfruttare al meglio le performance della scheda e possibile operare in diverse configurazioni; le schede nodo, infatti sono configurabili e si possono utilizzare per la sola acquisizione del dato capacitivo (configurazione NODO) oppure si possono utilizzare per acquisire il dato e renderlo disponibile attraverso la porta USB (configurazione BRIDGE).

Una scheda nodo in configurazione bridge può gestire fino a otto (8) schede nodo, configurabili a loro volta attraverso un micro-switch installato a bordo.

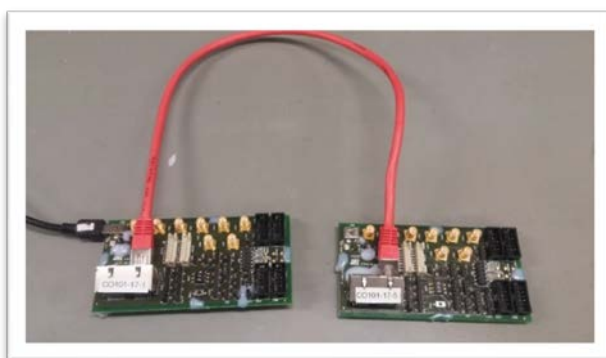


Figura 5.2.2 Foto del sistema bridge-nodo stand-alone.

La comunicazione tra le diverse schede avviene tramite bus CAN attraverso i connettori Rj45 posti a bordo mentre il bridge, attraverso la connettività USB, permette di interfacciarsi con apparecchiature

quali PC o similare (windows o unix based) per elaborare i dati acquisiti. Una configurazione tipica è quella mostrata in figura 5.2.2.

Questa configurazione è stata ampiamente utilizzata durante tutte le fasi di sviluppo/debug in laboratorio di tutti i sistemi di monitoraggio strutturale sviluppati per il progetto.

5.2.4 Nodo stand-alone - Applicazioni

Un'applicazione della scheda nodo stand-alone è stata quella del monitoraggio dell'anello di galleria in c. a. effettuati presso l'UniRM2-Tor Vergata, dove sono stati impiegati 24 sensori collegati a 6 nodi (figura 5.2.3)



Figura 5.2.3 Foto del sistema bridge-nodo stand-alone usato nei test dell'anello di galleria presso UniRM2-Tor Vergata.

La comunicazione tra i vari nodi ed il bridge viene garantita dal bus CAN proprietario, il bridge, collegato ad un PC attraverso la connettività USB, ha permesso di monitorare lo stato dell'anello durante delle prove di compressione effettuate in laboratorio. L'acquisizione dei dati è stata effettuata attraverso una GUI dedicata (sviluppata da STMicroelectronics) installata sul PC collegato al bridge (figura 5.2.4).

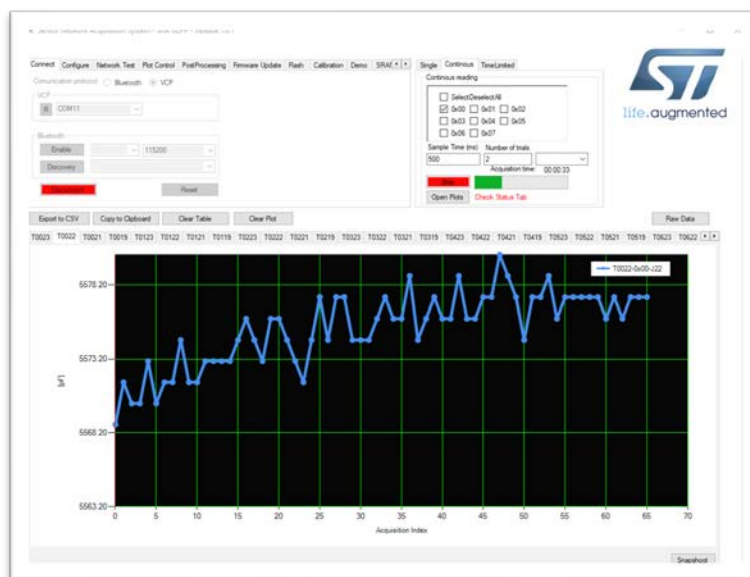


Figura 5.2.4 Screenshot dell'interfaccia grafica utilizzata per l'acquisizione dei dati e loro visualizzazione real-time.

Un'altra applicazione delle schede nodo su strutture in c. a. è stata fatta presso il laboratorio di Ingegneria di UniNA-San Giovanni a Teduccio, dove sono stati installati su un telaio in c. a. 12 sensori capacitivi collegati a 5 nodi (figura 5.2.5)

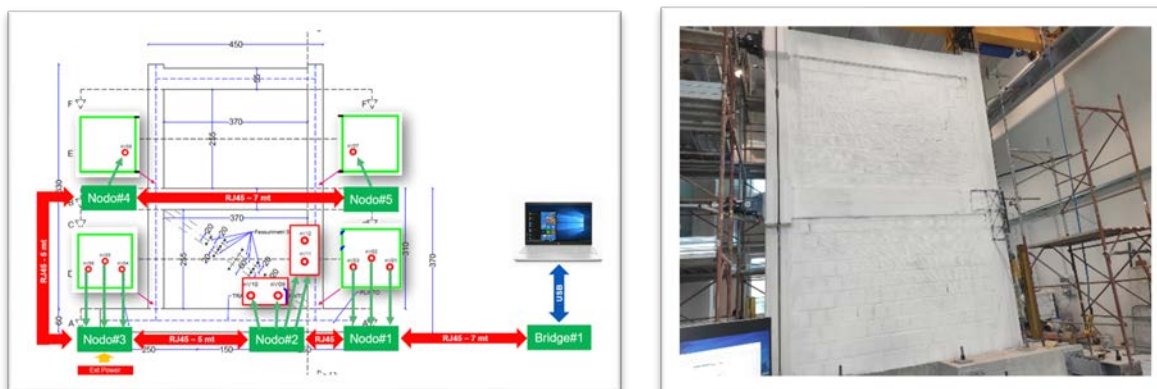


Figura 5.2.5 Schema e installazione del sistema di monitoraggio sul telaio in c. a. presso UniNA-San Giovanni a Teduccio.

Il nodo stand-alone è stato impiegato anche per il monitoraggio strutturale di elementi in muratura, in particolare presso il laboratorio del dipartimento di Ingegneria dell'Università di Palermo sono state effettuate diverse prove distruttive su provini sottoposte a carico verticale (figura 5.2.6) e su pareti (figura 5.2.7) in muratura (laterizio e calcarenite).

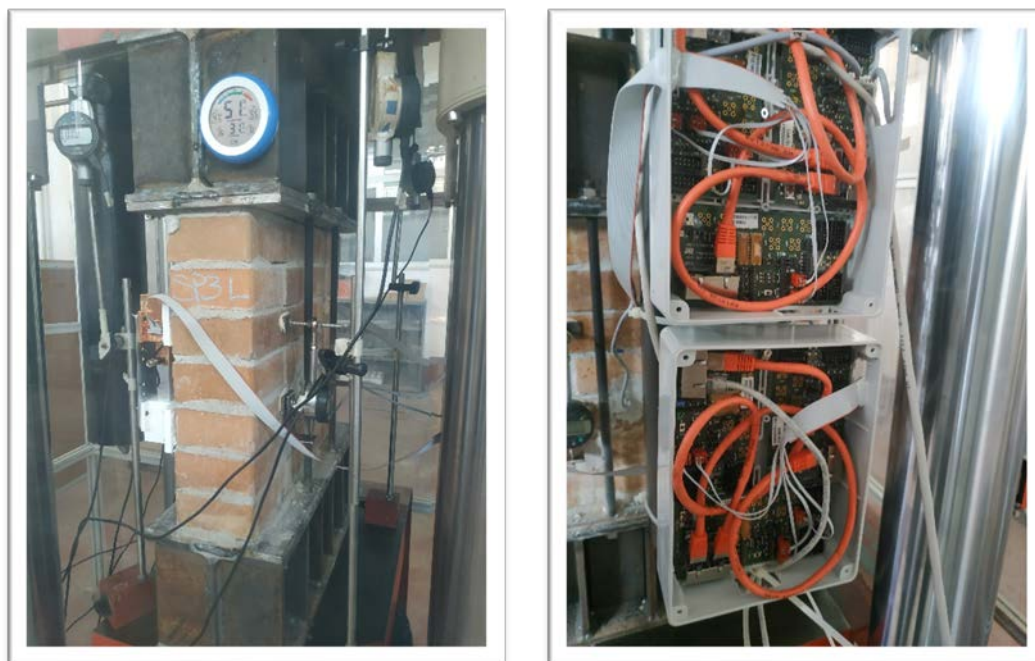


Figura 5.2.6 Sistema di monitoraggio utilizzato sui provini in muratura presso i laboratori di UniPA.



Figura 5.2.7 Sistema di monitoraggio utilizzato nei test sulle pareti in muratura presso i laboratori di UniPA.

5.2.5 Nodo light – Descrizione

Durante le attività di monitoraggio è stato sviluppato, in via del tutto sperimentale, un fessurimetro tridimensionale (figura 5.2.6) con elettronica a bordo, per il monitoraggio delle fessure e gli spostamenti su strutture sottoposte a sollecitazioni esterne.

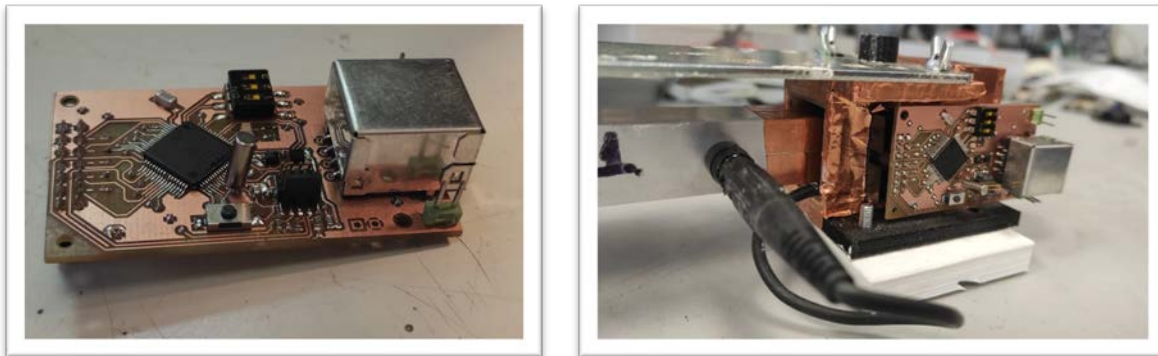


Figura 5.2.6 Foto del prototipo del fessurimetro con elettronica a bordo.

Il principio di funzionamento è sempre quello capacitivo, ovvero la misura della capacità tra l'elemento centrale e le facce di un parallelepipedo (figura 5.2.7).

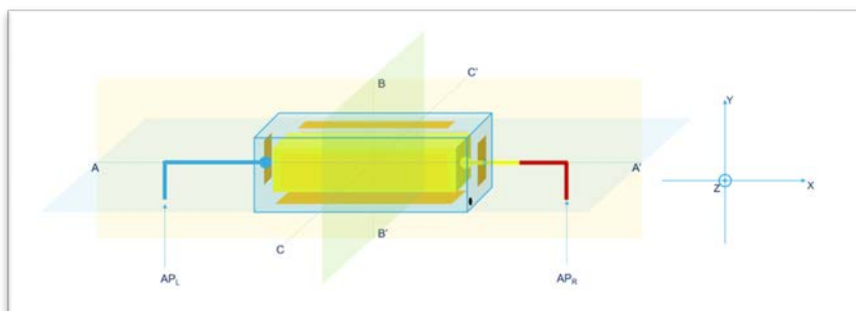


Figura 5.2.7 Schema di principio del fessurimetro tridimensionale.

La scheda nodo light nasce come semplificazione di un nodo stand-alone e con la funzione specifica di leggere sensori capacitivi in modalità nodo. Rispetto alla più completa versione stand-alone conserva il micro STM32 con i canali di rilevamento capacitivo e la connettività CAN over ethernet.

5.2.6 Nodo light – Applicazioni

Questa particolare customizzazione della board ha permesso di testare il fessurimetro in diversi test e casi studio. Le modalità di acquisizione sono identiche a quelle di un normale nodo; quindi, restano invariate sia la connettività verso il bridge che verso la GUI.

In particolare, il fessurimetro è stato utilizzato presso UniPA per monitorare lo spostamento lineare e roto-traslazionale su diversi muretti in muratura posti a compressione verticale e su una parete anch'essa in muratura con due luci privata del maschio murario centrale al fine di monitorare il carico laterale (figura 5.2.8). Presso UniNA si sono svolti altri casi studio in cui si sono monitorate delle fessure su delle strutture con questo prototipo di fessurimetro.

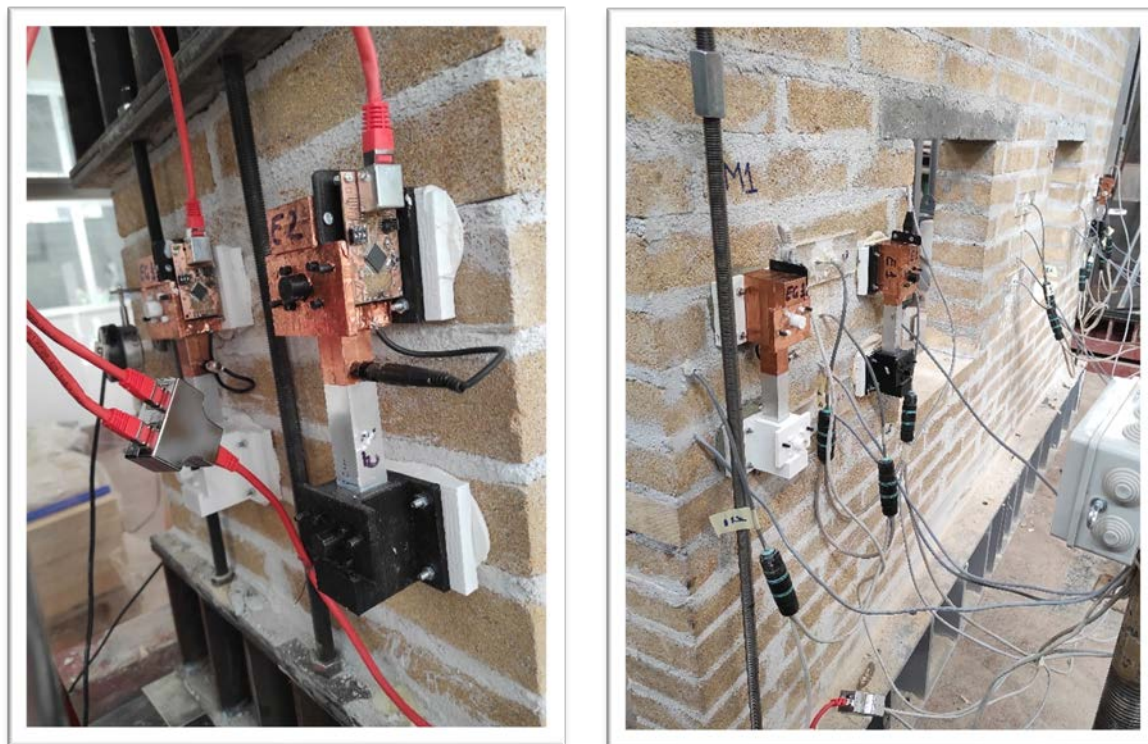


Figura 5.2.8 Test del fessurimetro tridimensionale presso UniPA.

5.2.7 Nodo Smart - Descrizione

La scheda Nodo Smart è una piattaforma sviluppata da STMicroelectronics per la lettura di sensori di capacitivi utilizzati per il monitoraggio strutturale all'interno di attività di ricerca INSIST. Sulla base dell'esperienza maturata con la board Nodo Stand-alone e dopo aver valutato le criticità e i punti di forza dell'utilizzo di questa board con i sensori capacitivi si è pensato di migliorarne le prestazioni e customizzarla secondo le specifiche richieste sia dal sensore capacitivo che dalle applicazioni previste dal progetto INSIST.

Nei vari mesi di utilizzo della board Nodo Stand-alone sia nei nostri laboratori che nei laboratori dei vari partners coinvolti sono stati valutati a pieno le potenzialità del sistema di misura e sono state messe a punto una serie di azioni da intraprendere per migliorare sia il sistema di acquisizione che l'integrazione in funzione dei campi applicativi che sono sicuramente molto diversi rispetto ad un ambiente di laboratorio chiuso e controllato. In particolare:

- Miglioramento delle prestazioni e massima integrazione dei canali di rilevamento capacitivo,
- Studio e valutazione di un metodo di lettura più performante del sensore capacitivo soprattutto in termini di velocità di acquisizione,
- Facile configurabilità sia del bus CAN che delle periferiche a bordo,
- Facile integrazione con sistemi più complessi e con diverse situazioni ambientali a contorno,

Sulla base di queste considerazioni è iniziato uno studio di fattibilità di una nuova board che avesse a bordo solo lo stretto necessario mentre, parallelamente, è stato portato avanti lo studio di fattibilità di un nuovo sistema di acquisizione. Secondo quanto detto la nuova board nodo doveva mantenere le stesse caratteristiche di sistema della precedente; infatti, il micro utilizzato resta lo stesso della versione precedente, l'intervento sostanziale è stato effettuato in termini di ingombro e performance ottimizzando al meglio il layout della parte di rilevamento capacitivo e tutte le periferiche necessarie per il corretto funzionamento della board. Restano a schematico oltre che il micro anche la parte di configurazione dell'ID della scheda che avviene tramite dip-switch a tre posizioni (che permette di gestire fino a 7 nodi) e l'accelerometro lineare, mentre la parte di led utilizzati come debug della scheda o come segnalazione viene ridotta a due unità, che risultano più che sufficienti per il tipo di applicazione. E' stato aggiunto un sensore di temperatura on board ed è stato ottimizzato il circuito relativo ai 4 canali di rilevamento capacitivo. In questa prima fase si è pensato di non prevedere la connettività Usb ed utilizzare la scheda solo in modalità NODO.

Al fine di ottimizzare al meglio tutte le fasi di realizzazione della scheda abbiamo optato per una realizzazione prototipale della scheda partendo dallo schematico del nodo stand-alone, che ottimizzato e rivisto ha portato al primo schema circuitale mostrato in figura 5.2.9.

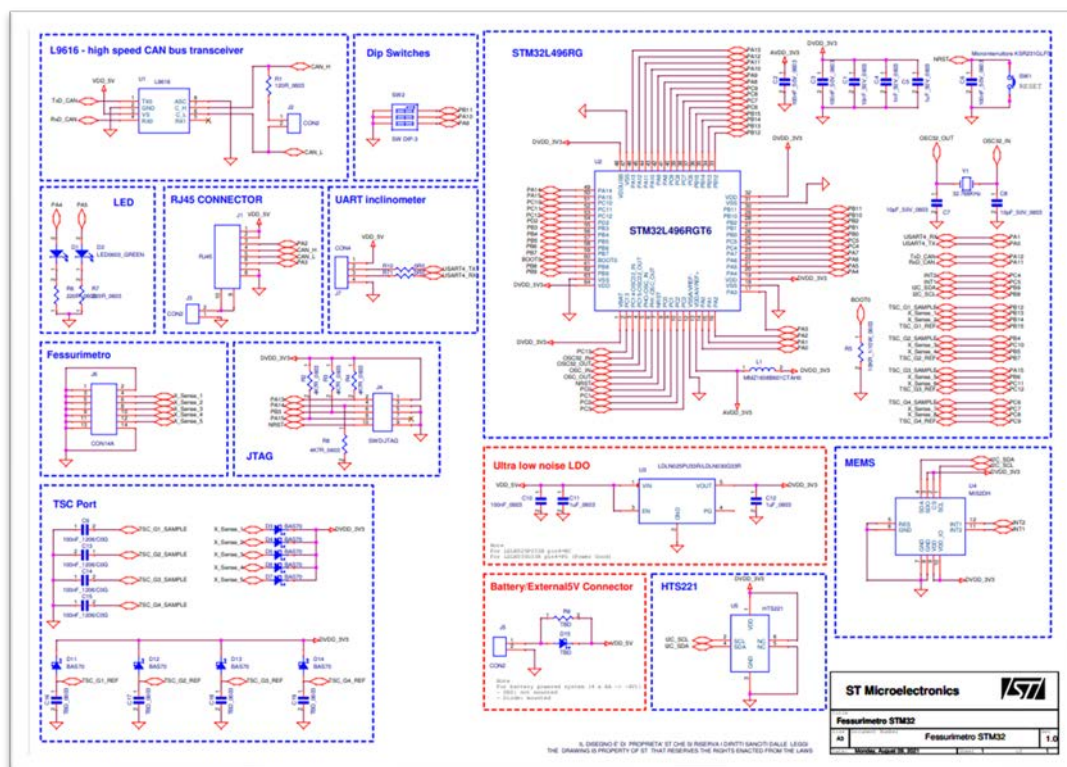


Figura 5.2.9 Schematico scheda nodo smart.

Lo schematico è stato realizzato con l'ausilio del tool Capture di Cadence, mentre con l'ausilio di tool Orcad sempre di Cadence si è passati alla realizzazione del primo layout della scheda, mostrato in figura 5.2.10.

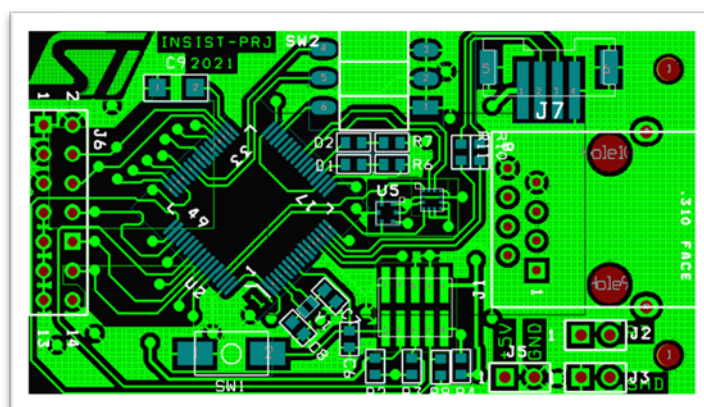


Figura 5.2.10 Layout scheda nodo smart.

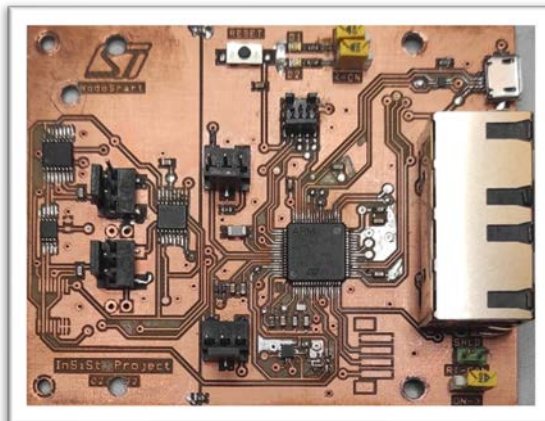
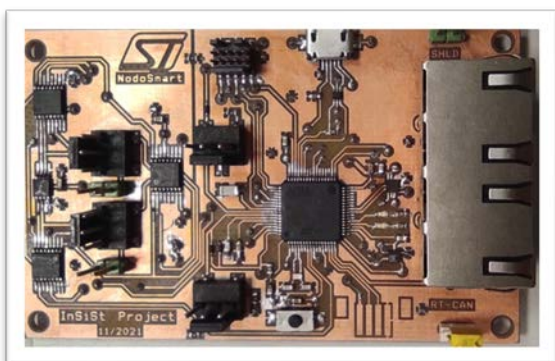


Figura 5.2.11 Prototipo scheda nodo smart.

La scheda nodo smart è stata realizzata inizialmente come prototipo di laboratorio (figura 5.2.11) con l’ausilio di una prototipatrice LPKF ed è stata ottimizzata in termini di performance e di connettività. Il risultato è stato, quindi, una scheda con tutto il necessario per l’acquisizione di sensori capacitivi sia con tecnica di acquisizione TSC che CVC, ottenendo un’ottimizzazione sia nelle dimensioni (molto compatta) che del numero di componenti utilizzati (BOM ottimizzata, quindi minore costo).

Della precedente versione mantiene il microcontrollore (sempre l’STM32L496RGT6) e la sezione relativa ai canali di rilevamento capacitivo (TSC) che tuttavia sono stati migliorati in termini di layout. La novità rispetto alla versione stand-alone è l’aggiunta della sezione di lettura CVC (Capacitance Voltage Converter) basato su switched capacitors, implementata ex novo (a valle di una fase di simulazione con l’ausilio del tool di Cadence PSpice) dopo esser stata testata come shield (PCB custom di espansione) su una board Nucleo STM32 (figura 5.2.12), configurata mediante l’uso della piattaforma STMicroelectronics STM32 CubeMx.

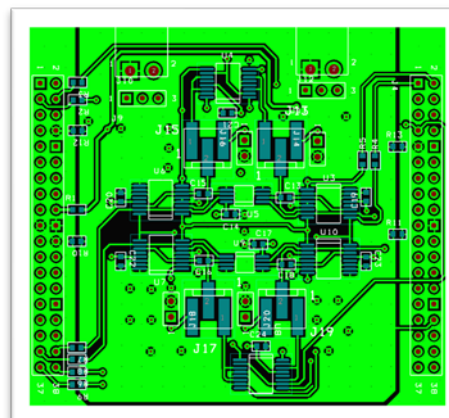
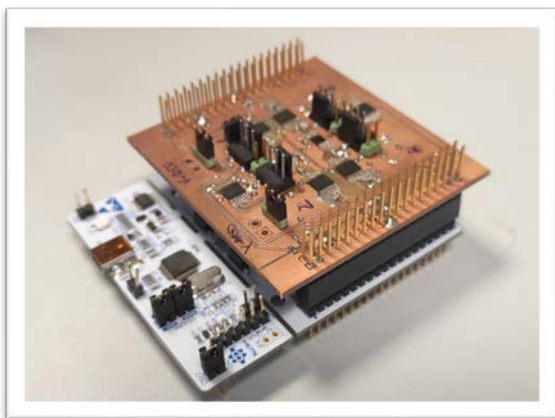


Figura 5.2.12 Sistema STM32-Nucleo e PCB di espansione per la caratterizzazione dell’interfaccia CVC.

5.2.8 Nodo Smart - Caratteristiche

Dopo la fase di progettazione, sviluppo e test nei nostri laboratori, si è passati alla realizzazione (grazie a fornitori accreditati STMicroelectronics) della versione di produzione del nodo smart (figura 5.2.13), che poi è quella che è stata usata nelle installazioni dei dimostratori del progetto (OR6). I vari test di laboratorio hanno permesso di ottimizzare ulteriormente le performance della scheda portando così alla definizione del prototipo definitivo della scheda che è stata progettata interamente all'interno dei nostri laboratori, sia come schematico che come layout. La realizzazione ed il montaggio dei prototipi è stato successivamente affidato ad un fornitore qualificato STMicroelectronics a cui sono stati forniti i file di progetto gerber e le specifiche di realizzazione. La versione finale è stata realizzata su un substrato FR4 a 4 layers. Essa si compone sostanziosamente di una sezione digitale che ospita il micro con tutte le sue periferiche compresa una sezione dedicata per la misura dei sensori capacitivi ed una sezione separata per la parte del CVC.

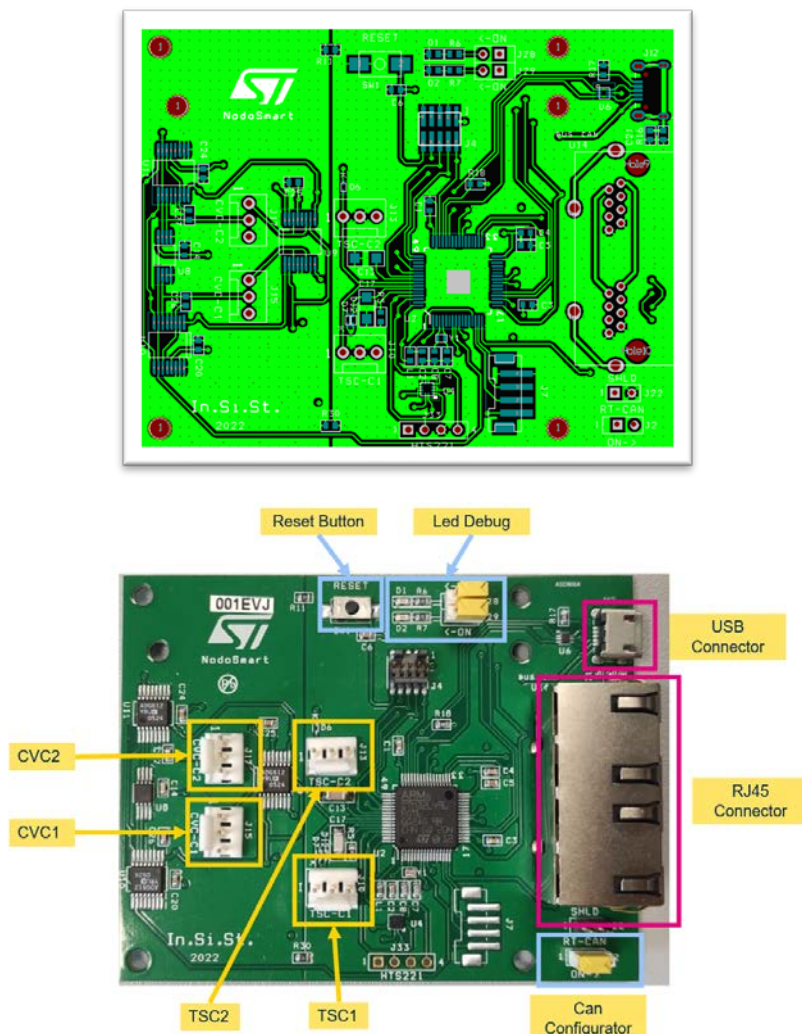


Figura 5.2.13 Layout e foto del nodo smart (versione production).

Le caratteristiche principali della board sono le seguenti:

- 2 canali TSC,
- 2 Canali CVC,
- Accelerometro lineare 3 assi,
- Led di debug,
- USB port,
- Bus CAN over ethernet,

La sezione CVC è stata separata del tutto dal resto della scheda, dotata di un proprio piano di massa indipendente per isolarla al meglio dai disturbi provenienti dal resto della board.

I due canali CVC e TSC differiscono sia per metodologia di misura che per prestazioni. Il TSC restituisce una misura molto precisa con una frequenza massima di 4Hz, il CVC invece riesce a raggiungere frequenze ben più alte a discapito di una minor precisione di misura.

Proprio alla luce di questa sostanziale differenza tra le due modalità di acquisizione nelle varie applicazioni abbiamo utilizzato i canali TSC per le misura statiche e il CVC per quelle dinamiche dove era fondamentale monitorare la variazione repentina del dato piuttosto che il dato stesso.

Tra per possibili espansioni implementate ma non utilizzate della scheda troviamo un connettore tipo JST (J7) da utilizzare per possibili espansioni su bus UART e il connettore J33 per possibili espansioni su bus I2C.

5.2.9 Nodo Smart - Configurazione

Le schede nodo smart sono configurabili e si possono utilizzare per la sola acquisizione del dato capacitivo (configurazione NODO) oppure si possono utilizzare per acquisire il dato e renderlo disponibile attraverso la porta USB (configurazione BRIDGE).

A differenza della precedente versione (nodo stand-alone), la configurazione in modalità nodo con conseguente assegnazione dell'ID avviene via software attraverso la GUI dedicata, questo permette una rapida configurazione, anche a distanza (direttamente su bus CAN) e permette di gestire fino ad un massimo di 16 schede nodo collegate allo stesso bridge. Quest'ultima opzione si può modificare qualora si volesse aumentare in numero di schede nodo collegate ad un unico bridge.

La comunicazione tra le diverse schede avviene tramite bus CAN attraverso i connettori Rj45 posti a bordo mentre il bridge, attraverso la connettività USB, permette di interfacciarsi con apparecchiature

quali PC o similare (windows o unix based) per elaborare i dati acquisiti. Una configurazione tipica è quella mostrata in figura 5.2.14.



Figura 5.2.14 Configurazione multi-nodo + bridge del sistema nodo smart.

I led di debug posti sulla scheda NODO e attivabili dai jumper J28 (Green) e J29 (Red) restituiscono lo stato della board e la sua configurazione. Il led verde indica il tipo di modalità operativa, se lampeggia velocemente la board è in modalità BRIDGE, se lampeggia ma con lunghe pause tra un gruppo di lampeggi ed un altro la scheda è in modalità NODO, in questa configurazione il numero di lampeggi indica l'ID della scheda stessa.

Il led rosso invece indica eventuali malfunzionamenti, rimane spento se non ci sono problemi alla scheda e alle sue periferiche oppure lampeggia velocemente se ci sono errori.

Il jumper J22 serve per abilitare la resistenza di terminazione sul bus CAN. Questa operazione va effettuata sulle schede in configurazione NODO e va fatto sulla prima e sull'ultima scheda del gruppo di schede collegate al bridge.

Il layout della scheda nodo è stato ottimizzato anche in termini di ancoraggio meccanico per essere ospitata dalla cassetta scelta per le installazioni esterne, come ad esempio, i dimostratori del progetto (OR6). In particolare, per essi è stata utilizzata una scatola a tenuta stagna, prodotta dalla Hammond, serie 1555, modello 1555J2F42GY con LID flangiato (ideale per il montaggio di schede a circuito stampato o componenti montati su guida DIN), mostrata in figura 5.2.15.

È stato scelto questo tipo di contenitore perché progettato per ambienti industriali difficili e applicazioni all'aperto (sicurezza, wireless all'aperto, controlli, ecc.), ideale per il montaggio di schede a circuito stampato e con montaggio a parete. L'interno è fissato in modo sicuro poiché le viti LID si trovano dietro il LID, inoltre può essere reso più sicuro se montato a parete con viti di sicurezza (viti antimanomissione):

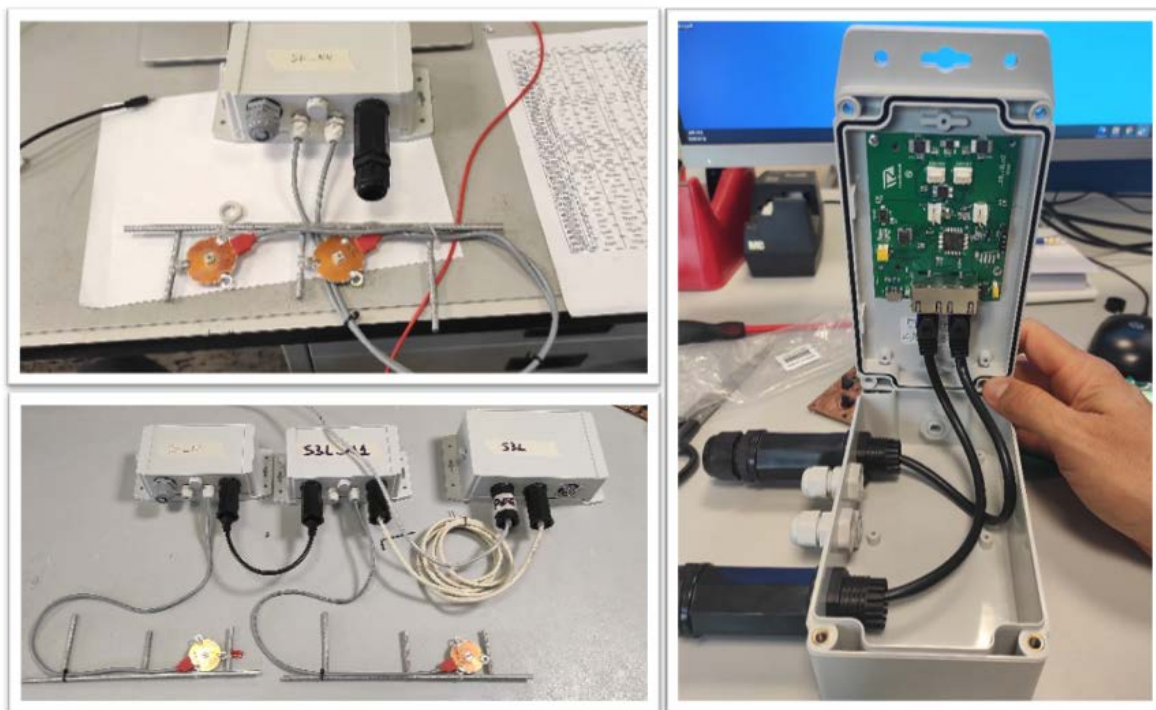


Figura 5.2.15 Foto del nodo smart all'interno della scatola ed esempio di utilizzo di esse per le installazioni dei dimostratori del progetto.

Come detto l'acquisizione dei sensori avviene attraverso il bridge che tramite la porta USB viene connesso ad un PC o similare per la gestione e la messa a disposizione dei dati su piattaforma fisica o su cloud. A tal proposito si è optato per l'utilizzo di una Raspberry Pi4, piattaforma UNIX-based dal prezzo contenuto e costo relativamente basso, che permette di effettuare tutte le operazioni necessarie senza l'ausilio di ulteriori PC.

Questa piattaforma permette tra l'altro di essere alimentata direttamente dal bus POE+, quindi con un solo cavo a bassa tensione si riesce sia ad alimentare tutto il sistema che a connettere via LAN la piattaforma. Anche in questo caso il sistema è stato alloggiato all'interno su una cassetta in polycarbonato dalla Hammond, serie 1555, modello 1555H2F42GY con LID flangiato (figura 5.2.16).



Figura 5.2.16 Foto del nodo smart, configurato come bridge, e della Raspberry Pi4 all'interno della scatola utilizzata per le installazioni dei dimostratori del progetto.



Figura 5.2.17 Foto di un sistema tipo utilizzato per le installazioni dei dimostratori del progetto in fase di test presso i laboratori STMicroelectronics.

Nella figura 5.2.17, invece, è mostrato un esempio di sistema completo composto da 3 NODI, con 2 sensori capacitivi ciascuno, e una centralina con Bridge + Raspberry connessi tra loro attraverso Bus-Can. La centralina viene alimentata e connessa ad internet attraverso il bus POE+ fornito rispettivamente da switch PoE+ e modem-router.

5.2.10 Nodo Smart - Applicazioni

Nell'ambito del progetto INSIST la scheda nodo smart, ed il relativo sistema di gestione dei dati acquisiti (basato su Raspberry Pi4), è stata impiegata nelle due applicazioni oggetto dell'OR6, ovvero il dimostratore del Viadotto Canalone a Salerno (UniNA) e quello dell'ex-ospedale di Agrigento (UniPA), che saranno descritti nella loro completezza nei deliverable dell'OR6.

6 Sviluppo del software applicativo e del FW sistema di acquisizione e raccolta dati dei sensori capacitivi STMicroelectronics

6.1 Descrizione attività

Il sistema di misura e trasduzione per sensori capacitivi presentato nei paragrafi seguenti è stato sviluppato allo scopo di condizionare sensori di pressione per poter poi effettuare misure di pressione in ambienti strutturati di laboratorio o per il monitoraggio dello stato di salute di strutture e costruzioni. Per i due scenari di utilizzo sono state sviluppate due versioni differenti del sistema di misura.

6.1.1 Architettura di sistema

Il sistema di misura e trasduzione per sensori capacitivi si presenta in due distinte modalità e versioni, ognuna delle quali è stata progettata ed implementata per uno scopo differente.

Queste due modalità vengono indicate nei paragrafi seguenti come:

- GUI based system
- Raspberry PI based system

Entrambi i sistemi hanno in comune la sotto rete CAN-BUS, costituita dalle board Nodo (a cui sono connessi i sensori di pressione capacitivi) e la board Bridge. Ogni board Nodo può trasdurre fino a quattro sensori di pressione capacitivi.

La board Bridge configurata come device USB, è in grado di gestire i comandi provenienti da un Host esterno (GUI o Raspberry PI) e convertirli in comandi che viaggiano sulla interfaccia CAN, comprensibili da ogni nodo della sotto rete. Il ruolo del Bridge è quello di raccogliere i dati che provengono dai Nodi e spedirli verso l'Host che li ha richiesti.

L'Host a questo punto si occuperà di processare i dati grezzi ricevuti dalla board Bridge per restituire una misura di capacità, visualizzata a video nel caso della GUI o spedita ad un server remoto nel caso di sistema con gateway RaspberryPI.

6.1.2 GUI based system

Nella prima versione sviluppata si utilizza una GUI per configurare, calibrare e prelevare le misure dai sensori connessi alle board di tipo Nodo la cui struttura verrà dettagliata nei paragrafi

seguenti. La sua finalità è quella di condurre delle prove in ambienti strutturati e laboratori e viene anche utilizzata per effettuare la calibrazione degli stessi sistemi di acquisizione. La sua architettura è presentata nello schema mostrato in figura 6.1.1, dove in arancio sono indicati i sensori di pressione capacitivi ognuno dei quali è connesso ad una board Nodo. Ogni board Nodo fa parte di una sotto rete CAN-BUS la quale è gestita dalla board Bridge, che come sopra specificato si comporta da device USB. Tale sistema è completamente controllato da una GUI che gira su un PC Windows.

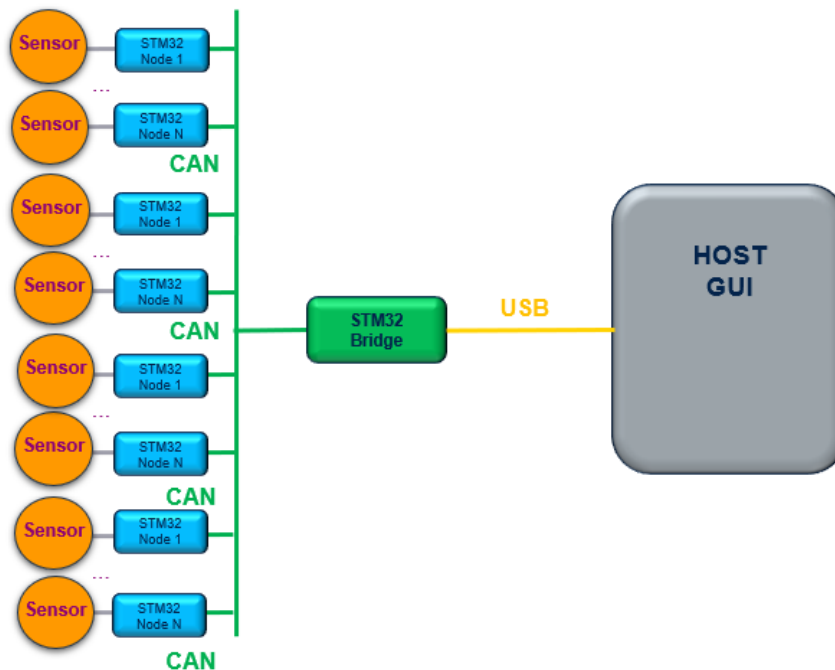


Figura 6.1.1 Schema dell'architettura del sistema GUI-based

6.1.3 Raspberry Pi based system

La seconda versione del sistema di acquisizione è invece finalizzata ad eseguire delle installazioni del sistema di misura al fine di monitorare lo stato di salute delle strutture coinvolte. Questa versione (figura 6.1.2) fa uso di una board Raspberry Pi e di una dashboard AWS dove vengono spediti i dati acquisiti e successivamente visionati tramite un qualsiasi browser.

In questo sistema di acquisizione è inoltre presente un ulteriore board Raspberry PI che si occupa di analizzare i dati dei sensori e rileva eventuali anomalie secondo degli algoritmi di Anomaly Detection (descritti nell'OR2).

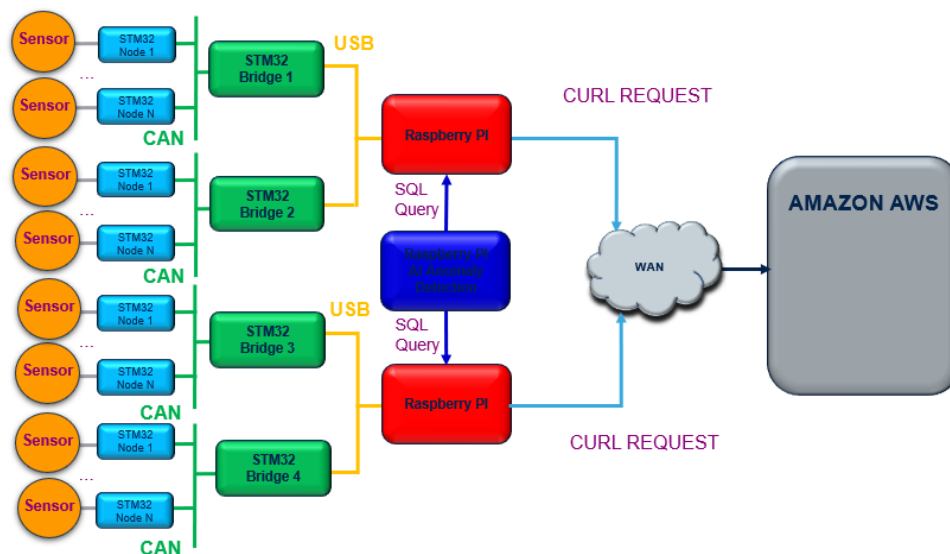


Figura 6.1.2 Schema dell'architettura del sistema Raspberry-based

6.1.4 Descrizione del nodo

La board Nodo è il componente in comune tra le due versioni del sistema di acquisizione. Essa si basa sul microcontrollore STMicroelectronics STM32L496RGT6, della serie low power (STM32L, figura 6.1.3).

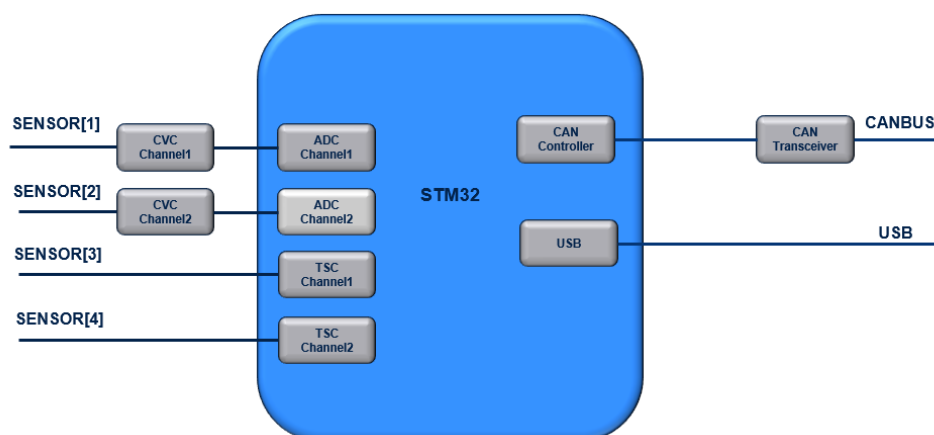


Figura 6.1.3 Schema dell'architettura di utilizzo delle periferiche del microcontrollore STM32L per il monitoraggio dei sensori capacitivi.

Ogni board ha la possibilità di acquisire e trasdurre fino a 4 sensori capacitivi, due di questi trasdotti tramite il touch sensing controller (TSC) del micro e gli altri due tramite trasduttore CVC.

Ogni board Nodo può essere utilizzata in modalità Bridge o modalità nodo; la sua modalità operativa dipenderà dalla presenza di un host USB rilevato in fase di boot. Se viene infatti rilevato un host USB al boot la board si comporterà da Bridge gestendo eventuali richieste provenienti dall'host, altrimenti la sua modalità operativa sarà quella di nodo in cui risponderà soltanto a comandi provenienti dall'interfaccia CAN.

6.2 Risultati attività

6.2.1 Architettura FW

Il firmware della board Nodo è stato interamente scritto in linguaggio C facendo uso del sistema operativo real time FreeRTOS. Nella figura 6.2.1 viene riportato il diagramma delle classi del FW.

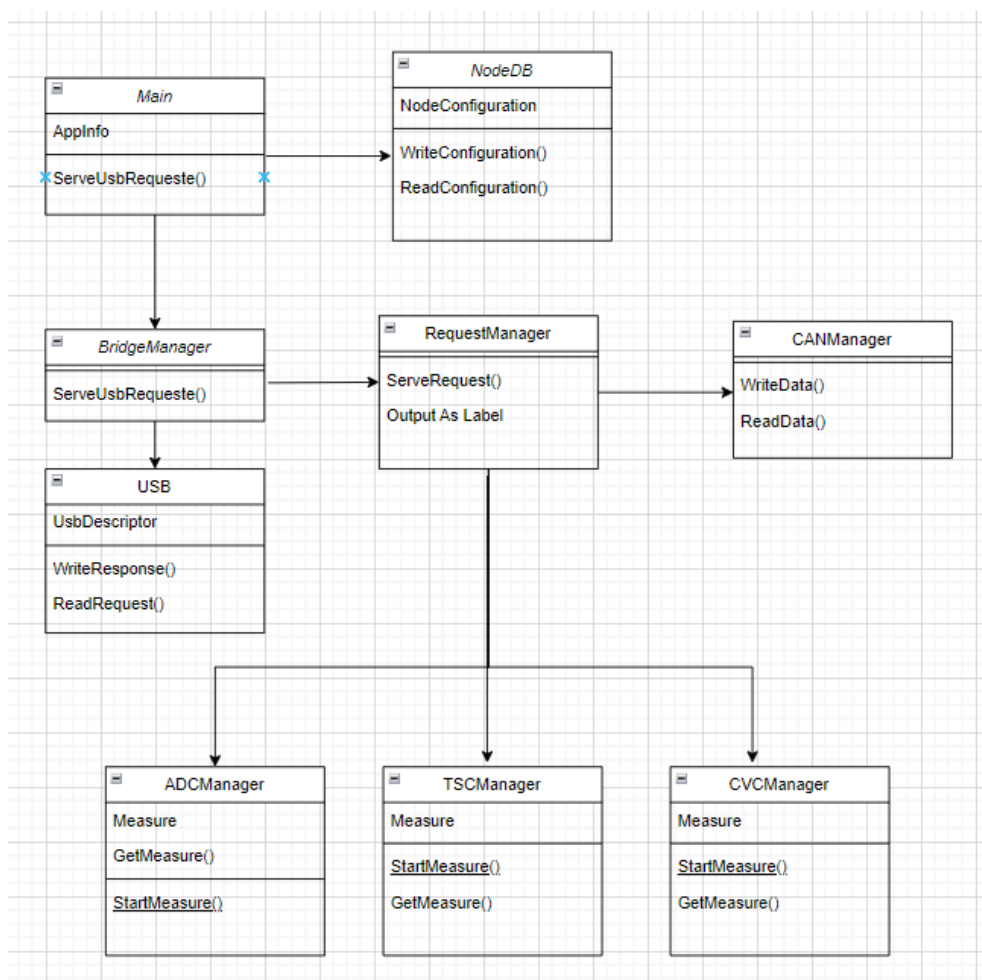


Figura 6.2.1 Diagramma delle classi sviluppato per il firmware del nodo.

Ogni Bridge/Nodo in fase di boot effettua il detect di un host USB e, nel caso in cui ne viene rilevato uno, il firmware determinerà un comportamento da Nodo-Bridge altrimenti si comporterà come Nodo. Nelle successive fasi di Boot vengono precaricati dalla Flash i valori di configurazione dei due trasduttori (CVC e TSC) e l'indirizzo della sotto rete CAN necessario per la comunicazione tra Bridge e Nodo. Terminata la procedura di inizializzazione verranno avviati i thread relativi alla gestione delle richieste da parte delle due interfacce di comunicazione CAN e USB oltre a tutti i thread relativi alla gestione delle procedure di acquisizione dei sensori e di diagnostica.

Per quanto riguarda invece l'organizzazione del firmware in flash, questo è stato strutturato organizzando in maniera logica la flash in due parti distinte (figura 6.2.2). Nel primo banco viene inserito il **factory firmware** nel secondo l'**updatable firmware**, di cui si può eseguire un aggiornamento su richiesta.

Flash Bank	Content	Page Size	Page Number
Bank1	Firmware Code Factory	2K	Page 0
	Firmware Code Factory	2K	...
	FW Configuration Data	2K	Page 255
Bank2	Firmware Code Updated	2K	Page 0
	Firmware Code Updated	2K	...
	FW configuration data	2K	Page 255

Figura 6.2.2 Organizzazione della flash memory del micro STM32 in cui è contenuto il firmware del nodo.

6.2.2 Protocollo CAN

La comunicazione tra il nodo-bridge ed i nodi della sua sottorete avviene tramite interfaccia CAN. Ogni board presenta un indirizzo univoco (utilizzato nell'indirizzamento della sottorete CAN) assegnato dopo aver programmato la memoria Flash con il Firmware. Il Firmware supporta fino a 16 diversi indirizzi e quindi possono coesistere sulla stessa sotto rete CAN fino a 16 differenti board. Per estendere il limitato MTU del CAN è stato implementato un protocollo opportuno che permettesse di frammentare e poi ricostruire i dati originali di dimensioni più grandi dell'MTU del CAN. Questo protocollo di tipo Master-Slave viene completamente controllato dal Bridge della rete CAN-BUS.

6.2.3 Trasduzione della capacità del sensore mediante CVC

Il sistema di trasduzione CVC (Capacitive to Voltage Converter) è un circuito a capacitori commutati per permette di convertire il valore di una capacità incognita in una tensione che viene poi acquisita

e digitalizzata tramite un ADC interno al microcontrollore STM32. Questo trasduttore consente di misurare capacità nel range 50 – 1000 pF. Uno schema circuitale di principio è mostrato in figura 6.2.3.

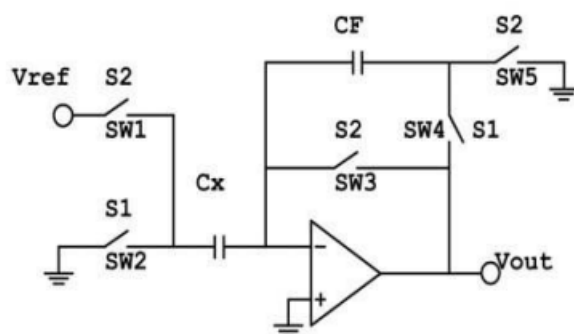


Figura 6.2.3 Schema di principio del circuito di trasduzione capacità-tensione CVC.

La relazione che lega la capacità sensore alla tensione di uscita è la seguente:

$$V_{out} = \frac{C_x}{C_F} V_{ref}$$

Per controllare il circuito di trasduzione nel Firmware del micro sono state utilizzate le periferiche Timer PWM, per generare i segnali di controllo degli switch, e l'ADC, per digitalizzare la tensione di uscita dell'amplificatore operazionale direttamente proporzionale al valore della capacità del sensore. Nella figura 6.2.4 è mostrato lo schema dell'architettura di controllo del circuito CVC.

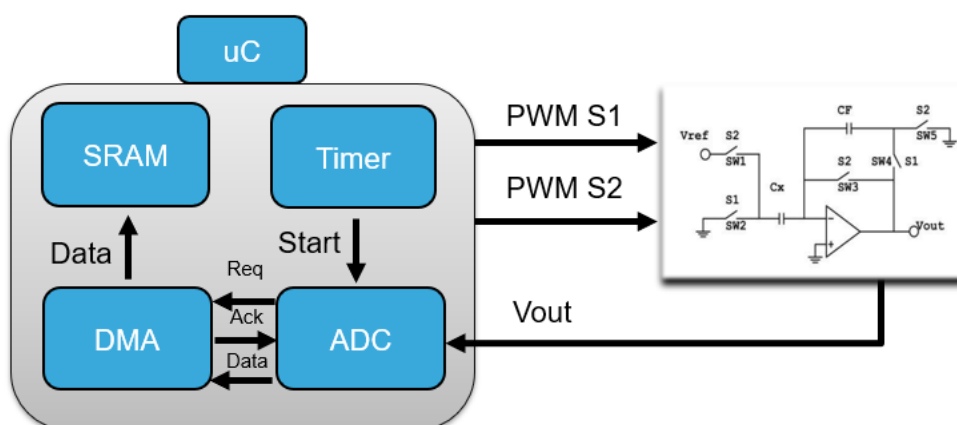


Figura 6.2.4 Schema dell'architettura di controllo del circuito CVC, basata sul micro STM32.

6.2.4 Trasduzione della capacità del sensore mediante TSC

Il sistema di trasduzione basato sulla periferica TSC (Touch Sensing Controller) utilizza il principio del trasferimento di carica tra la capacità sensore incognita ed una capacità di Sample. La figura 6.2.5 mostrata le 4 porte di ingresso, lo schema di principio e le relazioni fondamentali dell'interfaccia TSC del micro STM32.

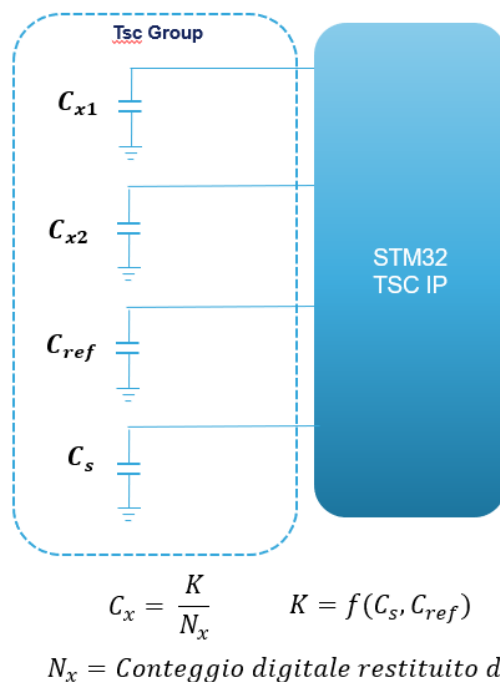


Figura 6.2.5 Schema di principio, relazioni fondamentali e porte dell'interfaccia TSC.

L'allocazione della quattro porte di ingresso è la seguente:

- Porta 1: Capacità sensore #1
- Porta 2: Capacità sensore #2
- Porta 3: Capacità di riferimento nota (di tipo NP0)
- Porta 4: Capacità di sample.

Al fine di migliorare le prestazioni di questo sistema di misura sono stati attuati due accorgimenti:

- 1) È stato impegnato uno dei suoi ingressi con una capacità di riferimento.
- 2) Viene eseguita una procedura di calibrazione utilizzando due capacità di valore noto.

Grazie a questi due accorgimenti si può stimare il valore K, che permette di conoscere la capacità del sensore, a partire dal conteggio digitale restituito dalla periferica TSC.

6.2.5 Comparazione TSC-CVC

I due metodi di trasduzione (TSC e CVC) presentano differenti caratteristiche e prestazioni; nella tabella mostrata in figura 6.2.6 viene riportata una comparazione tra i due trasduttori.

	TSC	CVC
Velocità di misura	~5Hz	1KHz
Risoluzione	Decrescente con il valore della capacità da misurare	0.1pF
Range di Misura	1 pF – 100 nF	50 pF-1000 pF

Figura 6.2.6 Schema di principio, relazioni fondamentali e porte dell'interfaccia TSC.

Considerando le differenti prestazioni in velocità di misura dei due sistemi di trasduzione è stato scelto di utilizzare il TSC per condizionare sensori che misurano pressioni la cui dinamica nel tempo si pensa essere molto lenta ed il CVC per condizionare sensori che devono monitorare pressioni con dinamiche più veloci.

6.2.6 Il software per l'acquisizione/gestione dei dati (GUI)

Al fine di eseguire delle prove in ambienti di laboratorio e poter effettuare l'analisi e la configurazione del sistema di acquisizione, e l'acquisizione dei dati, è stata sviluppata una GUI in ambiente Visual Studio tramite l'utilizzo del framework .NET. La GUI (figura 6.2.7) consente di connettersi ad una board Bridge per effettuarne la configurazione ed eseguire le misure di capacità.



Figura 6.2.7 Interfaccia grafica (GUI) per l'analisi, la configurazione del sistema di acquisizione e l'acquisizione dei dati.

È possibile selezionare tre distinte modalità di acquisizione:

- Acquisizione singola.
- Acquisizione continua.
- Acquisizione Time Limited (specificando la durata della stessa).

La visualizzazione dei dati avviene in modalità tabellare (figura 6.2.8).

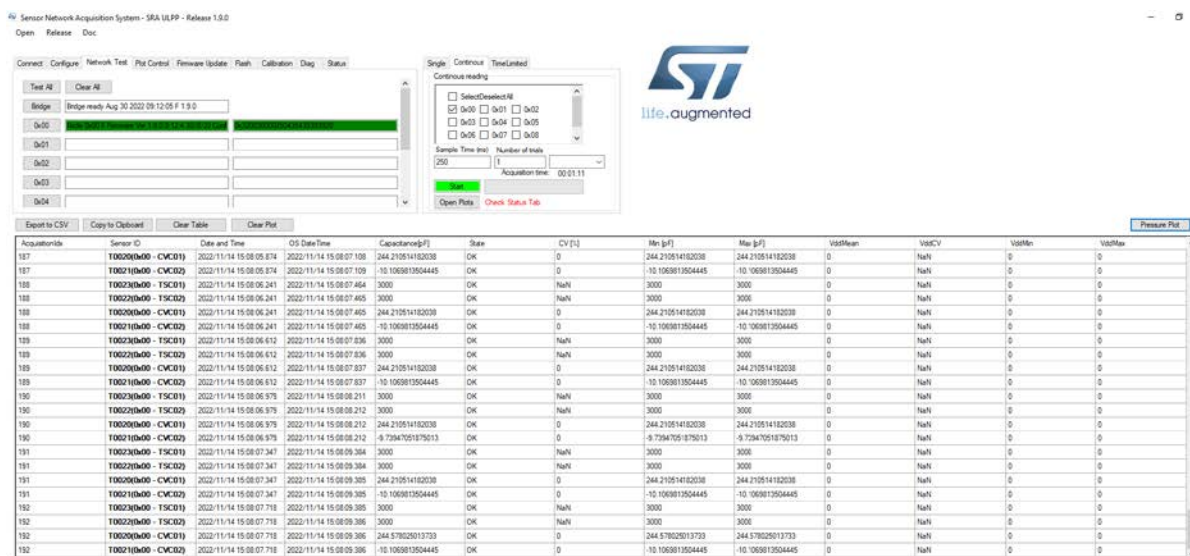


Figura 6.2.8 Interfaccia grafica (GUI): acquisizione dati in forma tabellare.

Oppure è possibile visionare l'andamento grafico in tempo reale (real time plot, figura 6.2.9).



Figura 6.2.9 Interfaccia grafica (GUI): real-time plot dei dati acquisiti.

Sono inoltre presenti diversi servizi che consentono di configurare i due sistemi di trasduzione (CVC e TSC) e di inviare e memorizzare queste configurazioni di acquisizioni nella flash delle rispettive Board Nodo. La GUI consente inoltre di aggiornare il Firmware delle schede Nodo, di verificarne il corretto aggiornamento controllando la checksum del firmware stesso.

6.2.7 Il gateway RaspberryPi

Nel caso di installazione di sistemi di monitoraggio per strutture è stata implementata una soluzione che fa utilizzo di un gateway basato su piattaforma RaspberryPI. Il software applicativo su RaspberryPI è stato sviluppato interamente in C++. Esso ha il ruolo di acquisire dalle board Bridge/Nodo i dati grezzi dei sensori capacitivi, processarli per ottenere la misura di capacità del sensore, immagazzinarli localmente in un database SQL ed inviarli ad una dashboard AWS. Tale software applicativo viene configurato con opportuni file in formato JSON.

6.2.8 Architettura del software per il gateway RaspberryPi

La figura 6.2.10 mostra un sequence diagram relativo al funzionamento del software applicativo sul gateway RaspberryPI.

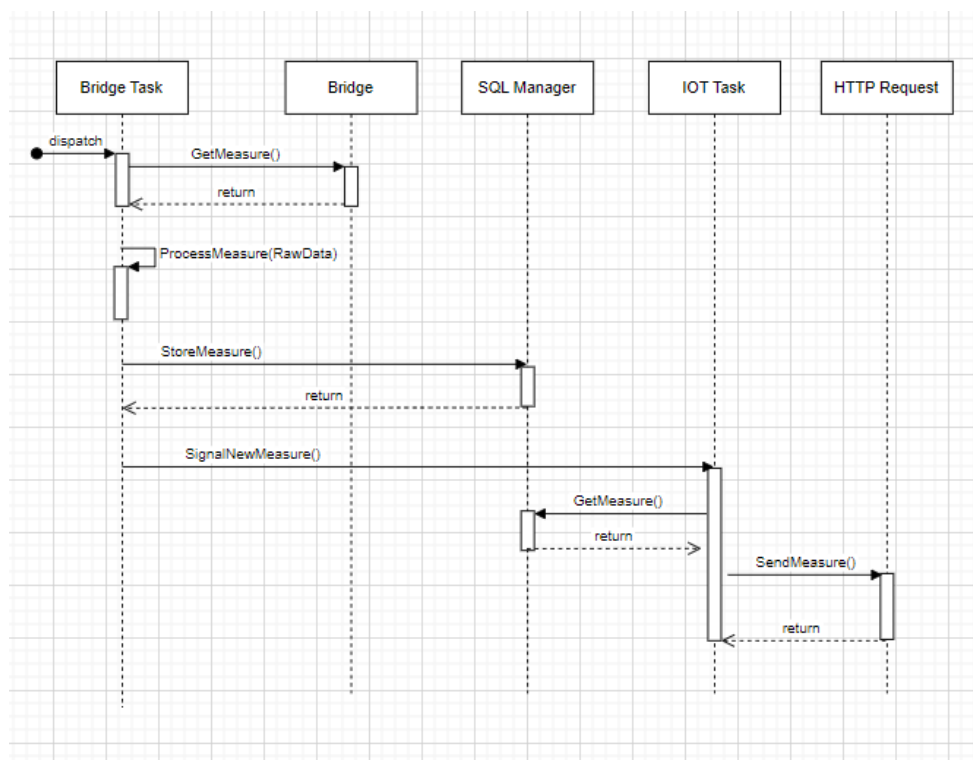


Figura 6.2.10 Sequence diagram del software applicativo per il gateway RaspberryPI.

Il primo step del software è quello di effettuare il parsing dei file .json quali:

- Valori di configurazione del sistema (Sample Time, Abilitazione Watchdog, etc.)
- Valori di calibrazione dei sistemi di trasduzione.
- Settings relativi agli URL dei server remoti dove inviare i dati.

Successivamente vengono avviati dei thread di acquisizione per ottenere le misure dai relativi bridge connessi alle RaspberryPi che raccolgono i dati di tutti i nodi della sottorete CAN-BUS. Ogni misura grezza viene poi elaborata per ottenere il valore di capacità e successivamente immagazzinata in un database SQL.

I thread di invio alla dashboard AWS (figura 6.2.11) si occuperanno di prelevare le misure del database SQL ed inviarle tramite “http Request” alla dashboard remota.

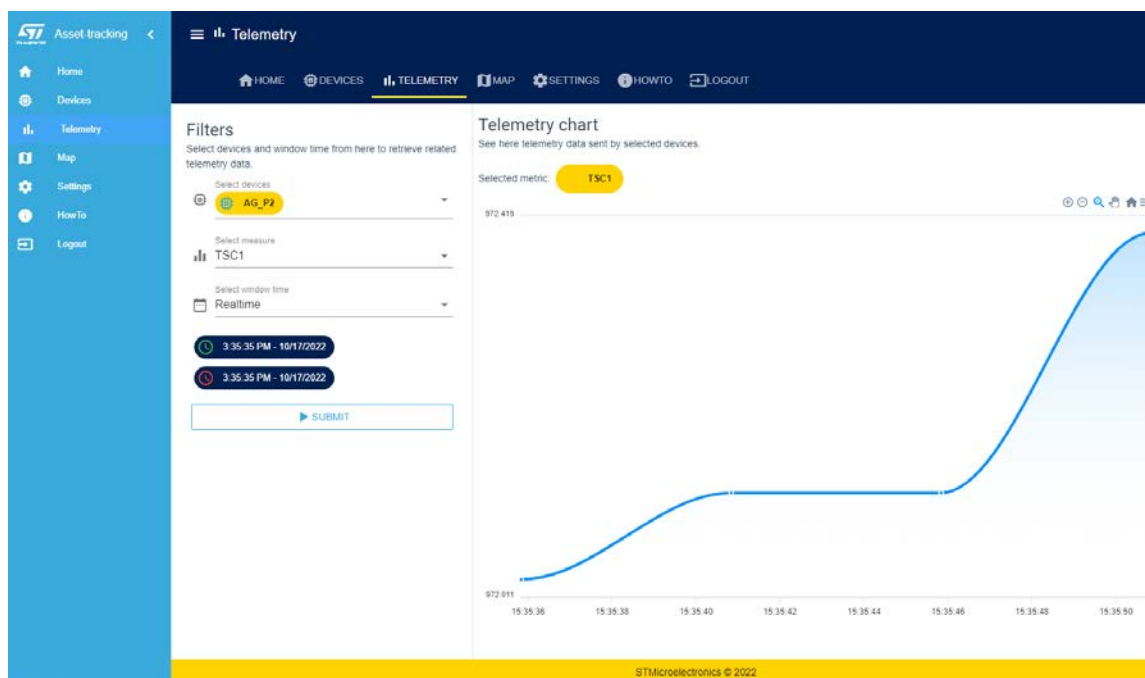


Figura 6.2.11 Dashboard AWS del sistema basato su gateway RaspberryPi.

7 Studio della pre e post-installazione della sensoristica STMicroelectronics

7.1 Descrizione attività

All'interno del progetto INSIST, Mapei si è occupata di numerose attività di ricerca che hanno riguardato in maniera particolare lo studio dei sistemi di pre-installazione e post-installazione di sensori capacitivi in elementi in calcestruzzo armato e in elementi in muratura. La realizzazione di un idoneo sistema di pre e post-installazione è risultata estremamente complessa a causa delle numerose variabili in gioco in grado di inficiare il corretto rilevamento dei dati da parte della sensoristica. In particolar modo la problematica principale affrontata riguarda il corretto posizionamento dei sensori, i quali devono essere installati in modo tale che la faccia di lettura degli stessi sia perfettamente perpendicolare ai carichi applicati. Risulta quindi necessario evitare qualsiasi minima rotazione del sensore dopo la sua posa in opera. La seconda problematica da affrontare riguardava, invece, la corretta individuazione di prodotti per l'intasamento dei fori di alloggiamento dei sensori, qualora questi siano ovviamente post-installati. Le malte di riempimento devono presentare delle caratteristiche analoghe a quelle dei supporti su cui vengono applicate. In particolare, ci si riferisce alle prestazioni meccaniche (principalmente resistenza a compressione) e al modulo elastico. Il rispetto di queste prescrizioni è fondamentale per la corretta riuscita dell'intervento di monitoraggio. L'impiego di una malta o più in generale di un prodotto che abbia delle caratteristiche meccaniche simili a quelle del supporto, ci permette di ottenere delle deformazioni discretamente omogenee nei diversi punti della struttura da monitorare e soprattutto evita la creazione di aree, intorno al sensore, incompatibili con il resto del supporto di riferimento e la creazione dei medesimi stati tensionali.

L'individuazione di un idoneo sistema di pre-installazione e post-installazione è stato possibile solo a valle di numerosissime prove di laboratorio interne eseguite. Durante il corso del Progetto INSIST sono state messe a punto diverse soluzioni che sono state via via ottimizzate, fino al raggiungimento della configurazione di posa finale impiegata nei dimostratori oggetto di studio nell'OR6 del progetto.

7.2 Risultati attività

7.2.1 Post-Installazione sensoristica ST per il monitoraggio strutturale

Durante il corso del Progetto INSIST, si è cercato di studiare un sistema di post-installazione che fosse utilizzabile sia nel caso in cui la post-installazione fosse eseguita in elementi in calcestruzzo sia

nel caso fosse realizzata in elementi in muratura. In prima battuta è stato studiato un sistema di post-installazione articolato come segue.

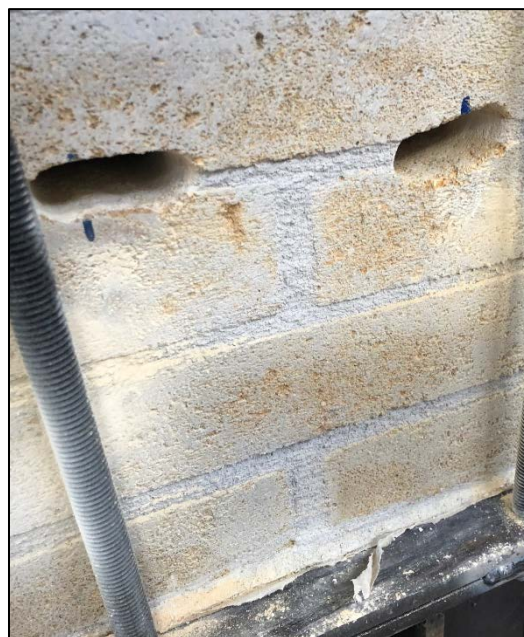


Figura 7.2.1 Primo sistema di post-installazione sensoristica STMicroelectronics: realizzazione dei fori.

- 1) Realizzazione dei fori di alloggiamento dei sensori (figura 7.2.1) mediante l'ausilio di un trapano e successiva rimozione della polvere creata durante l'esecuzione dei fori mediante l'impiego di aria compressa.
- 2) Posizionamento della sensoristica all'interno dei fori eseguiti in precedenza (figura 7.2.2).



Figura 7.2.2 Primo sistema di post-installazione sensoristica STMicroelectronics: posizionamento della sensoristica.

- 3) Iniezione di boiaccia cementizia (figura 7.2.3) costituita da legante idraulico espansivo o di boiaccia a base di Legante idraulico fillerizzato, resistente ai sali, a base di calce ed ECO-POZZOLANA. Nei paragrafi successivi verrà dettagliata in maniera approfondita la scelta e l'individuazione dell'idoneo materiale da impiegare.



Figura 7.2.3 Primo sistema di post-installazione sensoristica STMicroelectronics: iniezione della boiaccia cementizia.

L'impiego di questo primo approccio, tuttavia, ha presentato alcune difettosità che è stato necessario considerare. La problematica principale riguardava il posizionamento del sensore. Con questa tipologia di sistema non era possibile evitare movimenti o rotazioni del sensore dopo l'iniezione della boiaccia. Per tale ragione a valle di queste prove è stato ottimizzato il sistema di post-installazione della sensoristica come segue.

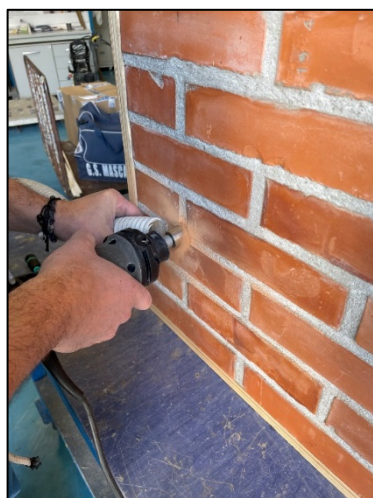


Figura 7.2.4 Secondo sistema di post-installazione sensoristica STMicroelectronics: carotaggio.

- 1) Esecuzione dei fori di alloggiamento della sensoristica mediante carotaggio (figura 7.2.4) con l'impiego di corona diamantata di diametro compreso tra 4 e 6 cm e successiva aspirazione con aria compressa della polvere generata dalle precedenti operazioni.

Si precisa che il processo di aspirazione della polvere è fondamentale per la corretta riuscita dell'intervento poiché la polvere va ad inficiare sull'adesione della boiaccia cementizia alle pareti del foro eseguito.

- 2) Posizionamento e incollaggio del sensore su un supporto in plastica (figura 7.2.5).



Figura 7.2.5 Secondo sistema di post-installazione sensoristica STMicroelectronics: posizionamento e incollaggio del sensore.

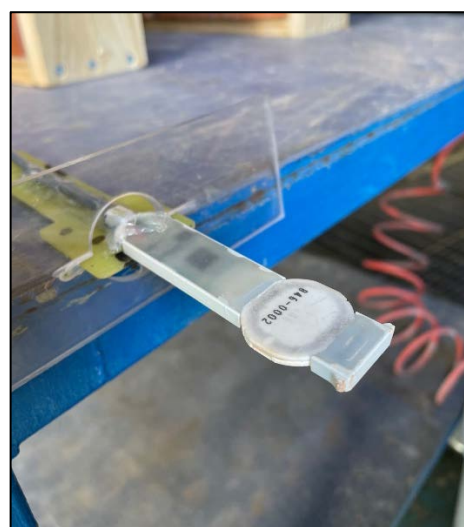
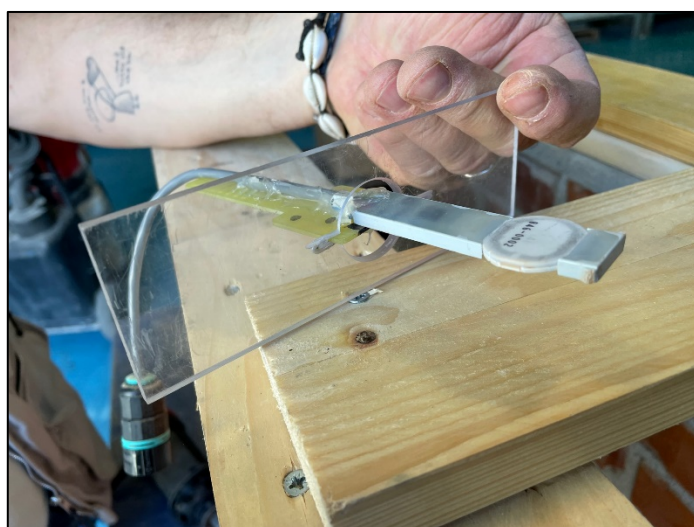
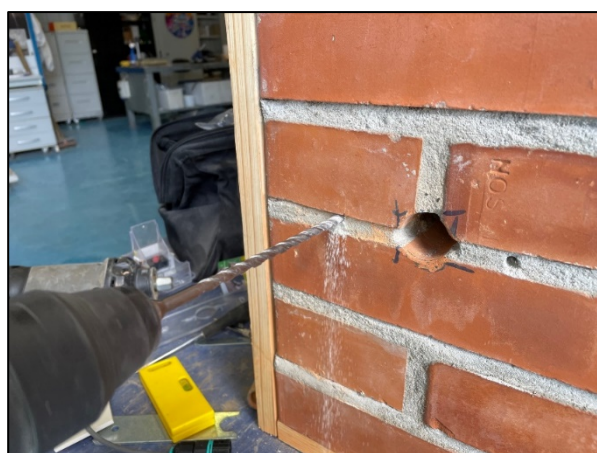


Figura 7.2.6 Secondo sistema di post-installazione sensoristica STMicroelectronics: mascherina in plaxiglass.

- 3) Realizzazione di una mascherina in plexiglass (figura 7.2.6), dotata di un foro centrale di dimensione idonea per permettere il passaggio del sensore e del suo cavo di alimentazione. La piastra era inoltre dotata di due piccole asole, collocate ai lati del foro, che permettessero la realizzazione di un incastro perfetto con il supporto in plastica su cui era vincolato il sensore. Questa tipologia di sistema è stata appositamente studiata per far sì che il sensore si trovasse in posizione perfettamente orizzontale evitando così eventuali movimenti o rotazioni durante la posa in opera della boiaccia.



(a)



(b)

Figura 7.2.7 Secondo sistema di post-installazione sensoristica STMicroelectronics: fissaggio mascherina e alloggiamento del sensore.

- 4) Esecuzione di 2 fori, mediante l'ausilio di un trapano, ai lati del carotaggio precedentemente eseguito. La realizzazione di questi fori era necessaria per il fissaggio della mascherina in plexiglass sul supporto (figura 7.2.7-a).
- 5) Fissaggio del sistema sul supporto mediante l'impiego di viti e tasselli di idonea dimensione in funzione della dimensione dei fori eseguiti nello step precedente e conseguente alloggiamento del sensore (figura 7.2.7-b) nella cavità realizzata durante la fase 1.
- 6) Posizionamento di due tubicini, uno inferiore e uno superiore, all'interno della cavità necessari per l'iniezione della boiaccia all'interno del foro di alloggiamento del sensore (figura 7.2.8). L'impiego dei due tubicini è fondamentale in quanto l'iniezione della boiaccia viene eseguita utilizzando il tubicino posto più in basso. Il tubicino collocato superiormente funge da tubo di sfiato. Questo serve per evitare che venga inglobata aria all'interno della cavità durante la posa in opera della boiaccia. L'iniezione termina nel momento in cui la boiaccia

inizia a fuoriuscire dal tubicino posto superiormente. Questa modalità di iniezione è utilizzata frequentemente per il consolidamento di strutture in calcestruzzo ed in muratura. Si aggiunge a quanto detto, che l'uso di una mascherina di chiusura in plexiglass trasparente permette di valutare visivamente il corretto riempimento della cavità di alloggiamento del sensore.



Figura 7.2.8 Secondo sistema di post-installazione sensoristica STMicroelectronics: posizionamento tubicini per l'iniezione della boiaccia.

Tale sistema di applicazione della sensoristica si è rivelato estremamente efficace ma comunque ottimizzabile. Il sistema era stato pensato sia per l'applicazione di sensori di pressione ceramici sia per l'applicazione dei sensori capacitivi, da poter impiegare in elementi in calcestruzzo ed in muratura.



Figura 7.2.9 Terzo sistema di post-installazione sensoristica STMicroelectronics: carotaggio.

Al fine di ottimizzare i costi di produzione del supporto dei sensori e rendere l'applicazione più snella ed efficace, è stato elaborato un terzo ed ultimo sistema di post-installazione della sensoristica descritto come segue.

- 1) Realizzazione di un foro mediante l'impiego di carotatrice con diametro esterno della sonda di 62 mm. I fori da eseguire possono avere profondità variabile in funzione del numero di sensori da installare nella medesima sezione (figura 7.2.9).
- 2) Fissaggio della sensoristica su supporto metallico (figura 7.2.10). Il supporto metallico in questione è rappresentato da una porzione di maglia di armatura su cui sono fissati i sensori capacitivi, come mostrato in figura. Il sistema barra-sensore viene poi posizionato all'interno del foro. Il sistema è stato pensato sia per il posizionamento di coppie di sensori sia per il posizionamento di sensori singoli.



Figura 7.2.10 Terzo sistema di post-installazione sensoristica STMicroelectronics: fissaggio sensori su supporto metallico.

Le porzioni laterali delle barre di armatura possono essere realizzate in modo tale da avere una lunghezza pari al diametro del foro realizzato in precedenza. Ciò permette al sistema barra-sensore di essere collocato in battuta all'interno del foro evitando qualsiasi tipo di movimento, garantendo inoltre la perfetta orizzontalità del sistema. La barra filettata su cui è poggiata la sensoristica fuoriesce quindi dal foro precedentemente effettuato e va ad innestarsi all'interno di una piastra di chiusura rettangolare in plexiglass di dimensione idonea per la chiusura del foro.

- 3) Predisposizione della piastra in plexiglass di chiusura del foro e sua sigillatura. La piastra è dotata di 2 fori, uno superiore e uno inferiore, nei quali vengono posizionati dei tubicini di iniezione che serviranno per la posa in opera della malta all'interno della cavità ed è dotata, inoltre, di un'asola laterale dove si innesta la barra filettata. La piastra viene fissata al supporto mediante l'impiego di due viti e due tasselli (figura 7.2.11ss). Prima di posizionare la piastra

è necessario sigillare tutta la superficie esterna mediante l'utilizzo di un adesivo ad alto modulo elastico, monocomponente, tissotropico, a base di polimeri sililati.

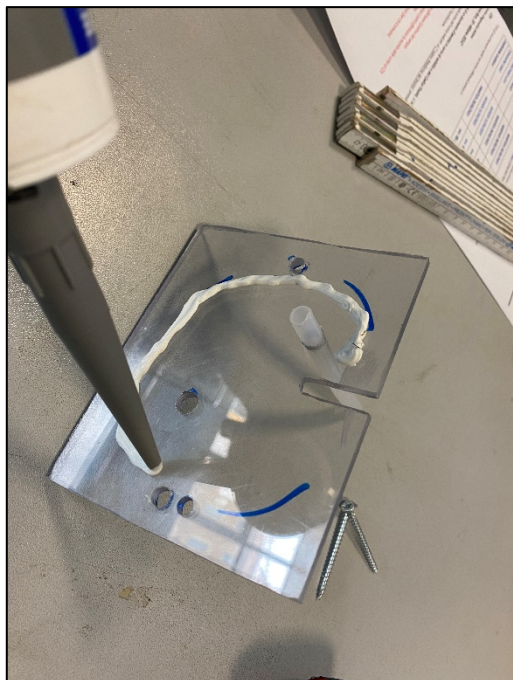


Figura 7.2.11 Terzo sistema di post-installazione sensoristica STMicroelectronics: fissaggio sensori su supporto metallico.



Figura 7.2.12 Terzo sistema di post-installazione sensoristica STMicroelectronics: posizionamento tubicini per iniezione della boiacca e riempimento del foro.

- 4) Posizionamento dei tubicini di iniezione e sigillatura del foro con boiaccia cementizia (figura 7.2.12) costituita da legante idraulico espansivo o di boiaccia a base di Legante idraulico fillerizzato, resistente ai sali, a base di calce ed ECO-POZZOLANA in funzione del tipo di supporto di riferimento. L'iniezione può essere eseguita mediante l'impiego di un'idonea pompa peristaltica che abbia dimensioni ridotte considerando l'esigua quantità di materiale da iniettare per ciascun foro. Dopo aver miscelato il materiale, si procede con l'iniezione partendo dal tubicino posto più in basso. Il materiale viene iniettato in continuo all'interno della cavità ed è necessario proseguire con il pompaggio fino a quando il prodotto non fuoriesce dal tubicino posto più in alto. È necessario comunque verificare che l'intera sezione del foro risulti completamente intasata dalla malta sopracitata.

Questo sistema di post-installazione è risultato estremamente efficace ed è stato conseguentemente utilizzato per l'applicazione della sensoristica per il monitoraggio dei dimostratori di Salerno ed Agrigento.

7.2.2 Pre-Installazione sensoristica ST per il monitoraggio strutturale

Nel corso del progetto INSIST, sono state numerose le prove eseguite per la determinazione di un idoneo sistema di pre-installazione della sensoristica ST. In questo caso, a differenza del sistema di post-installazione, non si è deciso di standardizzare il metodo di pre-installazione, ma si è scelto di operare diversamente in funzione del fatto che le operazioni di pre-installazione siano eseguite in un elemento in un muratura o in un elemento in calcestruzzo.

Per quanto riguarda le opere in calcestruzzo armato, le operazioni di preinstallazione possono essere così sintetizzate.

- 1) posizionamento e saldatura di un supporto metallico cavo in grado di accogliere il sensore capacitivo al suo interno (figura 7.2.13). Il supporto metallico viene saldato direttamente sulle barre di armatura presenti prima dell'esecuzione del getto in calcestruzzo. L'utilizzo di tale supporto permette il posizionamento del sensore nella direzione richiesta e prestabilita in fase progettuale e comunque nel modo in cui si ritiene più opportuno in modo tale che riesca a rilevare gli sforzi e le tensioni in gioco.
- 2) Sigillatura del cavo del sensore all'interno del supporto mediante l'impiego di resina epossidica tissotropica bicomponente (figura 7.2.14).

Tale operazione evita eventuali spostamenti o rotazioni del sensore durante la fase di getto.

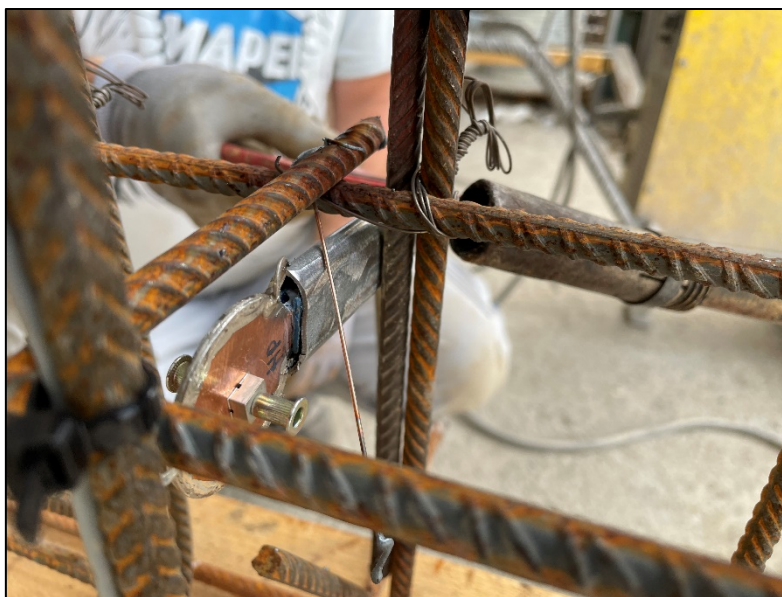


Figura 7.2.13 Sistema di pre-installazione sensoristica STMicroelectronics in elementi di calcestruzzo: posizionamento sensori e loro ancoraggio fra le barre di armatura.



Figura 7.2.14 Sistema di pre-installazione sensoristica STMicroelectronics in elementi di calcestruzzo: sigillatura del cavo dei sensori.

- 3) Realizzazione di una canalina in materiale plastico all'interno del quale vengono convogliati i cavi di alimentazione dei sensori, i quali fuoriescono dal calcestruzzo dopo il getto (figura 7.2.15).



Figura 7.2.15 Sistema di pre-installazione sensoristica STMicroelectronics in elementi di calcestruzzo: realizzazione canaletta protezione cavo sensori all'esterno dell'armatura.

Risulta infine necessario coprire con del nastro isolante la parte terminale dei cavi di alimentazione del sensore al fine di evitare eventuali danneggiamenti durante la fase di esecuzione del getto in calcestruzzo.



Figura 7.2.16 Sistema di pre-installazione sensoristica STMicroelectronics in strutture in muratura: realizzazione canaletta protezione cavo sensori all'esterno dell'armatura.

Per quanto riguarda le strutture in muratura, invece, il posizionamento della sensoristica risulta essere estremamente più rapido. La sensoristica in questo caso viene annegata direttamente all'interno dei

giunti di malta di allettamento realizzati durante le fasi di realizzazione della muratura così come indicato nella figura 7.2.16.

7.2.3 Ricerca e sviluppo di prodotti chimici per la posa in opera della sensoristica: Studio e individuazione dei materiali per l'applicazione della sensoristica

Il processo di individuazione dei materiali da impiegare per l'intasamento dei fori di alloggiamento della sensoristica si è rivelato complesso e articolato. La necessità principale, emersa già nelle prime fasi del progetto INSIST, era quella di individuare dei prodotti che risultassero compatibili con i supporti esistenti, in calcestruzzo e in muratura, su cui vengono post-installati i sensori. Tale problematica riguarda esclusivamente le attività di post-installazione dei sensori.

Caratteristiche prestazionali	Metodo di prova	Requisiti in accordo alla EN 1504-6	Prestazione prodotto
Fluidità al cono (secondi): – dopo miscelazione: – dopo 30 minuti:	EN 445	non richiesto	13 20
Massa volumica dell'impasto (kg/m ³):	EN 1015-6	non richiesto	2040
Acqua essudata (bleeding):	UNI 8998	non richiesto	assente
Tempo di presa (ore): – inizio presa: – fine presa:	EN 196-3	non richiesto	> 4 < 8
Resistenza a compressione (MPa):	EN 12190	> dell'80% del valore dichiarato dal produttore	30 (dopo 1 g) 60 (dopo 7 gg) 75 (dopo 28 gg)
Resistenza a flessione (MPa):	EN 196-1	non richiesto	4 (dopo 1 g) 7 (dopo 7 gg) 8 (dopo 28 gg)
Adesione su calcestruzzo (supporto di tipo MC 0,40 – rapporto a/c = 0,40) secondo EN 1766 (MPa):	EN 1542	non richiesto	> 2,5 (rottura supporto)
Espansione in fase plastica (%):	UNI 8996-89	non richiesto	≥ 0,3
Espansione contrastata dopo 24 h (µm/m):	UNI 8147 metodo A	non richiesto	> 300
Resistenza allo sfilamento delle barre d'acciaio - spostamento relativo ad un carico di 75kN (mm):	EN 1881	≤ 0,6	< 0,6
Resistenza allo sfilamento delle barre d'acciaio (MPa):	RILEM-CEB- FIP RC6-78	non richiesto	16
Reazione al fuoco:	EN 13501-1	Euroclasse	A1

Figura 7.2.17 Studio e individuazione dei materiali per l'applicazione della sensoristica: caratteristiche meccaniche della boiaccia cementizia.

Considerando che il calcestruzzo e la muratura hanno delle proprietà meccaniche completamente differenti, è stato necessario valutare l'impiego di materiali differenti per l'intasamento dei fori di

alloggiamento della sensoristica in funzione del fatto che si trattasse di supporti in calcestruzzo o di supporti in muratura.

Per quanto riguarda le operazioni di post-installazione dei sensori ceramici e capacitivi nei supporti in calcestruzzo, a valle delle numerose prove eseguite, è stato validato l'impiego di una boiacca cementizia costituita da un legante cementizio espansivo superfluido. Tale legante cementizio, contiene al suo interno degli agenti espansivi che permettono di ottenere delle boiacche prive di bleeding e di ritiro. L'assenza di ritiro, in interventi di questo tipo, risulta fondamentale poiché garantisce il completo riempimento della sezione in cui viene post-installato il sensore. La boiacca in questione viene preparata miscelando il legante con il 32% di acqua e possiede una resa di circa 1,5 kg/dm³ di cavità da riempire. In figura 7.2.17 sono riportate le caratteristiche meccaniche della boiacca cementizia.

Per quanto riguarda invece le operazioni di post-installazione in elementi in muratura, a valle delle prove eseguite, è stato validato l'impiego di una boiacca costituita da un legante idraulico fillerizzato, resistente ai sali. Tale legante è a base di calce ed Eco-Pozzolana ed è quindi esente da cemento. La totale assenza di cemento permette a tale prodotto di poter essere applicato anche per interventi di post-installazione da eseguire su strutture in muratura di pregio storico e quindi vincolate dalle sovrintendenze, le quali non permettono l'applicazione di materiali a base cementizia. La boiacca realizzata con questa tipologia di legante risulta volumetricamente stabile e una volta indurita, possiede caratteristiche meccaniche molto simili, in termini di resistenza meccanica, modulo elastico, porosità, a quelle delle malte a base calce, calce-pozzolana o calce idraulica, impiegate originariamente nella costruzione degli edifici. La boiacca possiede inoltre delle proprietà che la rendono resistente alle diverse aggressioni chimico-fisiche come, ad esempio, alla presenza di Sali solubili, cicli di gelo-disgelo e reazioni alcali-aggregato. La boiacca viene preparata miscelando il legante con il 30% di acqua e possiede una resa di 1,5 kg/dm³ di cavità da riempire. Di seguito si riportano le caratteristiche meccaniche della boiacca.

Caratteristica prestazionale	Metodo di prova	Prestazione prodotto
Resistenza a compressione a 28 gg (N/mm ²):	EN 196-1	15
Reazione al fuoco:	EN 13501-1	Classe A1
Resistenza ai solfati:	Saggio di Anstett	elevata
Efflorescenze saline (dopo semi-immersione in acqua):	/	assenti

Figura 7.2.18 Studio e individuazione dei materiali per l'applicazione della sensoristica: caratteristiche meccaniche della boiacca per strutture in muratura.

8 Caratterizzazione accelerometri MEMS - ATTIVITÀ A.1.2

8.1 Descrizione attività

La conoscenza dello stato di sollecitazione di una struttura costituisce uno dei problemi più interessanti nel campo dell'ingegneria strutturale. Infatti, queste informazioni consentono di monitorare lo stato di salute della struttura o rilevare lo sviluppo e la propagazione di danni all'interno della struttura e valutare le conseguenze per la vita residua della struttura e la sicurezza degli utenti. I cosiddetti sistemi di monitoraggio strutturale (SHM - Structural Health Monitoring) comprendono una serie di tecniche e tecnologie progettate per raggiungere tutto questo. Questa filosofia progettuale è ora ampiamente utilizzata sia nell'ingegneria aerospaziale che in quella civile [1], [2]. Le applicazioni del monitoraggio strutturale si estendono a varie discipline come l'ingegneria aerospaziale e meccanica, ma negli ultimi decenni anche al campo dell'ingegneria civile e delle infrastrutture, tra cui edifici storici e di nuova costruzione, ponti, gallerie, impianti industriali, impianti di produzione, piattaforme offshore, strutture portuali, fondazioni e scavi. Le tecniche dei sensori basate sulla misurazione delle vibrazioni per l'analisi modale in SHM sono tra le più studiate e applicate. Nella misurazione basata sulle vibrazioni, gli accelerometri e i sistemi di acquisizione dati vengono solitamente utilizzati per misurare la risposta della struttura in studio sotto una determinata eccitazione e per determinarne i parametri modali (frequenze naturali, rapporti di smorzamento, forme di modalità e fattori di scala modale) [3]. Poiché le prestazioni dell'accelerometro hanno un impatto diretto sulla qualità dei dati acquisiti e sui risultati che può fornire, la corretta selezione dell'accelerometro è di fondamentale importanza. Tale decisione deve anche considerare l'equilibrio tra costi e prestazioni del sistema SHM complessivo [4], [5]. Le strutture dei ponti esistenti sono esposte a varie sollecitazioni ambientali e operative durante le operazioni quotidiane. Le influenze di questi carichi esterni sono sfavorevoli e possono portare all'accelerazione del danno strutturale. Inoltre, eventi estremi come terremoti possono verificarsi anche durante la vita del ponte. Pertanto, è necessario rilevare le condizioni della struttura in tempo per garantire la sicurezza. Tradizionalmente, l'ispezione visiva ha svolto un ruolo importante nel rilevare i difetti sulla superficie della struttura e valutare le condizioni strutturali. Tuttavia, l'ispezione visiva è laboriosa, dispendiosa in termini di tempo e soggettiva anche per ispettori ben addestrati; quindi, non è in grado di rilevare con precisione i cambiamenti delle condizioni in tempo reale. Per affrontare questo problema, negli ultimi decenni sono state proposte tecniche di monitoraggio della salute strutturale (SHM) che sono sempre più applicate ai ponti a campata

lunga. In [6], è definito SHM come l'uso di tecniche di rilevamento e analisi delle caratteristiche strutturali per rilevare danni strutturali o deterioramento. In [7] si suggerisce che l'SHM dovrebbe essere considerato nel contesto della valutazione delle condizioni. In [8], Farrar e Worden (2007) hanno considerato SHM come una tecnica di rilevamento dei danni. In sintesi, gli obiettivi principali di SHM sono il rilevamento dei danni e la valutazione delle condizioni. Le tecniche SHM sono state applicate ai ponti per quasi 40 anni attraverso l'installazione di sistemi di monitoraggio della salute strutturale (SHMS) e sono state sempre più applicate ai ponti a campata lunga in tutto il mondo [9], [10].

Per superare le note limitazioni delle prestazioni dei sensori inerziali basati su sensori MEMS di tipo consumer, è stata studiata una configurazione ridondante di accelerometri e giroscopi economici posizionati sulle facce di un poliedro regolare. Grazie all'opportunità di calcolare la media dei valori di accelerazione e di velocità angolare provenienti da diversi sensori, la configurazione geometrica considerata consente un'auto calibrazione preliminare e/o la compensazione delle fonti di incertezza tipiche dei sensori inerziali (come la bias instability e la deriva random walk, di seguito indicata anche come deriva di bias per brevità), riducendo così l'incertezza complessiva nelle misure di assetto, posizione e velocità [11]. Per meglio comprendere il metodo proposto, di seguito vengono fornite alcune note teoriche fondamentali sugli argomenti principali.

L'attività di ricerca in oggetto ha visto lo studio mediante ricerca bibliografica, la realizzazione di un prototipo e di un'opportuna piattaforma di test al fine di osservare le performance e l'accuracy del sistema sviluppato. Sono stati quindi utilizzati dei sensori a basso costo al fine di ottenere misure di accelerazione e vibrazione per i ponti. I risultati sono stati ottenuti configurando opportunamente i sensori scelti ed utilizzando una piattaforma di test realizzata in laboratorio ed infine confrontati con sensori ad elevate performance.

8.2 Descrizione dei sensori inerziali

In generale, un *sensore inerziale* è uno strumento in grado di misurare grandezze fisiche (generalmente, accelerazioni e velocità angolari, ma anche campi magnetici) rispetto ad un sistema di riferimento inerziale, in modo indipendente da altri sensori e senza la necessità di ricorrere in maniera continua ad informazioni provenienti dall'esterno. Un insieme di sensori inerziali racchiusi in un'unica piattaforma di misura viene detta *unità di misura inerziale* (IMU – *Inertial Measurement Unit*). Generalmente, la configurazione di sensori

inerziali contenuta all'interno di una IMU progettata per scopi di navigazione è costituita da una terna di giroscopi ed una di accelerometri disposti lungo gli assi di un sistema cartesiano ortogonale. Non si tratta però dell'unica configurazione possibile: recentemente, sono state prodotte anche unità di misura contenenti un numero inferiore di sensori (*reduced IMU* o *partial IMU*, El-Sheimy, 2008) oppure con un numero maggiore di componenti (*redundant IMU*). In quest'ultimo caso, una configurazione tipica prevede l'installazione di un quarto sensore con inclinazione di circa 45° rispetto alla terna cartesiana (*redundant skewed configuration*), così da identificare un eventuale problema su uno dei sensori principali.

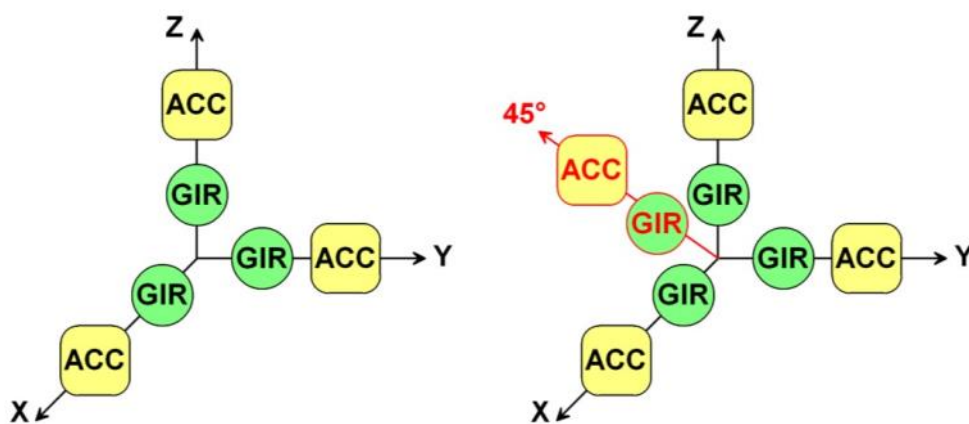


Figura 1 - Configurazione IMU tradizionale e redundant skewed

L'implementazione di una unità di misura inerziale può avvenire attraverso due diverse tipologie costruttive (Figura 2). Nella prima configurazione, i sensori inerziali sono montati su una piattaforma stabilizzata, che isola meccanicamente i sensori dal moto rotatorio del mezzo in movimento. Tali sistemi, detti *gimbaled* (o anche *stable platform*), dopo una prima fase di enorme sviluppo contemporanea alla diffusione dei sensori inerziali per applicazioni aeronautiche, stanno ora conoscendo una rapida scomparsa, seppure risultino ancora utilizzati per applicazioni puramente inerziali (*unaided*) in cui sono richieste accuratissime elevate per periodi di tempo elevati. In alternativa, i sensori inerziali possono essere installati direttamente su una piattaforma rigida vincolata al mezzo in movimento. Sistemi di questo tipo, detti *strapdown*, rappresentano la maggioranza del mercato, sia civile che militare.

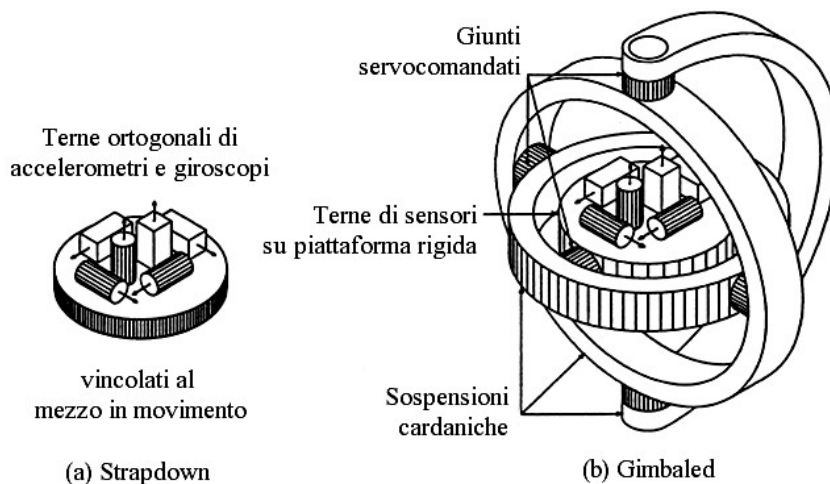


Figura 2 - Differenza tra i sistemi di navigazione di tipo strapdown e quelli su sospensioni cardaniche (gimbaled).

8.2.1 La configurazione gimbaled

Si immagini una terna di accelerometri montati modo mutualmente ortogonale, e la si disponga in maniera tale che gli assi di misura risultino orientati lungo le direzioni Nord/Sud, Est/Ovest e lungo l'asse zenitale.

Al fine di mantenere tale configurazione anche mentre il veicolo è in moto, la terna di accelerometri viene “sospesa” mediante tre sospensioni cardaniche (*gimbals*, in inglese), controllate da tre giroscopi. Per mezzo di retroazioni applicate ai giunti cardanici, l'output dei giroscopi è mantenuto continuamente pari alla velocità di rotazione, nota, di quel determinato sistema di riferimento rispetto ad un sistema inerziale (Cazzaniga, 2007). Così facendo, infatti, la piattaforma rigida su cui sono montati i tre accelerometri non subisce rotazioni rispetto al sistema di navigazione, nonostante il veicolo sia in movimento.

L'output degli accelerometri rappresenterà in questo caso la forza specifica lungo gli assi del sistema di riferimento di navigazione, pertanto l'integrazione delle misure fornirà direttamente la posizione e la velocità del mezzo. L'assetto del veicolo sarà dato dagli angoli relativi tra gli assi del veicolo (solidale al sistema *body-frame*) e quelli della piattaforma inerziale (solidale al sistema di navigazione).

Con riferimento alla Figura 3, si noti come il giunto cardanico più esterno (evidenziato con il colore rosso) controlli l'angolo di sbandamento, quella di mezzo (in blu) controlli il beccheggio e quello più interno (in verde) il rollio.

L'impiego di questo tipo di piattaforme inerziali comporta all'interno del sistema di navigazione inerziale alcuni vantaggi e svantaggi rispetto alla configurazione *strapdown*.

Prima di tutto, tali sensori presentano un elevato rapporto segnale/rumore e sono soggetti a velocità angolari molto piccole. Le accelerazioni misurate risultano essere già riferite al sistema di navigazione, il che comporta una riduzione del carico computazionale ed un'elevata accuratezza delle stime sia a breve che a lungo termine anche nelle fasi iniziali di *allineamento* del sensore.

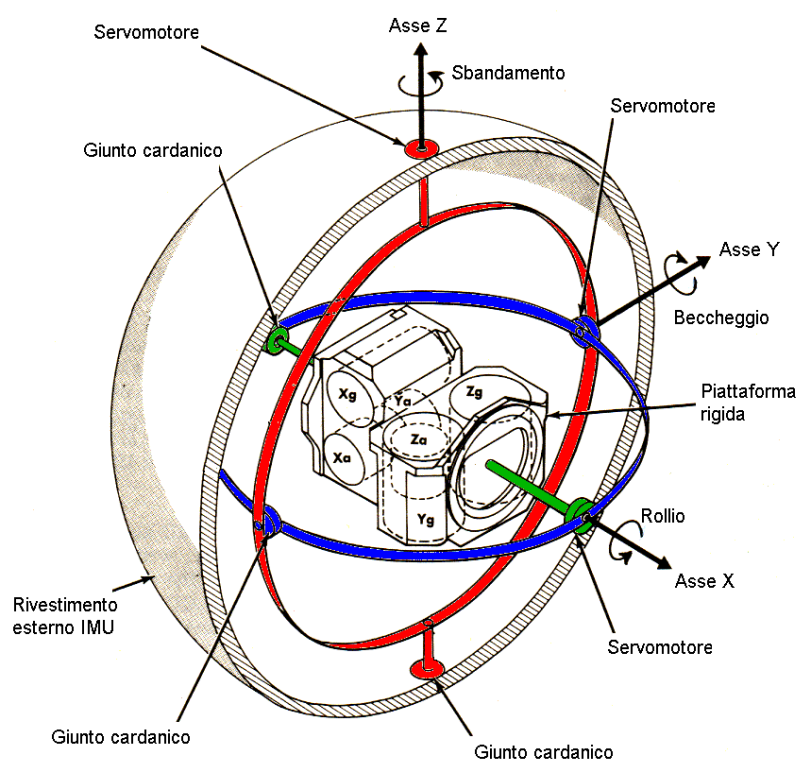


Figura 3 - Schema di funzionamento di un'unità gimbalata

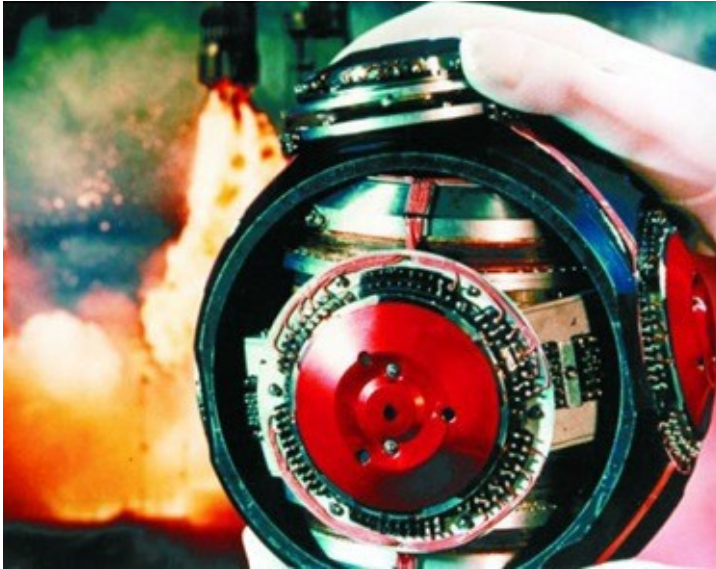


Figura 4 - La piattaforma inerziale di tipo gimbaled FIN1000 della Marconi Electronic System.

Gli svantaggi nell'impiego di sensori *gimbaled* sono principalmente legati all'elevata complessità della struttura di giunti cardanici e cuscinetti, che col tempo tendono ad usurarsi, con un conseguente degrado delle prestazioni del sistema. Vista la complessità della struttura, questi sistemi presentano inoltre costi e dimensioni molto elevati.

8.2.2 La configurazione strapdown

Come visto, i sensori inerziali di tipo *gimbaled* consentono di ottenere ottime accuratèzze sia a breve che a lungo termine, a scapito però di costi e dimensioni molto elevati e di un degrado delle prestazioni con il tempo, nel caso in cui venga a mancare la manutenzione adeguata.

Per tale motivo, agli inizi degli anni Settanta, ebbe origine lo sviluppo di una configurazione alternativa, di più semplice ed economica manutenzione. Il principio su cui si basa è il vincolo, direttamente al mezzo in movimento, della piattaforma rigida contenente giroscopi ed accelerometri, senza sospensioni cardaniche (Figura 5). In questo modo i sensori percepiscono direttamente l'intera dinamica del mezzo e forniscono gli output direttamente nel *body-frame*. Questo tipo di sistemi è detto *strapdown* (dall'inglese *strap down*, letteralmente "legare", "vincolare").

I giroscopi non svolgono più il compito di annullare gli spostamenti del corpo rispetto al piano orizzontale, come accadeva nella configurazione precedente, ma servono per misurare le rotazioni del corpo nello spazio, in modo tale da conoscere sempre l'assetto del corpo e quindi le direzioni in cui sono misurate le accelerazioni su di esso agenti. Di fatto, al posto delle sospensioni cardaniche meccaniche si introduce nel sistema un modello matematico di sospensione, atto a svolgere esattamente le stesse funzioni.



Figura 5 - Alcune piattaforme inerziali di tipo strapdown in commercio.

I principali benefici derivanti dall'impiego di sensori inerziali di questo tipo sono legati alla semplicità della struttura del sensore (peso e dimensioni inferiori rispetto ai sensori *gimbaled*), alla maggiore resistenza agli urti e alle alte velocità, e all'affidabilità del sensore con il passare del tempo. Tali vantaggi ne comportano anche un altro, non meno importante: il costo ridotto.

Tuttavia, l'impiego di sensori *strapdown* implica un maggiore carico computazionale da parte del sistema di navigazione, la difficoltà di allineamento sul mezzo e la necessità di utilizzare modelli di calibrazione sempre più completi: la deriva dei giroscopi e degli accelerometri, infatti, si accumula nel tempo, peggiorando la stima sia dell'assetto sia della posizione.

Nonostante i difetti presentati, i sistemi di navigazione *strapdown* sono sempre più utilizzati, non solo per ragioni dovute alla maggiore economicità rispetto ai sistemi *gimbaled*. Altri motivi sono da ricercare nella rapida evoluzione dei sistemi di calcolo, che ha reso pressoché trascurabile il carico computazionale richiesto, nella diffusione per scopi di navigazione della tecnologia GNSS e della sua integrazione con i sensori inerziali, che ha permesso lo sviluppo di algoritmi per la calibrazione del sensore durante la navigazione.

8.2.3 Classificazione dei sensori inerziali

Visto il largo impiego dei sensori inerziali in diverse applicazioni, anche non legate al posizionamento, non esiste una classificazione dei sensori inerziali che sia universalmente riconosciuta. Spesso, si tende ad indicare tali sensori con i termini “*high-grade*”, “*medium-grade*” e “*low-grade*”, con riferimento alle prestazioni che essi consentono di ottenere. Tuttavia, un sensore che per un autore può essere classificato come “*medium-grade*”, per un altro può diventare “*high-grade*” o “*low-grade*”, a seconda dell’impiego per cui tale sensore viene utilizzato. Per questo motivo, nel proseguo verrà adottata la classificazione proposta da Groves (2008), basata sul campo di applicazione dei sensori inerziali. Tale classificazione è stata scelta poiché ben si adatta alle applicazioni di navigazione, che sono l’obiettivo principale della Tesi.

Escludendo le applicazioni specialistiche legate alla balistica, ad uso esclusivo dei militari, è possibile racchiudere i sensori inerziali in cinque grandi categorie di applicazione: *marine-grade*, *aviation-grade*, *intermediate-grade*, *tactical-grade* ed *automotive-grade*.

- ***Marine-grade*** (Figura 6.a): appartengono a questa categoria i sensori inerziali studiati per applicazioni navali, per sottomarini e per alcuni veicoli spaziali. Tali sensori sono in genere caratterizzati da un costo molto elevato (superiore al milione di euro) e da una deriva della soluzione navigazionale inferiore a 1.8 km (un miglio marino) al giorno. In genere, tali sensori hanno dimensioni molto elevate (anche un metro di diametro), sebbene al giorno d’oggi vi siano sistemi di dimensioni più ridotte.
- ***Aviation-grade*** (Figura 6.b): tali sensori, detti anche *navigation-grade*, sono generalmente impiegati sui velivoli militari, e pertanto devono essere in grado di rispettare gli standard previsti per il posizionamento (*SNU 84 - Standard Navigation Unit 84*), garantendo una deriva media sul posizionamento planimetrico di circa 1.5 km all’ora. Gli stessi sensori inerziali trovano impiego anche in applicazioni aeronautiche di tipo civile, hanno un costo pari a circa 100 000 € ed una dimensione standard (anch’essa prescritta dalla norma) di 178 x 178 x 249 mm.
- ***Intermediate-grade***: in questa categoria sono inclusi i sensori inerziali installati su piccoli velivoli o elicotteri, con una deriva sul posizionamento di un ordine di grandezza maggiore rispetto ai sensori *aviation-grade* (15 km/h). Il costo di questi sensori si aggira intorno ai 20 000 – 50 000 €.

- **Tactical-grade** (Figura 6.c): si tratta di quei sensori inerziali in grado di fornire una soluzione navigazionale autonoma solo per alcuni minuti, mentre richiedono, per soluzioni a lungo termine, l'integrazione con altri sensori di posizionamento (tipicamente ricevitori GNSS). Questi sensori hanno un costo compreso tra 5 000 e 20 000 €, hanno dimensioni ridotte e sono impiegati all'interno di veicoli/velivoli senza pilota (UAV – *Unmanned Aerial Vehicles*) e per applicazioni di *Mobile Mapping*.
- **Automotive-grade** (Figura 6.d): questi sensori inerziali vengono solitamente venduti separatamente, come singoli accelerometri o giroscopi, piuttosto che all'interno di una piattaforma inerziale. Si tratta di sensori che generalmente non vengono progettati per applicazioni di navigazione, ma che trovano un vasto impiego nell'industria automobilistica (da cui il loro nome), all'interno di sistemi quali ABS, sospensioni attive ed airbag. Il costo di tali sensori è estremamente ridotto, e varia da 1€/sensore per gli accelerometri a circa 10€/sensore per i giroscopi. Anche le dimensioni sono molto ridotte, con volumi di qualche centimetro cubo, soprattutto grazie allo sviluppo della tecnologia MEMS (*Micro-Electro-Mechanical System*).



Figura 6 - 7 Esempi di sensori inerziali delle diverse categorie – (a) marine-grade (Teledyne TSS Orion); (b) aviation-grade (Honeywell 34078600-007); (c) tactical-grade (Northrop Grumman LN-200); (d) automotive-grade (Cloud Cap Crista IMU) (immagini non in scala).

8.2.4 Tecnologie di costruzione

Nel corso degli ultimi cinquant'anni, la tecnologia dei sistemi inerziali ha conosciuto uno sviluppo notevole, a partire dai primi strumenti elettro-meccanici utilizzati intorno al 1950, fino agli attuali sensori micro-elettro-meccanici (MEMS).

A dare inizio a questo sviluppo sono stati i programmi missilistici degli anni Sessanta, culminati con l'avvento della configurazione di tipo *strapdown* precedentemente presentata. Nel ventennio seguente, ha contribuito in modo significativo lo sviluppo dei primi giroscopici ottici e dei sensori di tipo *solid state*, grazie soprattutto al fatto che le loro prestazioni li rendessero particolarmente adatti anche in presenza di dinamiche elevate. La sensibile riduzione dei costi, dovuta all'introduzione di tecnologie di più semplice realizzazione, ha fatto sì che in questo periodo si avesse lo sviluppo anche delle prime applicazioni in ambito civile, all'interno degli aeromobili di linea e dei primi veicoli rilevatori.

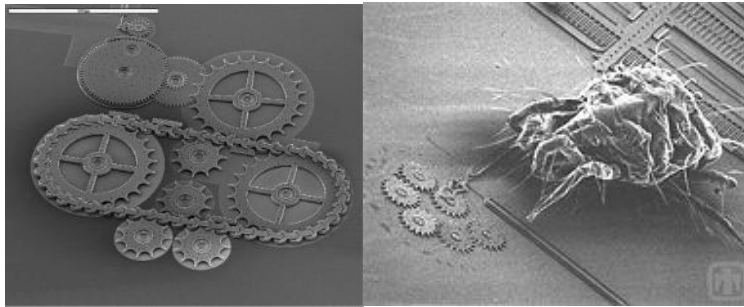
Le applicazioni di tipo civile devono in realtà molto allo sviluppo repentino, nei primi anni Novanta, della tecnologia di costruzione delle fibre ottiche che ha portato un miglioramento di circa un ordine di grandezza dell'accuratezza dei giroscopi ottici.

L'impiego di sensori inerziali (soprattutto accelerometri) per applicazioni civili, in particolare da parte delle case automobilistiche, hanno dato la spinta per lo sviluppo dei sensori di basso costo basati sulla tecnologia MEMS (acronimo di *Micro-Electro-Mechanical System*).

Figura 8 - esempi di realizzazione di sensori MEMS – si noti il rapporto tra le dimensioni del sensore MEMS e quelle dell'acaro della polvere (circa 0.5 mm).

Questa tecnologia consente di integrare in un unico componente elementi meccanici insieme con i circuiti elettronici per il controllo e l'elaborazione del segnale. Sfruttando le eccellenti proprietà fisiche del silicio (più robusto, con caratteristiche termiche migliori e un peso specifico pari ad un terzo di quello dell'acciaio) è possibile realizzare micro- sensori per la rilevazione di grandezze meccaniche che possono essere anche molto economici se prodotti su larga scala. Tuttavia, la riduzione nelle dimensioni (Figura 7) comporta un aumento del *noise* e degli errori sistematici, oltre a rendere questi sensori molto sensibili alle variazioni termiche.

Inizialmente, i sensori inerziali di tipo MEMS erano destinati ad applicazioni di tipo *mass*



market, caratterizzate in genere da scarse precisioni. Tuttavia, solo nell'ultimo decennio le accuratèzze ottenibili con sensori di questo tipo hanno avuto un miglioramento di 3-4 ordini di grandezza. Tale incremento è dovuto principalmente agli studi sugli effetti della geometria della struttura e della sua dimensione, come pure a quelli sull'elettronica e l'assemblaggio.

In conclusione, lo sviluppo negli ultimi vent'anni di sensori di questo tipo ha permesso di superare molti aspetti che in passato avevano precluso l'utilizzo dei sensori inerziali in diverse applicazioni, riducendone sensibilmente la dimensione, i costi ed i consumi, ed aprendo un nuovo mercato di sviluppo.

Attualmente, le applicazioni *tactical-grade* e *automotive-grade*, come pure la navigazione assistita da sensori GNSS, sono dominate da accelerometri di tipo MEMS sempre più miniaturizzati, mentre tra i giroscopi continuano ad essere preferiti i sensori ottici (sia laser che a fibre ottiche), anche se iniziano ad essere presi seriamente in considerazione i sensori inerziali completamente basati sulla tecnologia MEMS.

Nel seguito saranno presentate alcune caratteristiche dei più diffusi sensori inerziali impiegati per la navigazione, e le loro tecnologie di costruzione. Al termine del Capitolo, verranno illustrati alcuni cenni sul principio di funzionamento dei magnetometri, sempre più spesso inclusi all'interno delle unità di misura inerziale progettate per la navigazione. Quanto segue rappresenta solamente una minima parte di quanto si potrebbe raccontare su questo argomento ed ha lo scopo di riassumere per quanto possibile il vasto (ed in continua evoluzione) mercato dei sensori inerziali. Informazioni più complete e dettagliate si possono trovare in (Jekeli, 2001), (Titterton e Weston, 2004), (Cazzaniga, 2007) ed in (Woodman, 2007), che sono stati in larga misura impiegati per reperire le informazioni e le figure presentate nel seguito.

8.2.5 Accelerometri

In termini generici, un accelerometro è un sensore in grado di rilevare ed eventualmente misurare un'accelerazione lineare. Negli ultimi anni l'importanza di questi sensori è notevolmente accresciuta grazie soprattutto al loro impiego, accanto alle tradizionali applicazioni in ambito scientifico e aerospaziale, in molti campi civili (ad esempio, nel campo automobilistico, di *testing* o di analisi meccanica).

Con il moltiplicarsi delle applicazioni sono accresciute anche le tipologie di questi strumenti, e oggi se ne possono contare decine di tipi, ognuno con caratteristiche funzionali e costruttive differenti. In generale, è possibile distinguere due diverse tipologie di accelerometri: quelli meccanici e quelli a vibrazione. In linea di principio, i sensori di tipo meccanico si basano sullo spostamento di una massa di prova, mentre quelli a vibrazione sfruttano le variazioni della frequenza di oscillazione di una o più masse di prova.

8.2.6 Accelerometri meccanici

Schematicamente, un accelerometro di tipo meccanico è uno strumento che misura la forza di reazione vincolare con cui un mezzo agisce su una massa di prova M per mantenerla a sé legata nel movimento. Nella sua configurazione più elementare un accelerometro è costituito da uno chassis che vincola la massa M a muoversi solo lungo l'asse x e da una molla che lega M allo chassis (Figura 15).

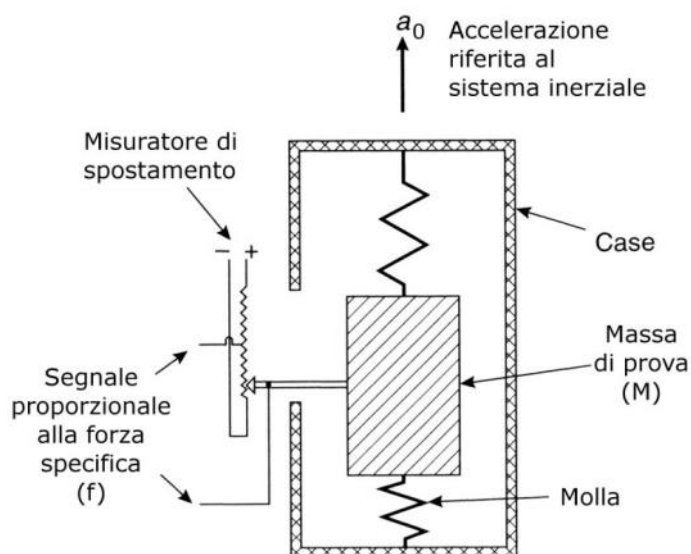


Figura 9 - Schema di un accelerometro a molla

Quando lo strumento, o il mezzo su cui lo strumento è vincolato, subisce un'accelerazione a_0 lungo il suo asse, la massa di prova tende a resistere al movimento per la sua inerzia. Tale spostamento comprime la molla con una contrazione ξ la quale imprime sulla massa una forza, detta forza specifica f , tale che anche M assuma la stessa accelerazione a_0 .

Il problema degli accelerometri basati su tale schema è legato al fatto che, in seguito all'applicazione della prima forza f , la massa M inizierebbe ad oscillare rispetto alla posizione di quiete con un'ampiezza proporzionale ad a_0 .

Se ora si introducesse una reazione viscosa tale da agire su M , il moto oscillatorio della massa ne risulterebbe smorzato, ed M tenderebbe dopo breve tempo a una posizione asintotica di quiete in cui molla e forza d'inerzia impressa ad M siano in equilibrio, dunque si avrebbe:

$$\xi = \frac{a_0}{\omega_0^2}$$

In questo caso, la misura di ξ porterebbe immediatamente alla determinazione di a_0 . In aggiunta, affinché la massa e la molla diano una risposta pronta e fedele ad ogni istante di tempo, viene solitamente applicato uno strumento elettromagnetico, che produce una forza sulla massa di prova per mantenerla nella sua posizione di quiete ed evitare che inizi ad oscillare.

Si noti inoltre che l'accelerazione totale sulla massa ($\ddot{x}$) è data dalla somma algebrica dell'accelerazione prodotta dalle forze esterne (f) e dall'accelerazione gravitazionale (g). Se si immagina di porre un accelerometro su un piano soggetto al campo di gravità, allora la massa interna dell'accelerometro viene attratta verso il basso rispetto alla posizione di equilibrio. L'output dell'accelerometro (accelerazione meno gravità) è detta *forza specifica*, ed è data da:

$$f = \ddot{x} - g$$

L'accelerometro meccanico più diffuso è sicuramente quello a pendolo (*pendulous accelerometer*). In questo sensore, una massa di prova è sospesa per mezzo di un giunto flessibile in modo tale da permettere la rotazione attorno ad un asse perpendicolare al suo asse di input. Il funzionamento è analogo a quello descritto in precedenza: quando viene applicata un'accelerazione al sensore, la massa di prova è deflessa rispetto al suo zero di una quantità proporzionale alla forza specifica applicata lungo l'asse di input. Anche in

questo caso, è preferibile misurare non direttamente lo spostamento della massa, ma la forza (o la coppia) necessaria a mantenere la massa stessa in uno stato di quiete (configurazione *pendulous force-feedback*). Gli strumenti che si basano su tale principio sono in grado di misurare forze specifiche con bias che variano da pochi μg sino a pochi mg .

Una versione ormai consolidata da tempo dell'accelerometro a pendolo è quella sviluppata con la tecnologia MEMS. In questo caso, il *pendulous MEMS accelerometer* (Figura 16) misura lo spostamento di una massa di prova sostenuta da un perno, o da una parte flessibile. Tale sensore è del tutto assimilabile ad un sensore meccanico costruito in silicio, con il vantaggio di poter essere notevolmente miniaturizzato (fino a qualche micron di larghezza), e con un'accuratezza che varia tra 25 μg e 1 mg .

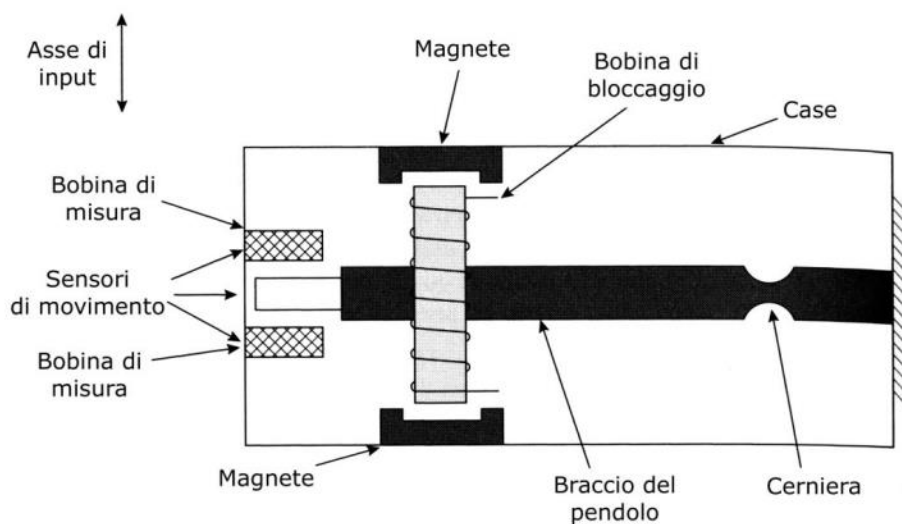


Figura 10 - Schema di funzionamento dell'accelerometro a pendolo.

8.2.7 Accelerometri a vibrazione

Come visto nel paragrafo relativo ai giroscopi, i sensori a vibrazione, o *solid state*, utilizzano varie tecniche che permettono la miniaturizzazione dello strumento. In particolare, vi sono due principali tipologie di sensori a vibrazione: i *vibrating beam* (anche nella loro versione MEMS) e gli accelerometri ad onde superficiali.

I *vibrating beam accelerometers* (VBA) sono costituiti da una o più masse di prova vincolate per mezzo di una o più barrette. L'accelerazione applicata sul sensore è calcolata a partire dalla misura della variazione della frequenza di oscillazione. Una configurazione piuttosto comune di tale sensore impiega una coppia di cristalli di quarzo, montati simmetricamente, ciascuno dei quali dotato di una massa di prova. Questi cristalli vengono portati a vibrare ad una frequenza il più prossima possibile a quella di risonanza. In assenza di accelerazioni

esterne, le barrette vibrano alla stessa frequenza, e dunque la differenza delle frequenze di vibrazione sarà pari a zero. Diversamente, quando si è in presenza di una accelerazione, una barretta subirà una forza di compressione, mentre l'altra sarà in trazione a causa della reazione inerziale delle masse di prova, con una conseguente variazione della frequenza. La differenza di frequenza misurata, in particolare, è direttamente proporzionale all'accelerazione applicata. Le prestazioni tipiche di questo accelerometro sono dell'ordine di 0.1-1 mg. La versione MEMS di questo sensore è più nota come *resonant MEMS accelerometer*; in questo caso, viene misurata la variazione di frequenza dovuta ad una massa soggetta ad accelerazione. Tali accelerometri tendono ad avere un'accuratezza elevata, fino a 1 μg .

Gli accelerometri ad onde superficiali (SAW, *surface acoustic wave accelerometer*) sono strumenti in grado di trasmettere un treno di onde acustiche superficiali su una piccola mensola a sbalzo. Un'estremità della mensola è vincolata al case del sensore, mentre l'altra estremità, a cui è attaccata una massa di prova, è libera di muoversi. Quando viene applicata un'accelerazione normale al piano contenente la mensola, la reazione inerziale del case fa flettere la mensola, e la frequenza dell'onda acustica superficiale cambia in funzione dello sforzo applicato (e, dunque, dell'accelerazione cui lo strumento è soggetto). In questo caso, il bias è inferiore a 0.5 mg.

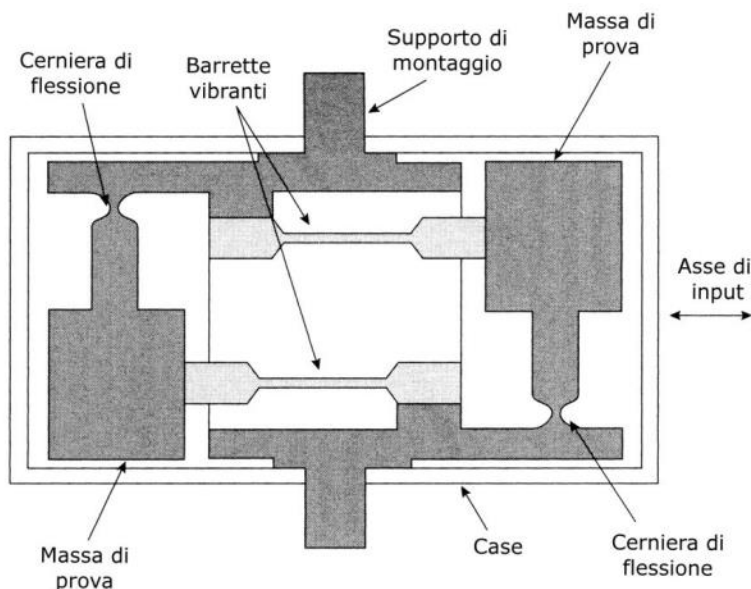


Figura 11 - Schema di funzionamento del vibrating beam accelerometer

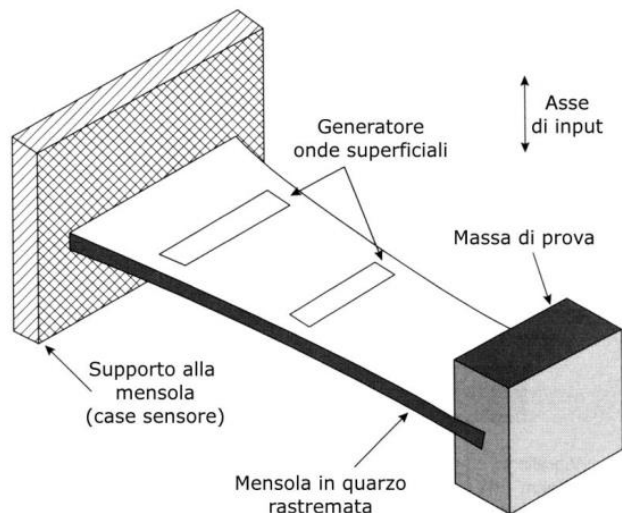


Figura 12 - Schema dell'accelerometro ad onde superficiali

8.3 Sorgenti di incertezza nei sensori per piattaforme inerziali

8.3.1 "Errori" tipici e loro origini

Una unità di misura inerziale, come visto in precedenza, è composta da un insieme di sensori tali da consentire la stima di tutti gli stati della navigazione ad una elevata frequenza temporale.

Trattandosi generalmente di sensori di natura elettro-meccanica, le misure effettuate risultano affette da due tipi di errori (De Marchi e Lo Presti, 1993):

- *errori sistematici*: sono, nella maggior parte dei casi, legati ad errori di modello ed hanno la caratteristica di conservare valore e segno. Sono errori sistematici, ad esempio, la presenza di un *bias* o di un *fattore di scala* all'interno delle misure, ma anche gli effetti legati alla *non ortogonalità* delle terne di accelerometri e di giroscopi. In genere, errori di questa natura sono eliminabili con tarature della piattaforma inerziale, effettuate mediante opportune procedure operative di *calibrazione*, che contribuiscono al miglioramento della conoscenza del sistema di misura.
- *errori accidentali*: sono errori non prevedibili a priori, di segno alterno. L'origine di tali errori può essere interna (e in tal caso viene definito *rumore*) od esterna (in tal caso si parla di *disturbo*) al sistema di misura, con conseguenze che possono anche essere molto diverse nei due casi. In particolare, un disturbo di misura è molto più simile ad un errore sistematico rispetto ad un rumore, anche se la sua natura è tale da far sì che esso non si ripeta uguale ad ogni misura. In generale, disturbi e rumori sono fenomeni di carattere aleatorio, e le incertezze di misura che ne scaturiscono possono essere ridotte (ma quasi

mai eliminate completamente) ripetendo più volte la misura, oppure sottoponendo i dati ad appositi algoritmi di *filtraggio* del segnale.

I sistemi inerziali di precisione (e costo) medio-alto generalmente includono all'interno del sensore tecnologie di fabbricazione ed algoritmi di controllo che limitano gli effetti legati alle due tipologie di errore sopra descritte. In particolare, i sensori inerziali possono essere definiti in funzione di tali algoritmi in tre diverse categorie:

- ISA (Inertial Sensor Assembly): l'output è rappresentato dai soli dati grezzi;
- IMU (Inertial Measurement Unit): il dato grezzo viene compensato dagli errori sistematici, quali il fattore di scala ed i bias;
- INS (Inertial Navigation System): l'output è il risultato di un'elaborazione mediante degli algoritmi di navigazione in modo da stimare la posizione, la velocità, e l'assetto del veicolo.

Tabella 1 - Categorie di sistemi inerziali

Caratteristica	INS	IMU	ISA
Errore di posizione	< 30 m/h	1 – 4 km/h	20 – 40 km/h
Bias del giroscopio	0.0001 – 0.01 deg/h	0.015 -1 deg/h	> 1 deg/h
Bias degli accelerometri	1 μ g	50 - 100 μ g	100 - 1000 μ g
Applicazioni	Lancio di missili intercontinentali; sottomarini	Navigazione e georeferenziazione di alta precisione	Applicazioni di navigazione se integrati con i GPS

sviluppo dei sensori MEMS, caratterizzati da una sensibile riduzione delle dimensioni, del costo e del peso. Tuttavia, il segnale in uscita da tali sensori risulta essere fortemente disturbato dalla presenza di un rumore ad altissima frequenza, che rende molto complesso il trattamento delle osservazioni grezze. In aggiunta, tali sensori sono nella maggior parte dei casi soggetti anche ad una incertezza (Cazzaniga, 2007), in base alla quale alcuni errori di natura sistematica possono variare ad ogni accensione dello strumento, con un'incertezza che può essere fino a 10 volte maggiore rispetto all'entità del rumore di misura. Per sfruttare appieno le potenzialità di tali tipologie di sensori, è pertanto necessario sottoporre gli stessi a diverse procedure di calibrazione e di filtraggio, al fine di valutare e modellare i diversi tipi di errori.

A tale fine, nei paragrafi successivi vengono descritti gli errori di natura sistematica ed accidentale più comuni all'interno di una piattaforma inerziale, ed i metodi di calibrazione e di filtraggio impiegati per la compensazione di tali errori. In questa ricerca, tali metodi sono stati modificati a partire da quelli reperibili dalla letteratura internazionale, in maniera da adattarsi all'impiego per sensori di basso costo.

8.3.2 Contributi sistematici

8.3.2.1 Bias di misura

Il *bias* è un errore di tipo sistematico presente in tutte le osservazioni, e ne costituisce la fonte di errore principale. Tale contributo sistematico è indipendente dall'entità della misura effettuata e pertanto viene talvolta indicato con il termine di *g-independent bias*, in maniera da distinguerlo dal *g-dependent bias* che verrà presentato in seguito.

I *bias* degli accelerometri e dei giroscopi che compongono una piattaforma inerziale sono indicati ispettivamente

dai due vettori, $\mathbf{b}_a = (b_{a,x}, b_{a,y}, b_{a,z})$ e $\mathbf{b}_g = (b_{g,x}, b_{g,y}, b_{g,z})$, con riferimento agli assi e della terna di assi del sensore. Talvolta (Groves, 2008) è possibile dividere ciascun *bias* in una parte statica, indicata con $\mathbf{b}_{a,s}$ e $\mathbf{b}_{g,s}$, ed in una dinamica, $\mathbf{b}_{a,d}$ e $\mathbf{b}_{g,d}$, dove:

$$\mathbf{b}_a = \mathbf{b}_{a,s} + \mathbf{b}_{a,d}$$

$$\mathbf{b}_g = \mathbf{b}_{g,s} + \mathbf{b}_{g,d}$$

La componente statica, che prende il nome di *fixed bias*, *turn-on bias* o anche di “*bias* ripetibile”, comprende la già citata incertezza *run-to-run* e l'eventuale componente residua del *bias* rimasta anche in seguito alla calibrazione dello strumento. Tali parametri non sono quindi del tutto costanti, ma contengono una componente che varia ad ogni accensione dello strumento. È tuttavia ragionevole supporre che, nell'arco di un'osservazione continua di poche ore di durata, ovvero per le durate caratteristiche dei rilievi geodetici, le loro variazioni siano talmente lente da potersi considerare nulle, e che quindi errori di tale entità possano essere ritenuti costanti in fase di analisi dei dati (Sansò, 2006).

La componente dinamica, nota anche con il nome di *in-run bias*, o di “*bias instabile*”, mostra una variabilità anche in brevi periodi di tempo, intorno al minuto, ed è legata principalmente alla sensibilità dello strumento rispetto alle variazioni della temperatura del sensore. Generalmente, tale componente ha un ordine di grandezza pari a circa il 10% del *bias* statico, tuttavia tale percentuale può aumentare molto (anche di un ordine di grandezza) nel caso di sensori elettro-meccanici di bassissimo costo.

In genere, i *bias* degli accelerometri e dei giroscopi non vengono riportati nelle unità del Sistema Internazionale. Gli accelerometri, infatti, vengono misurati con riferimento alla componente gravitazionale dell’accelerazione, abbreviata con *g*, dove $1\text{ g} = 9.80665\text{ m/s}^2$, ed in particolare in termini di milli-g (mg) o di micro-g (μg). Per quanto concerne i giroscopi, solitamente ci si riferisce a *gradi sessadecimali all’ora* ($^{\circ}/\text{hr}$ oppure deg/hr), ad eccezione dei giroscopi di qualità molto scadente, in cui viene impiegata come unità di misura il *grado sessadecimale al secondo* (deg/s).

La presenza di un *bias* non compensato all’interno del sensore inerziale provoca un effetto di *traslazione* dei valori misurati di accelerazione e di velocità angolare. Tale traslazione ha però un effetto molto più complesso all’interno della soluzione finale di navigazione.

La tabella seguente mostra alcuni valori tipici di *bias* degli accelerometri e dei giroscopi per le principali categorie di sensori inerziali (Groves, 2008):

Tabella 2 - Valori tipici dei bias di accelerometri e giroscopi per alcune categorie di sensori inerziali.

Categoria di applicazione	Bias degli accelerometri <i>mg</i>	Bias dei giroscopi <i>deg/hr</i>
<i>Marine grade</i>	<i>0.01</i>	<i>0.001</i>
<i>Aviation grade</i>	<i>0.03 – 0.1</i>	<i>0.01</i>
<i>Intermediate grade</i>	<i>0.1 – 1</i>	<i>0.1</i>
<i>Tactical grade</i>	<i>1 – 10</i>	<i>1 – 100</i>
<i>Automotive grade</i>	<i>> 10</i>	<i>> 100</i>

Si consideri ad esempio un *bias* sulle accelerazioni: se tale errore non fosse compensato, provocherebbe un errore proporzionale al tempo sulla velocità e proporzionale al quadrato del tempo sulla posizione. Infatti, detta $\ddot{x}_0$ l'accelerazione misurata, composta dall'effettiva accelerazione $\ddot{x}$ e dal bias $\mathbf{b}_a$, la velocità risultante sarà pari a:

$$\dot{x}_0 = \int \ddot{x}_0 dt = \int \ddot{x} dt + \int \mathbf{b}_a dt = \dot{x} + \mathbf{b}_a t$$

mentre la posizione risultante sarà

$$x_0 = \int \dot{x}_0 dt = \int \dot{x} dt + \int \mathbf{b}_a t dt = x + \frac{1}{2} \mathbf{b}_a t^2$$

Nel caso in cui invece vi sia nelle misure di velocità angolare un *bias* non compensato b_g , l'errore che si introduce nella stima dell'angolo di rollio, di beccheggio o di sbandamento è proporzionale al tempo.

Tale errore $\delta\vartheta$ si ripercuote sull'allineamento del sensore inerziale, generando di conseguenza un'errata direzione di proiezione del vettore dell'accelerazione ed un errore $\ddot{x}_g$ nel dominio dell'accelerazione pari a

$$\ddot{x}_g = g \sin(\delta\vartheta) \approx g \delta\vartheta \approx g b_g t$$

e di conseguenza si avrebbe sulla velocità:

$$\dot{x}_0 = \int \ddot{x} dt + \int \ddot{x}_g dt = \int \ddot{x} dt + \int g b_g t dt = \dot{x} + \frac{1}{2} g b_g t^2$$

mentre l'errore finale sulla posizione è

$$x_0 = \int \dot{x}_0 dt = \int \dot{x} dt + \int \frac{1}{2} g b_g t^2 dt = x + \frac{1}{6} g b_g t^3$$

Dunque, un *bias* non compensato nei giroscopi produce un errore proporzionale al quadrato del tempo sulle velocità ed un errore proporzionale al tempo elevato al cubo sulla posizione.

La figura seguente riporta l'andamento dell'errore sulla velocità e sulla posizione provocato da un *bias* non compensato rispettivamente di 0.01 m s^{-2} (1 mg) sull'accelerometro e di 10^{-5} rad/s (2 deg/hr) sul giroscopio.

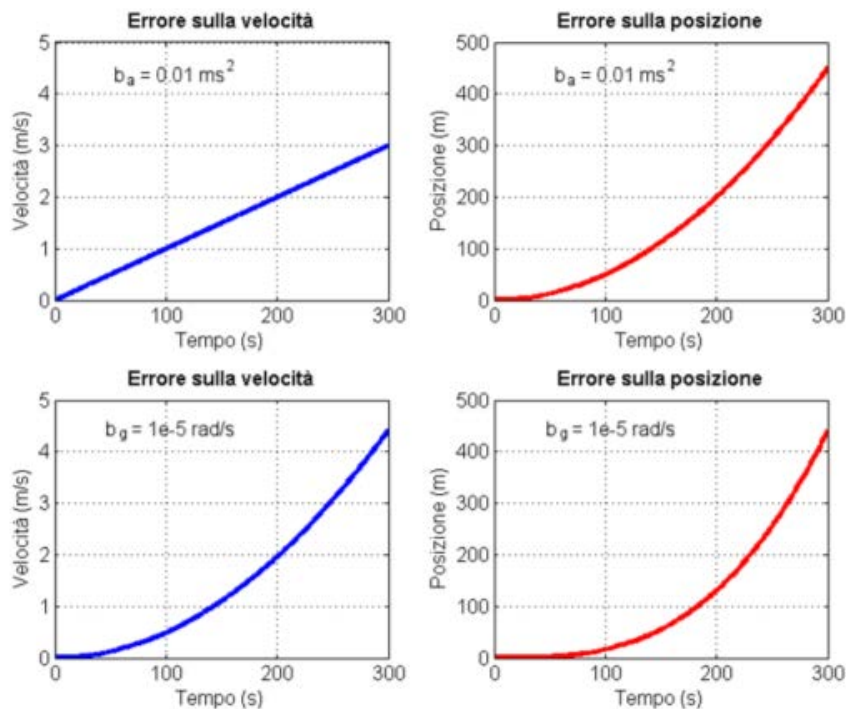


Figura 13 - andamento dell'errore nella velocità (in blu) e nella posizione (in rosso) provocato da un bias non compensato sull'accelerometro (in alto) e sul giroscopio (in basso).

8.3.2.2 Il fattore di scala

Il *fattore di scala* (*scale-factor* nella letteratura anglosassone) di una misura rappresenta il rapporto che esiste tra:

$$s = \frac{\text{Output del sensore}}{\text{Grandezza misurata}}$$

e come tale deve essere il più prossimo possibile all'unità. All'interno di una piattaforma inerziale, i fattori di scala degli accelerometri e dei giroscopi vengono indicati rispettivamente con i due vettori $\mathbf{s}_a = (s_{a,x}, s_{a,y}, s_{a,z})$ e $\mathbf{s}_g = (s_{g,x}, s_{g,y}, s_{g,z})$

Poiché si tratta di un rapporto tra due grandezze simili, il fattore di scala viene generalmente espresso in termini adimensionali, in *parti per milione* (ppm) od in *percentuale* (%) nel caso di sensori di bassa qualità.

All'interno dell'errore provocato dal fattore di scala vero e proprio vi sono anche i contributi di errori con ordini di grandezza inferiori, quali ad esempio la *non linearità del fattore di scala* (*scale-factor non-linearity*) e l'*asimmetria del fattore di scala* (*scale-factor asymmetry*) (Titterton e Weston, 2004).

Il primo errore è legato al fatto che il fattore di scala potrebbe non essere perfettamente lineare, ma avere termini di ordine superiore che tendono a produrre un errore di tipo sistematico nell'interpolazione lineare che viene effettuata in fase di calibrazione. L'asimmetria del fattore di scala, invece, è la differenza che si può avere quando viene misurata la stessa grandezza con segno opposto. In questo caso, il fattore di scala può essere trattato come un *bias* e rettificato in fase di calibrazione dello strumento.

Uno scostamento residuo Δs nel fattore di scala provoca sul segnale di output (O) del sensore uno scostamento ε_0 pari a:

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta s}{s} O$$

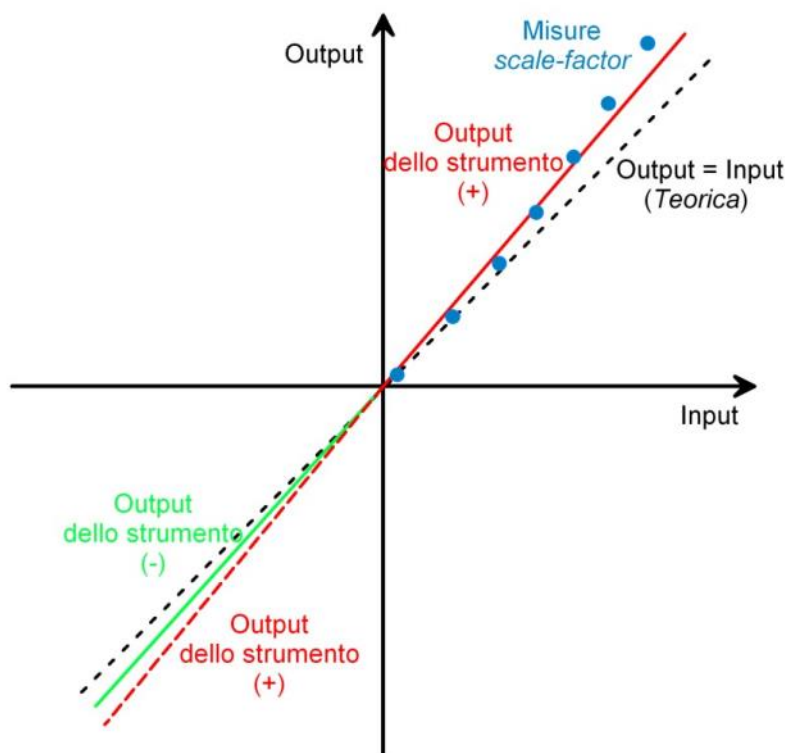


Figura 14 - Schematizzazione del significato fisico delle diverse componenti del fattore di scala.

L'errore provocato sugli stati della navigazione è generalmente ininfluenza, ad eccezione degli istanti in cui il mezzo è sottoposto a violente accelerazioni e/o velocità di rotazione. Infatti, un errore del 1% del fattore di scala, supponendo ad esempio che il veicolo/velivolo sia sottoposto ad un'accelerazione costante di 2 g, comporterebbe un'incertezza di 20 mg (indistinguibile dal *bias* dell'accelerometro), con un errore di poco superiore al chilometro dopo circa un'ora di navigazione.

In genere, le diverse tipologie costruttive di accelerometri e giroscopi vengono classificate in base proprio alla stabilità dei loro *bias* e *fattori di scala*: i grafici seguenti rappresentano gli ordini di grandezza tipici per le tipologie di accelerometri e di giroscopi più diffusi sul mercato.

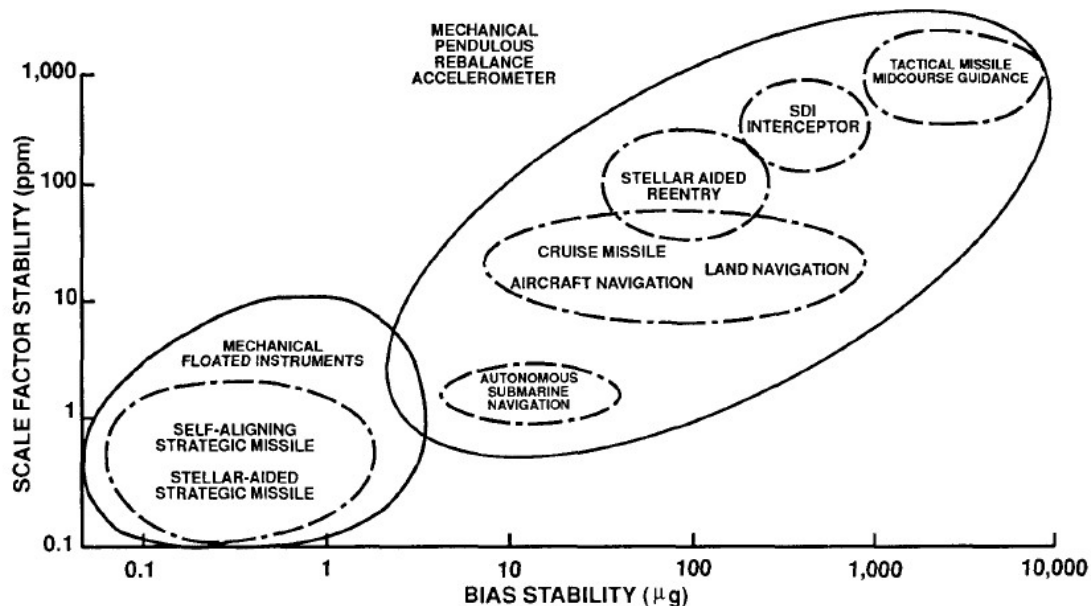


Figura 15 - Classificazione delle tipologie di accelerometri più diffusi sul mercato (fonte: Barbour et al., 1992)

8.3.2.3 Altre componenti di errori sistematici

L'errore di *non-ortogonalità* (*cross-coupling error*) è legato, come dice il nome, al disallineamento fisico degli assi del sensore inerziale rispetto alla terna ortogonale ideale del *body-frame*.

Tale imprecisione, dovuta principalmente a problemi costruttivi, rende ciascun accelerometro/giroscopio montato su un asse della terna sensibile in parte anche alle forze che agiscono lungo i due assi ad esso ortogonali. Inoltre, la non-ortogonalità degli assi causa anche un fattore di scala addizionale, che in genere è di due-tre ordini di grandezza inferiore rispetto all'errore di non-ortogonalità vero e proprio.

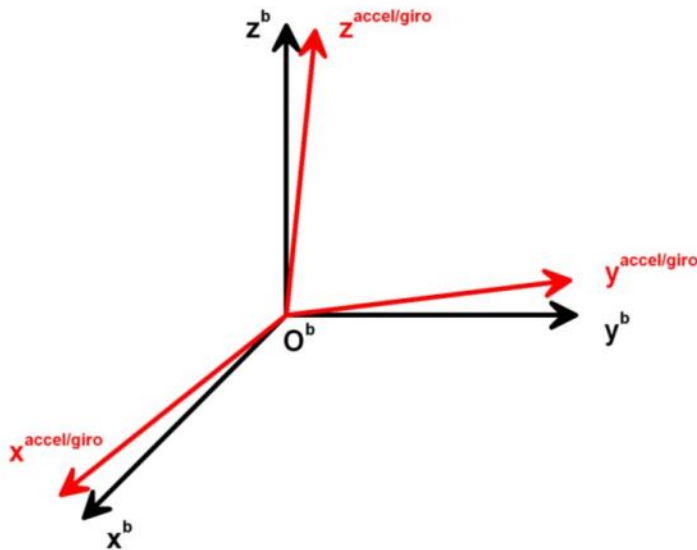


Figura 16 - Non-ortogonalità degli assi rispetto al body-frame.

Generalmente il fattore di non ortogonalità viene espresso in *parti per milione* (ppm) o in *percentuale* (%) con riferimento alla forza applicata. Inoltre, le notazioni $m_{a,\alpha\beta}$ e $m_{g,\alpha\beta}$ vengono impiegate per esprimere l'errore di non-ortogonalità della forza diretta lungo l'asse β e che viene percepita rispettivamente dall'accelerometro e dal giroscopio posto lungo l'asse α . Per la maggior parte dei sensori inerziali, l'errore di non- ortogonalità degli assi varia tra 10^{-4} e 10^{-3} (100-1000 ppm), anche se i sensori MEMS di basso costo (soprattutto i giroscopi) possono raggiungere errori di 10^{-2} (1%).

Il *bias dipendente dall'accelerazione* (*g-dependent bias*) è un errore presente soprattutto nei giroscopi a massa sospesa, dovuto ad uno sbilanciamento della massa nella sospensione del rotore, ovvero della non coincidenza tra il centro di gravità del rotore ed il centro del meccanismo di sospensione (Titterton e Weston, 2004). La relazione che sussiste tra queste componenti di errore e l'accelerazione applicata può essere espressa in *gradi sessadecimali all'ora per unità di accelerazione* (*deg/hr/g*) e viene indicata con la notazione $b_{ga,\alpha}$, dove α è l'asse lungo il quale agisce l'accelerazione.

8.3.2.4 Contributi aleatori

Tutti i sensori inerziali sono caratterizzati, in maniera più o meno elevata, da una serie di disturbi di natura accidentale. All'inizio del capitolo è già stata introdotta la distinzione tra un errore di origine esterna al sistema di misura, detto *disturbo*, ed un errore di origine interna al sistema, detto *rumore*. Come detto, un disturbo è molto più simile ad un errore di tipo sistematico rispetto ad un rumore: anche se la sua natura è tale che non si ripeterà

uguale ad ogni misura, la presenza di tale fattore denuncia, comunque, una incompletezza nella modellazione del sistema.

Anche se rumori e disturbi possono avere natura molto diversa tra loro a seconda della tipologia del sensore impiegato (Titterton e Weston, 2004), all'interno della modellazione del segnale si parlerà sempre di *componente accidentale delle misure (random bias)*, e si indicherà con i vettori $\mathbf{v}_a = (v_{a,x}, v_{a,y}, v_{a,z})$ e $\mathbf{v}_g = (v_{g,x}, v_{g,y}, v_{g,z})$ rispettivamente per gli accelerometri e i giroscopi.

Lo spettro di potenza di tale componente accidentale può essere caratterizzato, per frequenze inferiori ad 1 Hz, come un *rumore bianco (white noise)* e, per definizione, la sua deviazione standard varierà in maniera inversamente proporzionale con la radice quadrata del tempo. Pertanto, la componente accidentale delle misure relativa agli accelerometri viene misurata in $\mu g/\sqrt{Hz}$, dove $1\mu g/\sqrt{Hz} = 9.80665 \cdot 10^{-5} m s^{-1.5}$, mentre per quanto riguarda i giroscopi si utilizzano $^\circ/\sqrt{hr}$ o anche $^\circ/hr/\sqrt{Hz}$ dove $1^\circ/\sqrt{hr} = 2.909 \cdot 10^{-4} rad s^{-0.5}$ e $1^\circ/hr/\sqrt{hr} = 4.848 \cdot 10^{-6} rad s^{-0.5}$.

Tabella 3 - Valori caratteristici di componente accidentale per alcune categorie di sensori inerziali

Categoria di applicazione	Accelerometri $\mu g/\sqrt{hr}$	Giroscopi $^\circ/\sqrt{hr}$
<i>Aviation grade</i>	0.03 – 0.1	0.01
<i>Tactical grade</i>	1 – 10	1 – 100
<i>Automotive grade</i>	> 10	> 100

La presenza di tali disturbi di natura accidentale influisce ovviamente sulle osservazioni inerziali; in particolare, si può valutare l'errore teorico provocato da un disturbo durante l'allineamento come (Titterton e Weston, 2004):

$$\delta\gamma = \frac{v_g}{\omega_E \cos\phi} \frac{1}{\sqrt{t_{all}}}$$

dove ω_E indica il vettore di velocità di rotazione terrestre, ϕ la latitudine del punto di acquisizione e t_{all} il tempo di allineamento.

Talvolta la componente accidentale delle misure viene descritta in termini di *random walk* (tradotto in italiano con il termine poco elegante di “passeggiata casuale”): con tale termine si indica l’errore nelle grandezze oggetto di stima causato dall’integrazione delle misure affette da un rumore bianco. La statistica di questo processo è stata studiata per molto tempo da scienziati famosi, tra cui Wiener ed Einstein. Quest’ultimo riuscì a dimostrare che la varianza del processo aumenta in modo proporzionale al tempo trascorso dall’inizio dell’osservazione.

8.3.3 Modellazione delle misure

Un passo concettuale importante nell’analisi delle misure consiste nell’interpretare i dati misurati come una realizzazione di un processo casuale: ciò permette di fare uso di strumenti di analisi molto potenti.

La grandezza misurata può essere considerata come una quantità variabile nel tempo, a causa delle fluttuazioni degli effetti sistematici, dei rumori e dei disturbi sovrapposti al misurando, sia all’origine dal suo ambiente fisico, sia dal sistema lungo il processo di misura (De Marchi e Lo Presti, 1993).

In particolare, si consideri la misura di una accelerazione effettuata da un accelerometro. Supponendo ad esempio che tale misura sia riferita all’asse z della terna cartesiana ($\ddot{x}_{a,z}$), questa può essere modellata con l’equazione:

$$\ddot{x}_{a,z} = b_{a,z} + s_{a,z}\ddot{x}_z + m_{a,zx}\ddot{x}_x + m_{a,zy}\ddot{x}_y + c_T(T - T_0) + v_{a,z}$$

dove:

- $\ddot{x}_{a,z}$ misura dell’accelerometro posto lungo l’asse z ;
- $\ddot{x}_x, \ddot{x}_y, \ddot{x}_z$ scomposizione dell’accelerazione $\ddot{x}$ lungo i tre assi reali (x, y, z);
- $b_{a,z}$ *bias* dell’accelerometro lungo z ;
- $s_{a,z}$ *fattore di scala* dell’accelerometro lungo l’asse z ;
- $m_{a,zx}$ *fattore di non-ortogonalità* lungo z rispetto all’asse x ;
- $m_{a,zy}$ *fattore di non-ortogonalità* lungo z rispetto all’asse y ;
- c_T *fattore di correzione termica*;
- T temperatura durante la prova;
- T_0 temperatura dell’ultima calibrazione (cui sono riferiti i *bias*);
- $v_{a,z}$ *rumore* lungo l’asse z .

Allo stesso modo, è possibile modellare anche la misura di una velocità angolare $\dot{\omega}$ effettuata ad esempio dal giroscopio posto sempre lungo l'asse z come:

$$\dot{\omega}_{g,z} = b_{g,z} + s_{g,z}\dot{\omega}_z + m_{g,zx}\dot{\omega}_x + m_{g,zy}\dot{\omega}_y + b_{ga,x}\ddot{x} + b_{ga,y}\ddot{y} + b_{ga,z}\ddot{z} + c_T(T - T_0) + v_{g,z}$$

dove, oltre ai parametri già visti nel caso precedente:

- $\dot{\omega}_{a,z}$ misura della velocità angolare del giroscopio posto lungo l'asse z ;
- $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$ scomposizione della velocità angolare $\dot{\omega}$ lungo i tre assi reali (x, y, z);
- $b_{g,z}$ bias del giroscopio lungo z ;
- $s_{g,z}$ fattore di scala del giroscopio lungo l'asse z ;
- $m_{g,zx}$ fattore di non-ortogonalità lungo z rispetto all'asse x ;
- $m_{g,zy}$ fattore di non-ortogonalità lungo z rispetto all'asse y ;
- $b_{ga,x}, b_{ga,y}, b_{ga,z}$ bias dipendente dall'accelerazione lungo i tre assi
- $v_{g,z}$ rumore lungo l'asse z .

I modelli seguenti possono essere generalizzati in maniera da includere tutte le osservazioni della terna di sensori, mediante la seguente forma matriciale (Ferraris et al., 1995):

$$\ddot{x}_a = b_a + S_a M_a \ddot{x} + v_a$$

$$\dot{\omega}_g = b_g + S_g M_g \dot{\omega} + d_{ga} + v_g$$

dove b_a e b_g sono i vettori dei bias rispettivamente degli accelerometri e dei giroscopi già descritti in precedenza, mentre:

- S_a, S_b matrici contenenti i fattori di scala degli accelerometri e dei giroscopi, nella forma:

$$S_a = \begin{bmatrix} s_{a,x} & 0 & 0 \\ 0 & s_{a,y} & 0 \\ 0 & 0 & s_{a,z} \end{bmatrix}, S_b = \begin{bmatrix} s_{g,x} & 0 & 0 \\ 0 & s_{g,y} & 0 \\ 0 & 0 & s_{g,z} \end{bmatrix};$$

- M_a, M_g matrici contenenti i fattori di non-ortogonalità degli assi ottenuti per proiezione di un versore unitario sul body-frame (cfr. Figura 6):

$$M_a = \begin{bmatrix} r_{a,xx} & r_{a,xy} & r_{a,xz} \\ r_{a,xy} & r_{a,yy} & r_{a,yz} \\ r_{a,xz} & r_{a,zy} & r_{a,zz} \end{bmatrix}, M_g = \begin{bmatrix} r_{g,xx} & r_{g,xy} & r_{g,xz} \\ r_{g,xy} & r_{g,yy} & r_{g,yz} \\ r_{g,xz} & r_{g,zy} & r_{g,zz} \end{bmatrix};$$

- d_{ga} vettore contenente gli effetti delle accelerazioni sui giroscopi, ottenuto dal prodotto tra:

$$d_{ga} = b_{ga} \ddot{x}$$

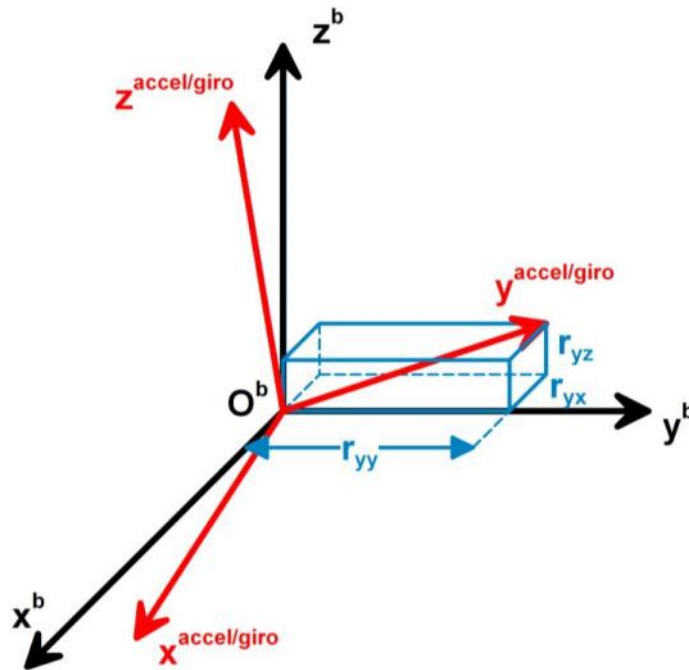


Figura 17 - Decomposizione del vettore $y^{\text{accel/giro}}$ sul body frame.

8.4 Background teorico

8.4.1 Allineamento degli assi sensore

Per combinare correttamente i dati acquisiti da diversi sensori, il loro orientamento spaziale deve essere riferito a un quadro di riferimento comune. Per trasformare un vettore da un sistema di coordinate a un altro si possono utilizzare diversi approcci (coseni di direzione, angoli di rotazione di Eulero o quaternioni). Tutte le rotazioni comportano una matrice di trasformazione o matrice del coseno di direzione (DCM), solitamente indicata come C_{bi}^{br} , dove bi è il riferimento di partenza del quadro corporeo dell' i -esimo sensore, mentre br è il quadro corporeo di destinazione.

Le matrici di trasformazione sono definite da una sequenza di tre rotazioni che comprendono gli angoli di Eulero ϕ (rollio), θ (beccheggio), ψ (direzione) [12]. Gli angoli di Eulero sono tre angoli introdotti da Eulero per descrivere l'orientamento di un corpo rigido. In effetti, l'orientamento relativo tra due qualsiasi fotogrammi cartesiani può essere descritto dagli

angoli di Eulero. Il vantaggio degli angoli di Eulero consiste nel fatto che ci permettono di capire facilmente l'orientamento di un corpo rispetto a un certo sistema di riferimento. Tuttavia, lo svantaggio principale è la loro propensione alla singolarità. Pertanto, il modo più efficace per parametrizzare la matrice di trasformazione è quello di utilizzare il metodo dei quaternioni [13].

La rappresentazione a quaternioni si basa sul teorema di rotazione di Eulero, secondo il quale l'orientamento relativo di due sistemi di coordinate può essere descritto da una sola rotazione attorno a un asse fisso [14]. Pertanto, il quaternione è definito da un asse di rotazione e da un angolo di rotazione [14].

La funzione di perdita può essere riscritta in termini di quaternioni utilizzando un algoritmo basato sul metodo di Wahba [14]:

$$J'(q) = q^T K q \quad (1)$$

dove la matrice K è definita come segue:

$$K = \begin{pmatrix} S - 1\sigma & Z \\ Z^T & \sigma \end{pmatrix} \quad (2)$$

La matrice S, lo scalare σ e il vettore Z sono dati da:

$$B = W V^T \quad (3)$$

$$S = B^T + B \quad (4)$$

$$Z = (B_{23} - B_{32}, B_{31} - B_{13}, B_{12} - B_{21})^T \quad (5)$$

$$\sigma = \text{tr}(B) \quad (6)$$

W e V sono matrici aventi come voci le componenti normalizzate dei vettori dei fotogrammi rispettivamente nel sistema di coordinate del corpo e in quello di riferimento:

$$W_i = \sqrt{w_i} \hat{u}_B^i; \quad V_i = \sqrt{w_i} \hat{u}_R^i \quad (7)$$

Il risultato è un problema di autovalori; in particolare, si può dimostrare [14] che il quaternione associato alla rotazione ottimale è un autovalore della matrice K. Pertanto, la funzione di

perdita nell'equazione (7) è massima se si sceglie l'autovettore corrispondente all'autovalore più grande [14]. Infine, la formula descritta in [14] è stata utilizzata per ottenere la corrispondente matrice di trasformazione ottimale.

8.4.2 Varianza di Allan

Uno dei principali metodi per definire le performance dei sensori inerziale è descritto nello Standard 647-2006 IEEE [15] il quale si basa sulla varianza di Allan. In particolare, La varianza di Allan è stata proposta per la prima volta per superare i problemi associati alla valutazione della deviazione standard su una sequenza crescente di dati acquisiti. Sebbene sia stata originariamente utilizzata per applicazioni sulla frequenza degli oscillatori, la varianza di Allan può essere sfruttata per evidenziare e discriminare i termini di rumore aggiunti al segnale di interesse anche nei sensori inerziali [15]. La varianza di Allan funziona con successo nelle ipotesi che (i) il segnale considerato rimanga costante e piatto durante le misure e (ii) la media del rumore sia pari a zero per le acquisizioni a lungo termine. Da un punto di vista operativo, la varianza di Allan per uno specifico tempo di cluster τ è definita come la metà della media temporale dei quadrati delle differenze tra le uscite del sensore separate da τ .

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (s(t - \tau) - s(t))^2 \rangle \quad (8)$$

Quando si considerano i sensori inerziali, l'andamento in funzione di τ della deviazione di Allan, definita come radice quadrata positiva della varianza di Allan, consente di stimare le principali sorgenti di rumore se si sfrutta una scala log-log. In particolare, Bias Instability BI e Random Walk RW, ovvero i valori dei parametri necessari per impostare le voci della matrice di covarianza del rumore, possono essere stimati dalle porzioni di curva caratterizzate da valori di pendenza pari, rispettivamente, a zero e -1/2 secondo:

$$\sigma^2(\tau) = \frac{2BI^2 \ln 2}{\pi} \quad (9)$$

$$\sigma^2(\tau) = \frac{RW^2}{\tau} \quad (10)$$

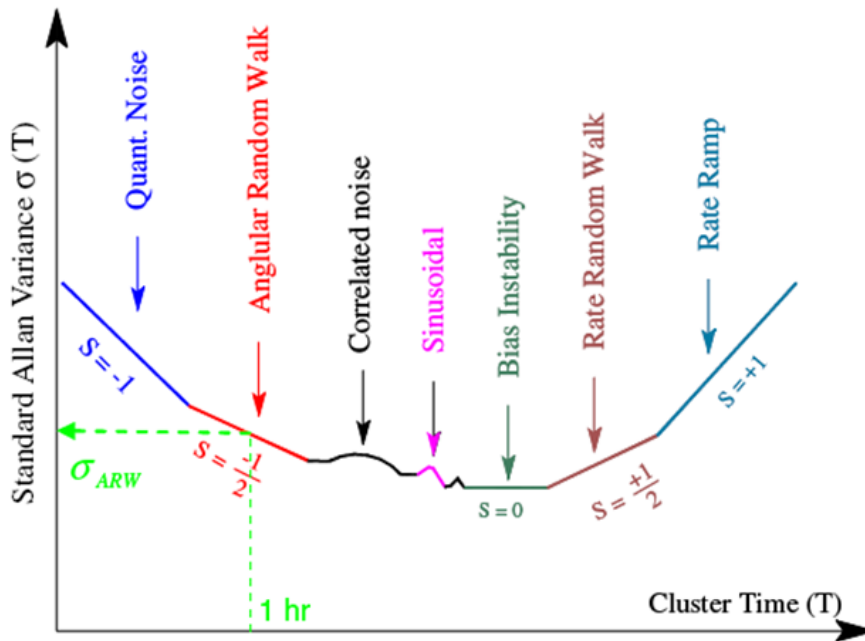


Figura 18 - Deviazione di Allan: parametri caratteristici [15].

8.5 Metodo proposto

Per superare le suddette limitazioni, si propone di sfruttare una configurazione ridondante di sensori inerziali MEMS a basso costo insieme a un'adeguata strategia di elaborazione digitale del segnale per ottenere una stima accurata dei parametri di interesse. Per maggiore chiarezza, la Figura illustra le fasi operative del metodo proposto. I blocchi blu rappresentano le fasi della procedura adottata, mentre quelli arancioni i dati ottenuti; i moduli hardware sono indicati da un blocco rosso, mentre il blocco verde rappresenta l'output del sistema. Le

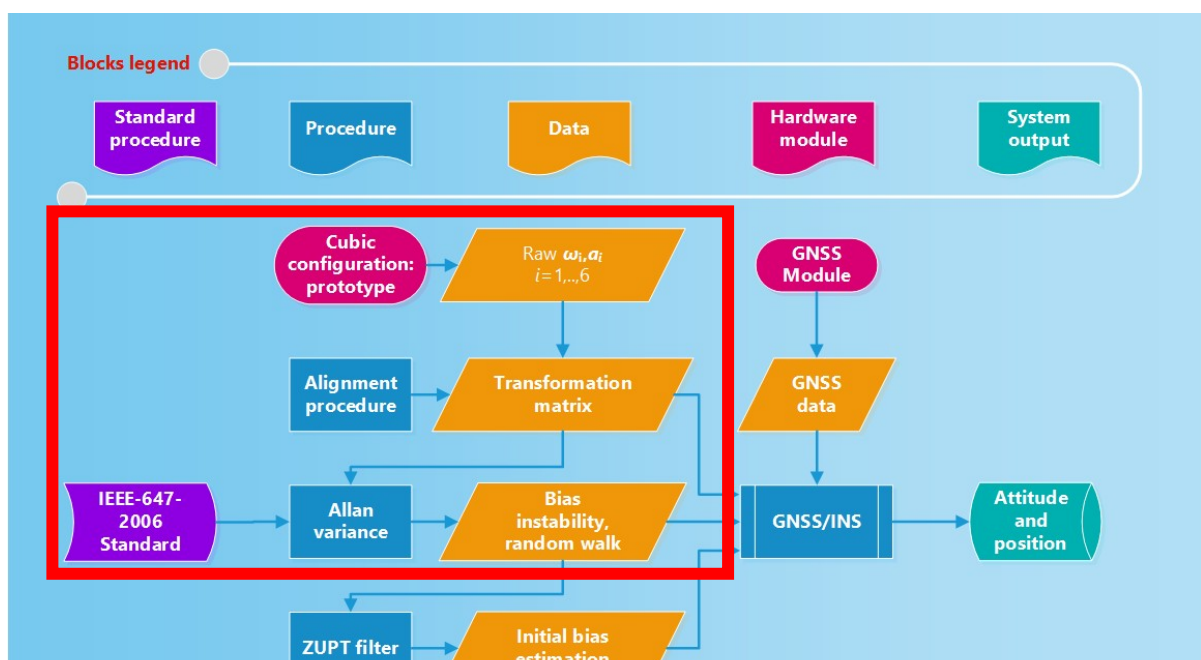


Figura 19 – Flowchart del sistema di misura.

operazioni offline (procedura di allineamento e stima della varianza di Allan) vengono eseguite una volta quando l'IMU ridondante viene assemblata, mentre l'elaborazione in linea viene eseguita in tempo reale per stimare i parametri di interesse. Per il particolare caso di studio, sono state quindi realizzate le procedure di allineamento e la stima dei parametri di rumore mediante la varianza di Allan le quali sono evidenziate in rosso.

8.5.1 Procedura di allineamento

Secondo quanto riportato in [16], i poliedri regolari possono essere generati solo fino a venti facce (icosaedro), in termini di soluzioni fattibili. Tra tutte quelle citate, gli autori hanno scelto quella cubica per la sua configurazione semplice da realizzare come prototipo e, soprattutto, per la condizione favorevole di avere un valore teorico di β_{imp} pari a 0,41 in presenza di parallelismo ideale tra gli stessi assi di rilevamento di ciascun sensore.

In questo modo, le misure associate al body frame di ciascun sensore inerziale devono essere riportate in un unico quadro di riferimento. È stata quindi implementata un'opportuna procedura di allineamento, basata sul metodo Wahba [17], per ottenere le matrici di rotazione in grado di allineare gli assi di rilevamento degli accelerometri e dei giroscopi di ciascun sensore a quelli del quadro di riferimento comune, scelto arbitrariamente come sensori installati sulla faccia 1 del cubo. È opportuno sottolineare che la procedura considerata è in grado di allineare gli assi di rilevamento di ciascun sensore inerziale a quelli corrispondenti del quadro di riferimento. In questo modo, gli eventuali disallineamenti presenti nel quadro di riferimento e dovuti alla non perpendicolarità degli assi sensibili dei sensori e alla non perpendicolarità degli assi sensibili dei sensori rispetto al circuito stampato (PCB) rimangono ancora e sono, in parte, condivisi dagli assi riallineati con la procedura.

La procedura di allineamento deve essere eseguita una volta alla realizzazione di IMU ridondanti o quando l'orientamento dei sensori relativi deve cambiare a causa di modifiche accidentali.

La procedura consiste nei seguenti passaggi:

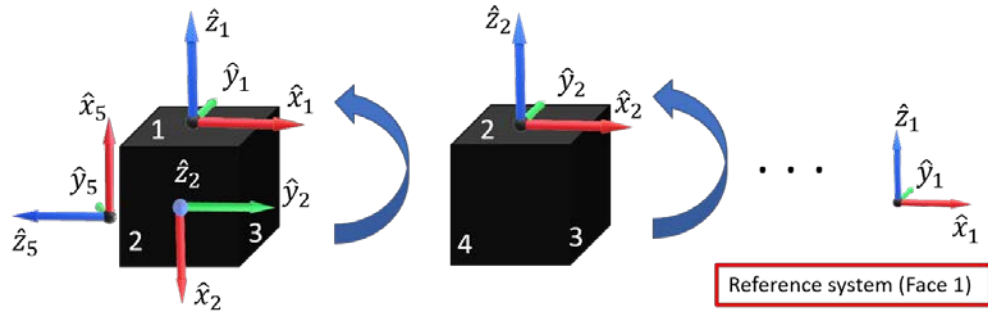


Figura 20 – Procedura di allineamento.

- Il body frame dei sensori inerziali installati sulla faccia 1 del cubo viene scelto (arbitrariamente) come frame di riferimento su cui vengono risolti gli assi di rilevamento degli altri sensori (Figura 3).
- Al cubo vengono applicate sei rotazioni in modo tale che ogni faccia del cubo sia posizionata con un orientamento coincidente con quello originale della faccia 1. Ad esempio, nel secondo passo della Figura 3, viene riportata la seconda rotazione (associata alla faccia 2);
- Per ogni rotazione i (variabile da 1 a 6), vengono acquisiti da ogni sensore j (variabile da 1 a 6) i dati grezzi di accelerazione $\mathbf{A}_{ijk} = (ax_{ijk}, ay_{ijk}, az_{ijk})$; l'indice k è associato ai campioni acquisiti (variabile da 1 a N , essendo N il numero di misure effettuate in ogni rotazione);
- Il vettore accelerazione medio associato alla rotazione i -esima viene calcolato per ogni sensore e i risultati vengono normalizzati secondo la formula:

$$\hat{\mathbf{A}}_{ij} = \frac{\text{mean}(\mathbf{A}_{ijk})}{\text{norm}(\text{mean}(\mathbf{A}_{ijk}))} \quad (11)$$

dove $\text{mean}(-)$ indica la media operante su ciascun asse e $\text{norm}(-)$ rappresenta il tradizionale operatore di norma per i vettori;

- La matrice di riferimento $\mathbf{V}$ è organizzata per componenti di accelerazione associate alla faccia 1; in particolare, le voci della i -esima riga della matrice $\mathbf{V}$ sono uguali alle componenti dell'accelerazione normalizzata della rotazione i :

$$V = [\hat{A}_{11}; \hat{A}_{21}; \dots; \hat{A}_{61}] \quad (22)$$

- Per quanto riguarda le matrici W_j , le loro voci possono essere determinate in modo analogo

$$W_j = [\hat{A}_{1j}; \hat{A}_{2j}; \dots; \hat{A}_{6j}] \quad (13)$$

- Secondo la procedura presentata, viene eseguito un algoritmo MATLAB® per valutare le matrici di allineamento. In particolare, una volta calcolata la matrice K_j per ogni faccia, la rotazione ottimale (cioè quella in grado di rendere il quadro di riferimento j -esimo il più vicino possibile al primo) viene determinata come un quaternionione (autovettore) corrispondente al massimo autovalore dell'equazione.
- Infine, il quaternionione ottimale viene trasformato nella relativa matrice di rotazione mediante un semplice calcolo; le matrici ottenute sono sfruttate per allineare tutte le grandezze inerziali misurate al quadro di riferimento della faccia 1.

Una volta risolte le misure in un unico riferimento e compensati i disallineamenti dovuti alla disposizione della struttura cubica, le misure grezze riallineate di accelerazione e velocità angolare vengono mediate per ciascun asse di rilevamento al fine di ottenere i dati di ingresso per il successivo algoritmo di navigazione; come detto, l'operazione di mediazione consente una prima riduzione degli effetti delle fonti di errore sulle prestazioni di navigazione.

8.5.2 Valutazione dei parametri di rumore

I bias che influenzano l'uscita dei sensori inerziali sono compensati per mezzo di filtri di Kalman. Una questione fondamentale è la determinazione delle voci della cosiddetta matrice di covarianza del rumore di processo, solitamente indicata come Q . Senza perdita di generalità, Q può essere determinata come una matrice diagonale le cui voci sono la varianza associata all'instabilità dei bias e al random walk degli accelerometri o dei giroscopi. Valori adeguati della matrice Q favoriscono una corretta convergenza del filtro di Kalman, consentendo così di stimare accuratamente i parametri di navigazione. L'approccio della deviazione di Allan è stato sfruttato per stabilire i valori desiderati.

A tal fine, le misure delle accelerazioni e delle velocità angolari fornite dalla configurazione ridondante sono state acquisite su un intervallo di osservazione di 72h con un periodo di

campionamento t_c pari a 8 ms; in questo modo, è stato acquisito un numero intero di campioni M pari a 32,4 MSamples per ogni asse di rilevamento. La varianza di Allan viene valutata per uno specifico tempo di cluster $\tau = m t_c$ a partire dai dati grezzi digitalizzati secondo la seguente formula:

$$\sigma^2(m t_c) = \frac{1}{2(m t_c)^2 (M - 2m)} \sum_{k=1}^{M-2m} (S_{k+2m} - 2S_{k+m} + S_k)^2 \quad (14)$$

dove S_k sta per il k -esimo campione della sequenza di angoli o velocità ottenuta come somma cumulativa dei dati di velocità angolare e accelerazione, rispettivamente.

In base alle equazioni precedenti, i valori necessari dell'instabilità da bias e del random walk possono essere valutati individuando le porzioni di curva caratterizzate da una pendenza pari a 0 e a -0,5.

8.6 Prototipo ridondante

Il primo prototipo di configurazione ridondante è stato progettato in modo da poter essere sfruttato come sistema di acquisizione dati; in particolare, i dati grezzi acquisiti da ciascun sensore inerziale vengono trasmessi a un Personal Computer (PC) esterno che esegue l'algoritmo di navigazione.

8.6.1 Reference IMU

Per apprezzare meglio le prestazioni ottenute, è stato adottato come parametro di riferimento un sensore inerziale di tipo tattico. In particolare, è stato utilizzato un sensore MEMS, STIM300 di SensoNor™, che comprende un giroscopio triassiale e un accelerometro triassiale ad alte prestazioni. Secondo quanto descritto nel datasheet, i sensori assicurano instabilità di bias e random walk angolare pari, rispettivamente, a 0,3 °/h e 0,15 °/√(h) per le misure di velocità angolare; per quanto riguarda le accelerazioni, i valori di bias instability e di velocità random walk sono pari a 0,5 mm/s² e 0,07 m/s/√(h). Vale la pena notare che le misure inerziali fornite dallo STIM300 sono già compensate da una routine di elaborazione interna; tuttavia, le uscite dello STIM300 sono elaborate mediante l'algoritmo di integrazione basato sul filtro di Kalman.

8.6.2 Architettura hardware

Le prestazioni del metodo sono state valutate mediante un prototipo di IMU ridondante basato su sensori inerziali a basso costo. L'unità di misura inerziale ridondante è stata realizzata assemblando sei sensori inerziali MEMS a basso costo su un supporto cubico. Ogni coppia di sensori inerziali è montata su un'apposita scheda di sviluppo, SensorTile™ della STMicroelectronics. Il SensorTile™ integra su un'unica scheda un microcontrollore basato su Cortex-M4, caratterizzato da una frequenza operativa di 80 MHz, e un'adeguata serie di sensori di movimento e ambientali. In particolare, la scheda è dotata di un modulo inerziale MEMS (iNemo) che comprende un accelerometro triassiale e un giroscopio triassiale, le cui principali specifiche nominali sono riportate nel datasheet. Il microcontrollore è collegato via cavo con l'iNemo attraverso un protocollo SPI (Serial Peripheral Interface) tradizionale, operando come master con una velocità di clock seriale pari a 10 MHz. I sei SensorTiles sono stati montati in configurazione ridondante sulle facce di un cubo stampato in 3D in Acrilnitrile Butadiene Stirene (solitamente indicato con il suo acronimo, ABS); in particolare, è stato creato un modello CAD (Computer Aided Design) ad hoc per ridurre gli effetti di contrazione e ottenere il minimo errore di ortogonalità tra facce adiacenti.

Le accelerazioni e le velocità angolari misurate da ciascun SensorTile™ sono trasmesse a un ulteriore microcontrollore installato su una scheda di sviluppo Nucleo-F303K8 che funge da concentratore dei dati acquisiti. Inoltre, il collegamento tra il concentratore e i SensorTile avviene tramite il protocollo SPI; in questo caso, il concentratore funge da master del collegamento, mentre il periodo di clock seriale è stato impostato a 100 ns. Infine, il concentratore fornisce una connessione Universal Serial Bus (USB) con un personal computer per la trasmissione e l'elaborazione di dati esterni e un ulteriore canale SPI verso un modulo adattatore per schede Micro-SD (Secure Digital) per il salvataggio dei dati; a questo scopo, è stato adottato un opportuno level shifter per far corrispondere il valore della tensione di comunicazione tra il concentratore e il modulo adattatore.

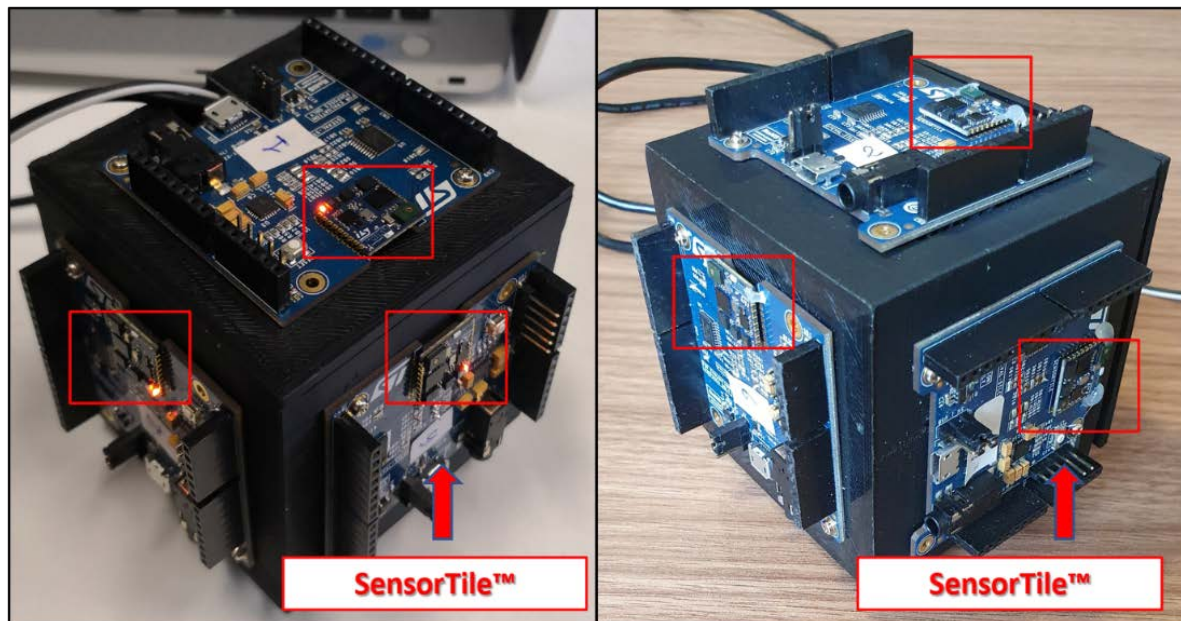


Figura 21 – Prototipo di piattaforma ridondante basata su sensori MEMS.

8.6.3 Architettura software

Per quanto riguarda l'architettura software, il firmware dei SensorTiles, del modulo GNSS e del concentratore è stato implementato tramite Mbed RTOS; in particolare, è stato adottato l'ambiente di sviluppo integrato MbedCLI per consentire il debug durante la fase di implementazione.

Per rendere il prototipo compatibile con le applicazioni e i vincoli aeronautici, il sensore inerziale di ogni tile deve essere campionato a una frequenza non inferiore a 100 Hz. D'altra parte, iNemo può acquisire accelerazione e velocità angolare con un periodo di campionamento minimo pari a 150 μ s (ad esempio, per la stabilizzazione elettronica dell'immagine in applicazioni per telefoni cellulari o fotocamere). È necessario trovare un giusto compromesso tra la navigazione e l'onere computazionale associato all'esecuzione dell'algoritmo che implementa il metodo proposto; è stato quindi scelto un periodo di campionamento pari a 8 ms.

Per quanto riguarda le operazioni di misura, il concentratore sfrutta le linee di sezione dei canali del protocollo SPI per fornire contemporaneamente a SensorTile un evento di trigger per la misura dell'accelerazione triassiale e della velocità angolare triassiale. Vale la pena notare che nelle Tile è stato implementato un firmware SPI ad hoc per ridurre il più possibile il tempo di comunicazione normalmente impiegato dai driver disponibili. Inoltre, i registri di configurazione dell'iNemo sono impostati in modo da aggiornare le misure inerziali con una

frequenza di campionamento di 416 Hz, assicurando così nuovi valori di accelerazioni e velocità angolari per ogni richiesta di misura. Infine, sono stati scelti valori di fondo scala di ± 2 g e ± 125 dps per ottenere la migliore sensibilità.

Il concentratore interroga quindi ogni SensorTileTM individualmente per ottenere i valori misurati, già ruotati per essere allineati con un quadro di riferimento. Per ridurre l'intervallo di trasmissione, per ogni grandezza di interesse viene trasmesso il codice di uscita, espresso attraverso due byte di rappresentazione intera firmata e fornito dal convertitore analogico-digitale a 16 bit integrato nell'iNemo; in questo modo, l'intero set di sei misurandi inerziali (tre accelerazioni e tre velocità angolari) richiede solo 12 byte per essere trasmesso, con un intervallo di tempo nominale pari a 10 ms per ogni SensorTileTM. I dati ricevuti vengono poi inoltrati alla Micro SD-card per la memorizzazione e al personal computer per l'elaborazione.

8.6.4 Caratterizzazione del prototipo

Secondo quanto riportato nella sezione precedente, una volta realizzata l'IMU ridondante è necessario eseguire due operazioni. La prima prevede l'allineamento degli assi di rilevamento di ciascun sensore allo stesso quadro di riferimento per superare opportunamente l'orientamento relativo e il disallineamento dovuto all'assemblaggio del prototipo. Le matrici di rotazione ottenute sono salvate su ciascun SensorTileTM che valuta le componenti della accelerazione e della velocità angolare misurate nel quadro di riferimento.

Il disallineamento residuo dopo la procedura di riallineamento è stato valutato valutando l'angolo tra i vettori di gravità medi misurati dai fotogrammi di riferimento e quelli riallineati. In particolare, l'angolo α_{ij} è definito come:

$$\alpha_{ij} = \text{mean} \left(\cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{g}_{ij} \cdot \mathbf{g}_{i1}}{\|\mathbf{g}_{ij}\| \|\mathbf{g}_{i1}\|} \right) \right) \quad (21)$$

Dove:

- $\mathbf{g}_{ij}$ indica il vettore gravità misurato dall'accelerometro triassiale montato sulla j-esima faccia del cubo, allineato alla faccia 1 dopo la i-esima rotazione;
- $\mathbf{g}_{i1}$ indica il vettore gravità misurato dall'accelerometro triassiale montato sulla prima faccia (di riferimento) del cubo dopo la rotazione i-esima;
- $\|\cdot\|$ rappresenta il tradizionale operatore di modulo vettoriale.

Le prestazioni dell'allineamento vengono infine valutate come media e deviazione standard sperimentale dei 6 angoli residui per ciascuna faccia dell'IMU ridondante; i risultati corrispondenti sono riportati nella Tabella.

Tabella 4 – Accuracy della procedura di allineamento

[°]	Face 2	Face 3	Face 4	Face 5	Face 6
Mean Value	0.68	0.84	0.72	0.69	0.32
STD	0.18	0.16	0.31	0.28	0.13

Per stimare correttamente le bias instability e le passeggiate casuali del prototipo, le uscite grezze dei sei sensori inerziali sono state acquisite per 48 ore in una stanza condizionata; la temperatura misurata è sempre stata compresa tra 25 ± 1 °C per operare il più vicino possibile alle condizioni richieste dalla norma IEEE 647-2006 [15]. I risultati della varianza Allan associata al prototipo ridondante sono mostrati nelle Figure, rispettivamente per l'accelerometro e il giroscopio. La procedura descritta precedentemente è stata quindi applicata per ottenere le bias instability (BI) e i cammini casuali angolari/velocità (ARW e VRW), i cui risultati sono riportati nelle Tabelle successive per ciascun asse del sensore.

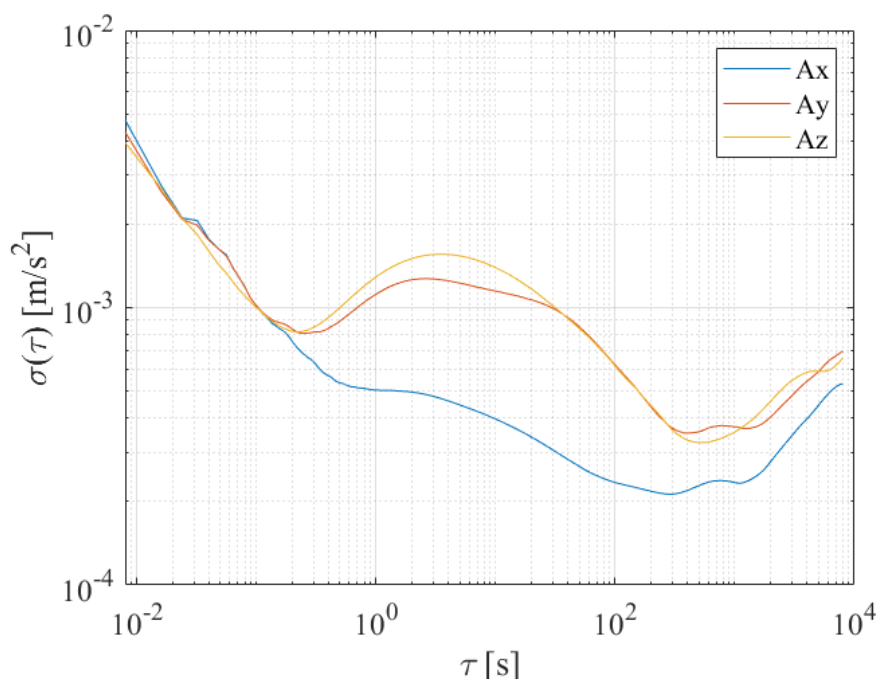


Figura 22 – Deviazione di Allan per gli accelerometri (lungo i tre assi).

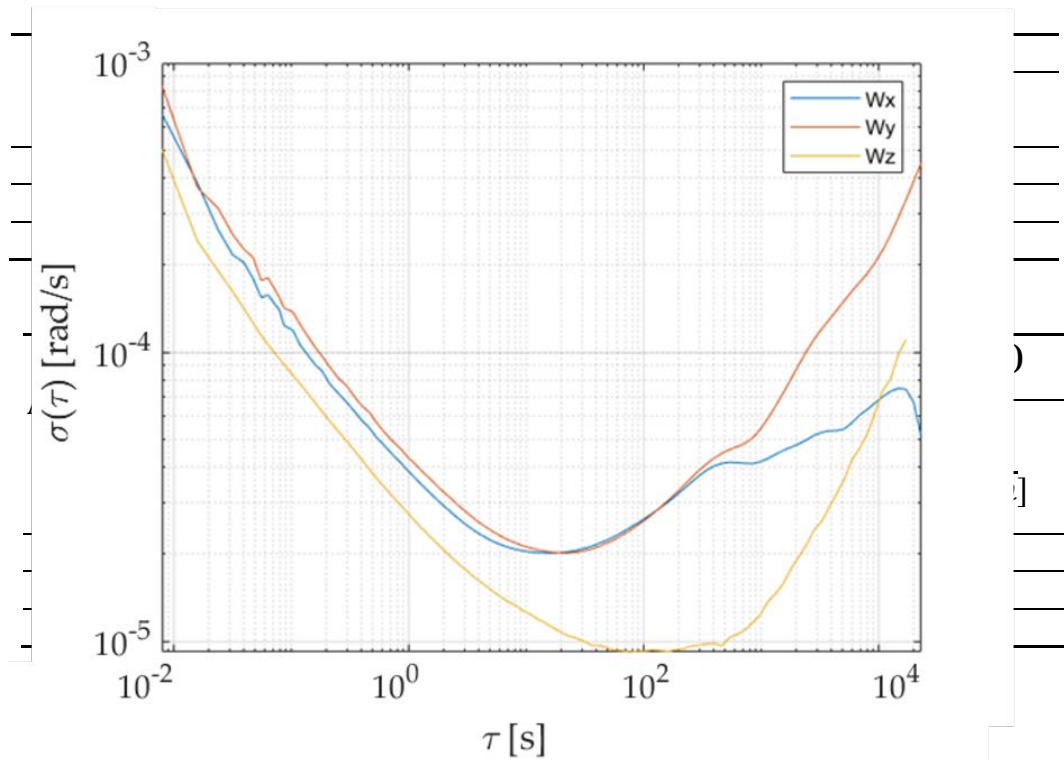


Figura 23 - Deviazione di Allan per i giroscopi (lungo i tre assi).

Tabella 5 – Parametri di rumore valutati mediante la varianza di Allan per i giroscopi.

Tabella 6 - Parametri di rumore valutati mediante la varianza di Allan per gli accelerometri.

Per meglio apprezzare i vantaggi apportati dalla configurazione ridondante, sono state stimate le varianze Allan di ogni singolo sensore e prototipo. Per chiarezza e semplicità, sono stati riportati i risultati associati a un solo asse di rilevamento sia per l'accelerometro che per il giroscopio e sono state mostrate le figure 9 e 10; risultati ed evoluzioni simili sono stati sperimentati anche per gli altri assi. Inoltre, le tabelle 2 e 3 riportano i migliori valori di bias instabilities di random walk sperimentati su ciascun asse di rilevamento, sia per l'accelerazione

sia per la velocità angolare; il miglioramento delle prestazioni è evidente. I vantaggi ottenuti possono essere evidenziati anche confrontando i parametri del prototipo con il campo di variazione stimato del singolo sensore per ogni asse e quantità, riportato nella Tabella 4.

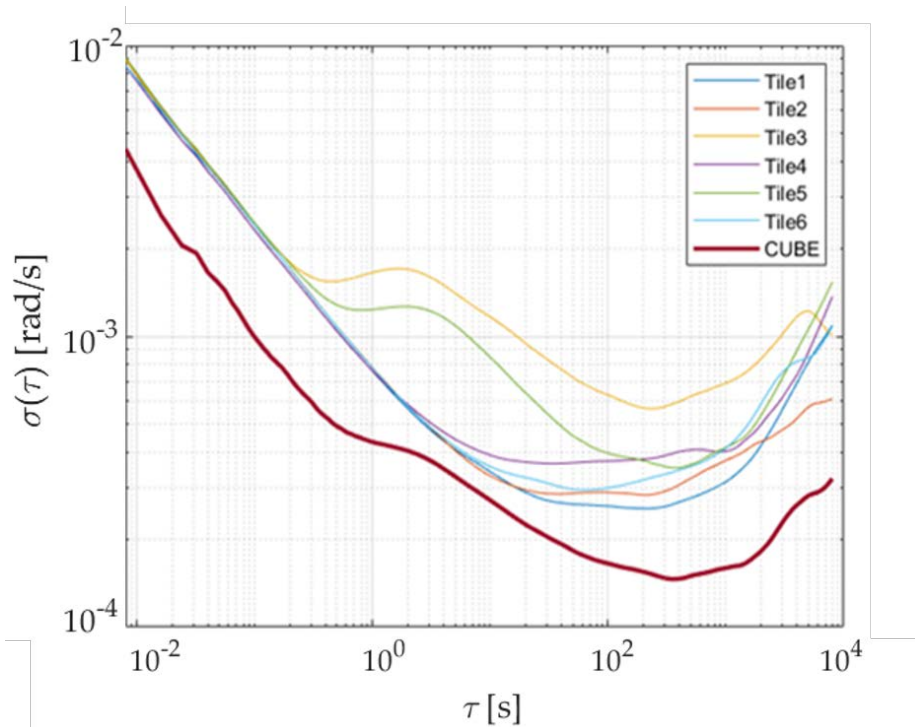


Figura 24 – Confronto dei parametri di rumore dell'accelerometro del prototipo con un singolo sensore (lungo un solo asse).

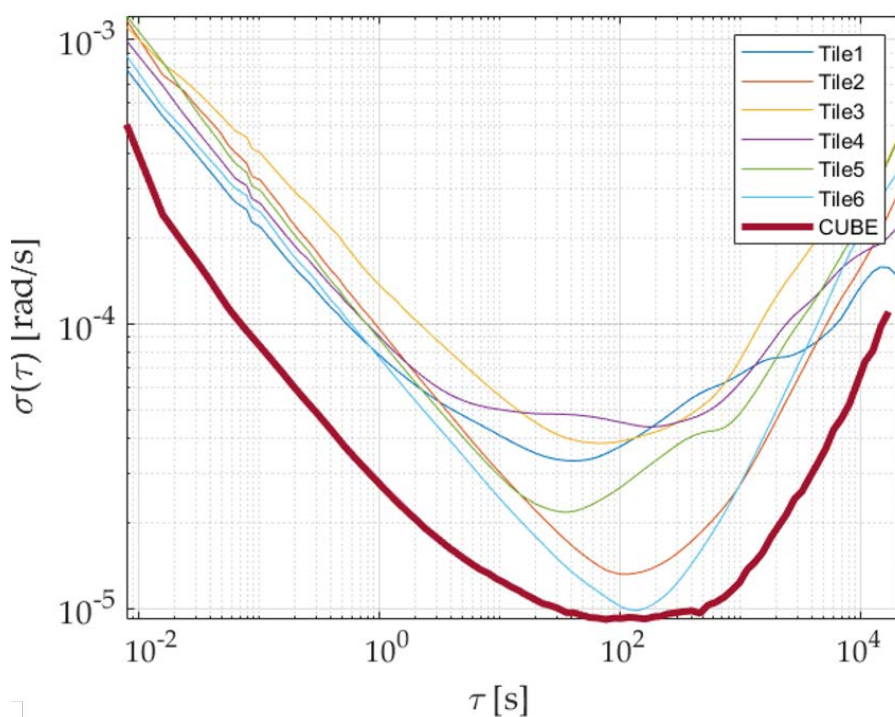


Figura 25 - Confronto dei parametri di rumore del giroscopio del prototipo con un singolo sensore (lungo un solo asse).

Tabella 7 - Intervallo di variazione, per ogni asse di rilevamento, degli errori dell'accelerometro e del giroscopio che interessano i sensori inerziali coinvolti nel prototipo realizzato

Range Values [min-max]	Gyroscopes		Accelerometers	
	BI	ARW	BI	VRW
	[°/h]	[°/√h]	[mg]	[m/s/√h]
X-Axis	5.7–73	0.21–0.25	0.05–0.08	0.04–0.07
Y-Axis	5.1–25	0.21–0.37	0.05–0.09	0.05–0.07
Z-Axis	3–15	0.24–0.36	0.05–0.1	0.04–0.08

8.7 Riferimenti

- [1] L. Sun, Z. Shang, Y. Xia, S. Bhowmick, and S. Nagarajaiah, “Review of bridge structural health monitoring aided by big data and artificial intelligence: From condition assessment to damage detection,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 146, no. 5, p. 4020073, 2020.
- [2] J. Seo, J. W. Hu, and J. Lee, “Summary review of structural health monitoring applications for highway bridges,” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 30, no. 4, p. 4015072, 2016.
- [3] E. Reynders, “System identification methods for (operational) modal analysis: review and comparison,” *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 51–124, 2012.
- [4] R. R. Ribeiro and R. de M. Lameiras, “Evaluation of low-cost MEMS accelerometers for SHM: frequency and damping identification of civil structures,” *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 16, 2019.
- [5] C. Bedon, E. Bergamo, M. Izzi, and S. Noè, “Prototyping and validation of MEMS accelerometers for structural health monitoring—The case study of the Pietratagliata cable-stayed bridge,” *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 7, no. 3, p. 30, 2018.
- [6] Gw. Housner *et al.*, “Structural control: past, present, and future,” *Journal of engineering mechanics*, vol. 123, no. 9, pp. 897–971, 1997.
- [7] A. E. Aktan *et al.*, “Condition assessment for bridge management,” *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 108–117, 1996.
- [8] C. R. Farrar and K. Worden, “An introduction to structural health monitoring,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, no. 1851, pp. 303–315, 2007.
- [9] P. Rizzo and A. Enshaeian, “Challenges in bridge health monitoring: A review,” *Sensors*, vol. 21, no. 13, p. 4336, 2021.
- [10] P. J. Vardanega, G. T. Webb, P. R. A. Fidler, F. Huseynov, K. Kariyawasam, and C. R. Middleton, “Bridge monitoring,” in *Innovative bridge design handbook*, Elsevier, 2022, pp. 893–932.
- [11] Fontanella, R.; de Alteriis, G.; Accardo, D.; Moriello, R.S.L.; Angrisani, L. Advanced low-cost integrated inertial systems with multiple consumer grade sensors. In Proceedings of the AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference, London, UK, 23–27 September 2018; Volume 2018, doi:10.1109/DASC.2018.8569846.
- [12] Cai, G.; Chen, B.M.; Lee, T.H. *Unmanned Rotorcraft Systems*; Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011.

- [13]Groves, P.D. Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems. *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* **2015**, 30, 26–27, doi:10.1109/maes.2014.14110.
- [14]Wertz, J.R. *Spacecraft Attitude Determination and Control*; Astrophysics and Space Science Library; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2002.
- [15]IEEE. Aerospace and Electronic Systems Society (institution). In *Proceedings of the IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Laser Gyros*; IEEE Std 647-2006; IEEE standard association Piscataway, USA, 2006.
- [16]Cheng, J.; Dong, J.; Landry, R.J.; Chen, D. A Novel Optimal Configuration form Redundant MEMS Inertial Sensors Based on the Orthogonal Rotation Method. *Sensors* **2014**, 14, 13661–13678, doi:10.3390/s140813661.
- [17]Wahba, G. A Least Squares Estimate of Satellite Attitude. *SIAM Rev.* **1965**, doi:10.1137/1007077.

9 Reference design di un sistema di raccolta dati - ATTIVITÀ

A.1.3

9.1 Descrizione attività

La sicurezza delle strutture e delle infrastrutture è un aspetto altamente rilevante per lo sviluppo delle smart city. La possibilità di estendere il controllo attraverso innovativi sistemi di monitoraggio a basso costo e ampio raggio su un gran numero di strutture permette di elevare il livello di sicurezza. I principali aspetti sono: (i) la sicurezza delle costruzioni esistenti, considerando che il patrimonio edilizio è costituito prevalentemente da edifici che hanno superato la vita utile per i quali erano stati progettati; (ii) la sicurezza degli edifici nel caso di eventi eccezionali, come terremoti, frane, esplosioni, incendi; (iii) la sicurezza delle infrastrutture come ponti e gallerie, con particolare riguardo alle reti metropolitane in ambiente urbano; (iv) la sicurezza delle strutture provvisorie, come quelle utilizzate nei casi di grandi eventi sportivi o di aggregazione e (v) la sicurezza degli edifici industriali. La possibilità di monitorare queste strutture e infrastrutture, attraverso sistemi in grado di rispondere in tempo reale, consente un controllo omogeneo dell'ambiente urbano. Nell'ambito delle attività: l'Unità di Ricerca ha focalizzato l'attenzione alla realizzazione di una piattaforma basata su Internet of Things (IoT) per il monitoraggio di grandi strutture come ponti e gallerie (Fig.1); la memoria presenta la soluzione proposta ed i primi risultati della caratterizzazione. La piattaforma è costituita da una serie di nodi sensori, costituiti da una configurazione ridondante di sensori inerziali commercial-grade a basso costo demandati alla misurazione di vibrazioni, oscillazioni e inclinazione. I valori misurati sono inviati mediante protocollo LoRaWAN verso dei gateway (in questa fase preliminare è stato adottato un Conduit® AP MTCAP-868-001A della MultiTech); un opportuno flusso Node-red implementato sul gateway permette in fine di inviare mediante MQTT i dati misurati ad una dashboard cloud basata su Thingsboard.

L'attività di ricerca in oggetto ha visto lo studio mediante ricerca bibliografica, la verifica di un prototipo basato su sensori MEMS e di un'opportuna piattaforma di test al fine di verificare le performance e l'accuracy del sistema sviluppato. Sono stati quindi utilizzati dei sensori a basso costo al fine di ottenere misure di accelerazione e vibrazione per i ponti. I risultati sono stati ottenuti configurando opportunamente i sensori scelti ed utilizzando una piattaforma di test realizzata in laboratorio ed infine confrontati con sensori ad elevate performance.

È stata realizzata una piattaforma basata sull'Internet of Things (IoT) per il monitoraggio di grandi strutture come ponti e gallerie. Il nodo sensore è costituito da una configurazione

ridondante di sensori per la misurazione di vibrazioni, oscillazioni e inclinazioni. I valori misurati vengono inviati tramite il protocollo LoRaWAN a un gateway su cui è implementato un nodo-red-flow che invia i dati misurati tramite MQTT a una dashboard cloud basata su Thingsboard. Le attività di ricerca si sono concentrate principalmente in due direzioni principali: definizione e realizzazione prototipale di un dispositivo a basso costo per la misura di vibrazioni e inclinazioni; sistema per la raccolta e la visualizzazione dei dati acquisiti. Per quanto riguarda il primo punto, l'obiettivo principale era quello di verificare le prestazioni del prototipo per questa applicazione, mentre per quanto riguarda il secondo punto, il prototipo di dispositivo ridondante è completato con un sistema di comunicazione wireless basato sul protocollo LoRaWAN. Il nucleo è costituito da un microcontrollore che acquisisce le misure grezze dai sensori iNemo, esegue le operazioni localmente per la determinazione delle quantità di interesse e le invia tramite LoRaWAN. e li invia tramite LoRaWAN al sistema di raccolta dati (dashboard) basato su una piattaforma cloud open source ed eventualmente in realtà aumentata attraverso un dispositivo mobile. È stato inoltre realizzato il primo prototipo di implementazione della rete di comunicazione LoRaWAN e di un cruscotto di test in ambienti Nodered e Thingsboard. Inoltre, uno scudo X-Nucleo-NC04A1 è stato utilizzato per visualizzare i valori misurati dal sensore sul display di un telefono cellulare (tramite NFC). Il metodo proposto è mostrato nella Figura 1 e un esempio operativo dell'interfaccia dell'app è mostrato nella Figura.

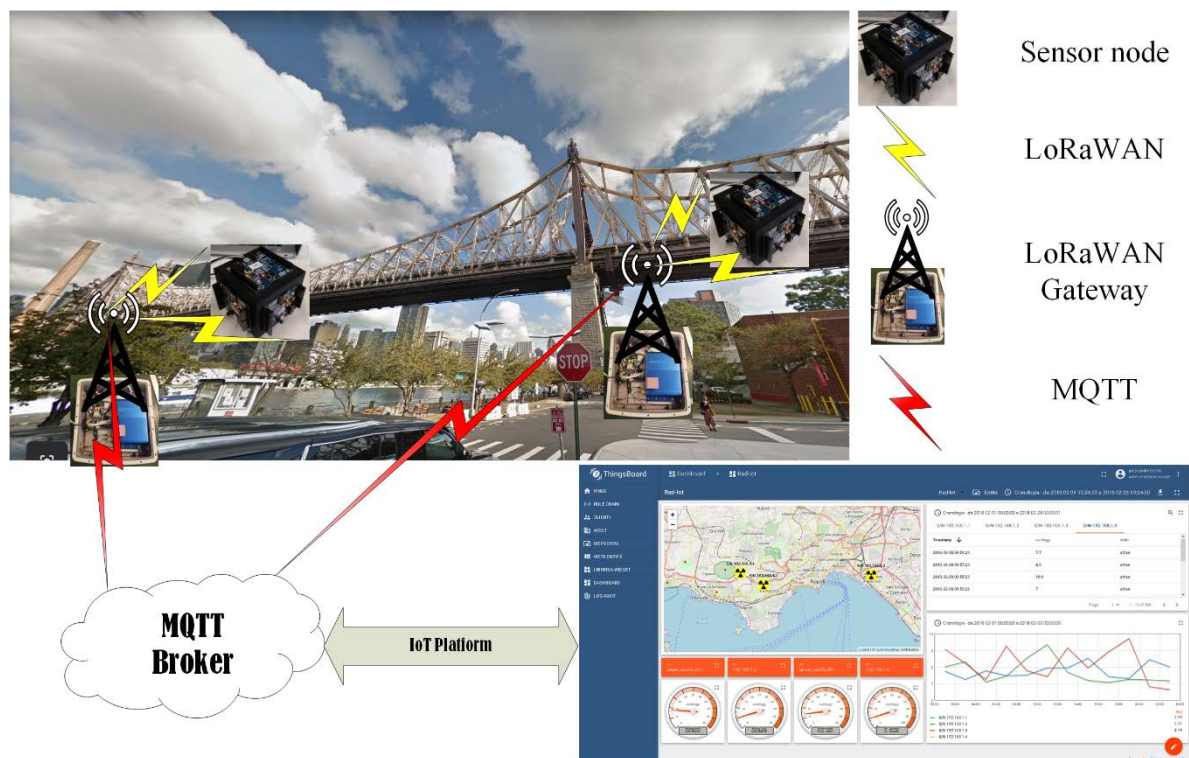


Figura 26 – Architettura proposta per il monitoraggio dei ponti.

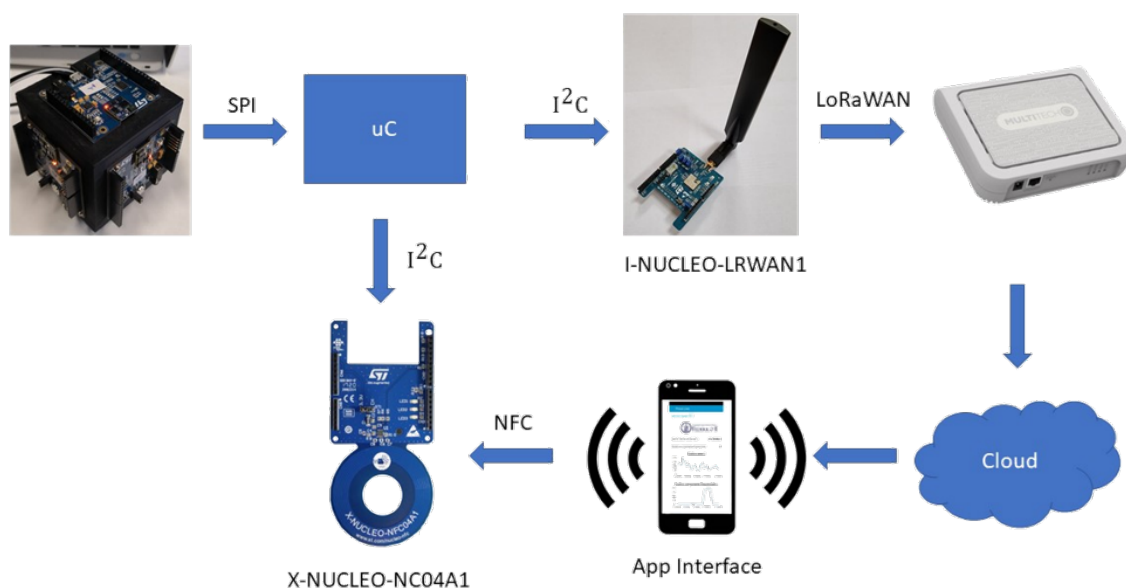


Figura 27 – Sistema di monitoraggio proposto.

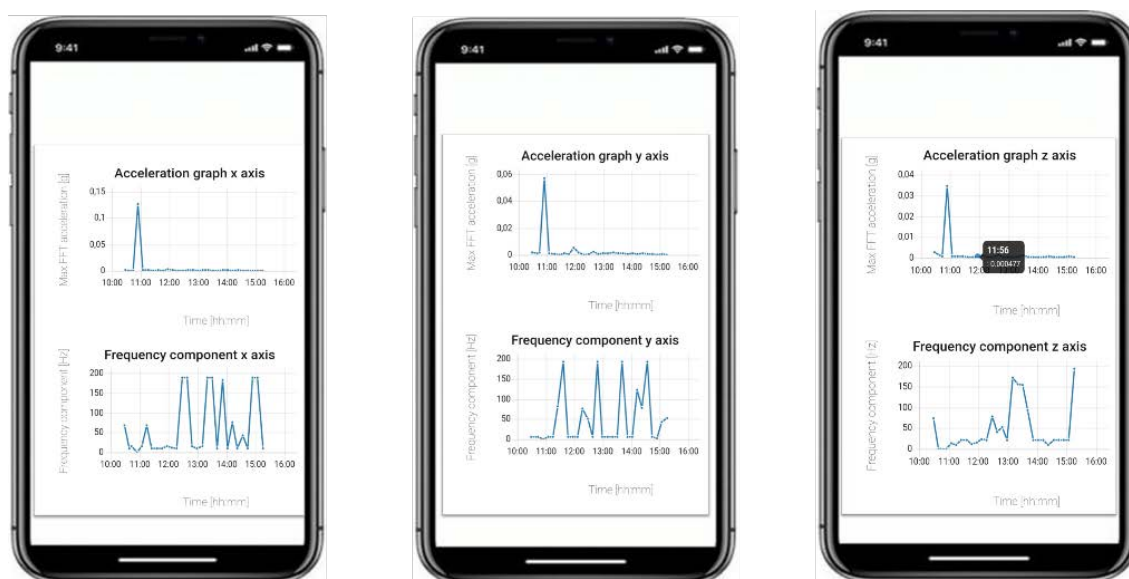


Figura 28 – Applicazione realizzata per il monitoraggio.

9.1.1 LoRa e LoRAWAN

La tecnologia di comunicazione LoRa offre un mix avvincente di trasmissione a lungo raggio, basso consumo energetico, e trasmissione sicura dei dati. LoRaWAN è invece il protocollo di comunicazione basato sulla tecnologia LoRa sviluppata da LoRa Allianz. Utilizza lo spettro radio non licenziata (ISM) per consentire la comunicazione su vasta area tra sensori remoti e gateway collegati la rete tradizionale. Per utilizzare LoRaWAN, è

necessario un server di rete con reindirizzamento dei pacchetti. Esistono diverse opzioni per il server di rete. Si può realizzare un server di rete privato, oppure utilizzare server proprietari a pagamento come The Things Network (TTN), e così via. Schematicamente una rete LoRa è composta da nodi sensori, gateway (a volte chiamati concentratori), server di rete e application server.

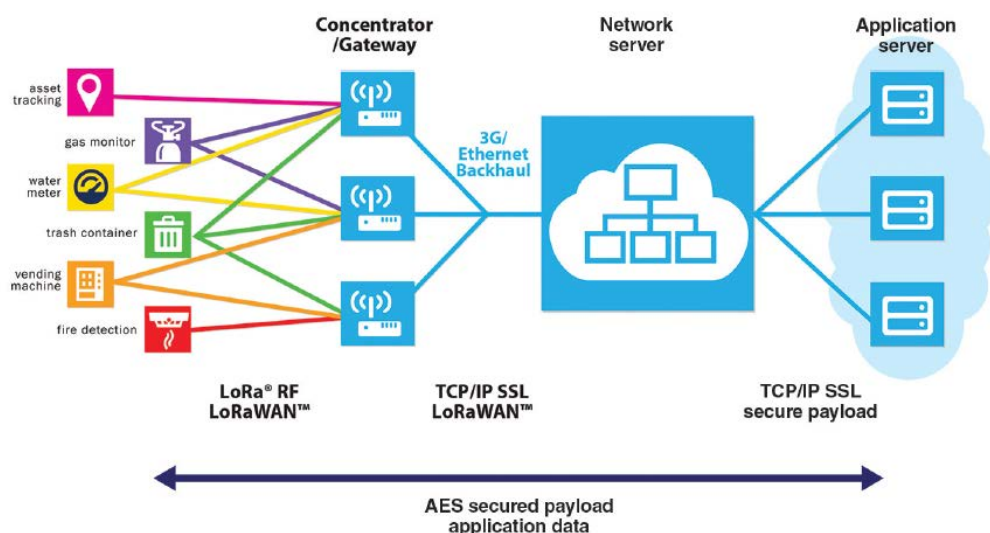


Figura 29 – Modello architettura di rete LoRa.

LoRa è una tecnologia proprietaria basata su una tecnica di modulazione Chirp Spread Spectrum. In Europa, opera nella banda senza licenza ISM a 868 MHz, diviso in sotto bande che vanno da 863 a 870 MHz. Le principali restrizioni imposte a causa dell'adozione della banda non licenziata sono le seguenti:

1. La tecnologia LoRa non può superare una potenza di trasmissione di 14 dBm (25 mW).
2. Nelle sotto-bande esistono limitazioni sul duty cycle dell'1%, 0,1% e 10%.

Tuttavia, ciascun nodo LoRa può utilizzare più sotto-bande in modo indipendente, quindi aumentando il data rate. Anche i gateway LoRa dovrebbero seguire le restrizioni del duty cycle sui loro messaggi di downlink, vale a dire per i messaggi trasmessi verso nodi sensore LoRa.

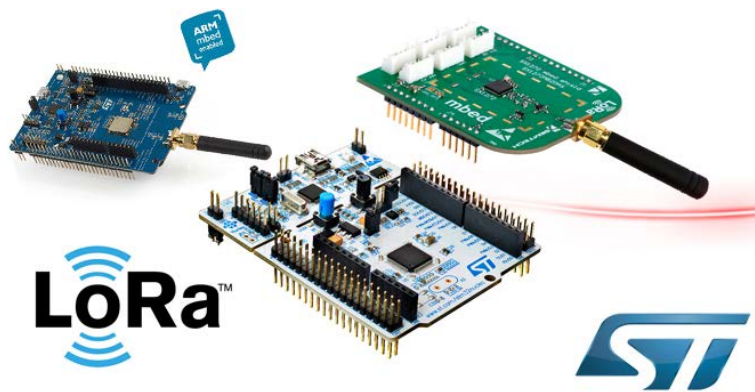


Figura 30 – Esempi di board di sviluppo LoRa.

Shannon ha dimostrato che la capacità di un sistema di comunicazione modellabile come un canale corrotto da Additive White Gaussian Noise (AWGN) può essere espressa come:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad [bit/s]$$

dove B è la banda e S/N è il rapporto segnale rumore al ricevitore. L'equazione evidenzia come sia possibile ottenere comunicazioni affidabili anche con valori estremamente bassi del rapporto segnale rumore incrementando la Banda. Questa caratteristica è alla base delle tecniche di spread, che consentono di portare la densità spettrale di potenza del segnale trasmesso al di sotto del fondo di rumore, attraverso un allargamento della sua banda senza variazione della potenza. Le tecniche di spread spectrum permettono di ottenere diversi vantaggi come la protezione del segnale rispetto ad interferenze a banda stretta, accesso multiplo al canale e coesistenza con sistemi preesistenti (affollamento dello spettro radio). La tecnologia LoRa si basa su una particolare tecnica di spread denominata Chirp Spread Spectrum (CSS) che codifica l'informazione digitale del segnale a banda stretta da trasmettere nella variazione di fase di un segnale up-chirp, generando così un segnale a banda larga. Questa tecnica di spread è particolarmente efficiente e semplifica la realizzazione del ricevitore; infatti, in ricezione il segnale a banda stretta è recuperato moltiplicando il segnale ricevuto a banda larga per un down-chirp, consentendo una demodulazione con basso Bit Error Rate (BER) anche con rapporti segnale rumore molto bassi. Questo consente alla tecnologia LoRa di raggiungere distanze di comunicazione molto elevate che possono andare dai 2 km in ambiente urbano densamente popolato ad oltre 15 km in ambiente rurale. In un chirp è codificata l'informazione di un simbolo e il numero di bit che costituisce il simbolo è lo Spreading Factor(SF). Secondo le specifiche della tecnologia lo SF può assumere i valori da 7 a 12 e quindi in un simbolo possono essere codificati dai 7 ai 12 bit. La durata del chirp

coincide con il Time Symbol. I livelli (chips) che è possibile distinguere in un singolo chirp sono:

$$Chips = 2^{SF}$$

e la risoluzione del chip è:

$$T_{chip} = \frac{1}{BW}$$

dove la BW può assumere tre valori: 150 kHz, 250 kHz, 500 kHz. Pertanto, il Time Symbol è:

$$T_{symbol} = Chips \cdot T_{chip}$$

Sostituendo Chips e T_{chip} in questa ultima equazione si ottiene:

$$T_{symbol} = \frac{2^{SF}}{BW}$$

Considerando poi che in un simbolo sono codificati SF bit si ha che il bit rate è pari a:

$$R_b = \frac{SF}{T_{symbol}} = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}}$$

Le equazioni evidenziano come l'aumento della BW determina il raddoppio del bit rate R_b , mentre l'incremento di un bit del simbolo e quindi di una unità dello SF determina il suo dimezzamento.

%La modulazione LoRa introduce dei bit di ridondanza che migliorano la robustezza del segnale trasmesso a scapito del bit rate che diminuisce ulteriormente:

$$R_b = \frac{SF}{T_{symbol}} = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot \frac{4}{4 + CR}$$

dove CR (Code Rate) può assumere valori da 1 a 4.

Nella tabella seguente sono riportati i valori di bit rate in funzione della BW e dello SF con CR=1:

	SF					
BW	7	8	9	10	11	12
125	5468	3125	1757	977	537	292
250	10937	6250	3515	1953	1074	585
500	21875	12500	7031	3906	2148	1171

Il ricevitore deve essere impostato con gli stessi valori di SF e BW del trasmettitore per poter generare un segnale down-chirp che consente di estrarre il segnale a banda stretta dal segnale rumoroso a banda larga ricevuto. La tecnologia consente quindi diverse combinazioni di SF e BW delle quali alcune determinano segnali tra loro pseudo-ortogonali, vale a dire chirp che hanno pendenze diverse nello spettro tempo frequenza, e che possono quindi viaggiare contemporaneamente nel canale senza interferenze. Il limite inferiore del rapporto segnale rumore SNR in ricezione per cui è ancora possibile demodulare il segnale LoRa dipende dallo SF; maggiore è lo SF e minore è il rapporto segnale rumore che occorre garantire.

Dal limite inferiore di SNR e dalla banda BW si determina la sensibilità del ricevitore che fornisce una stima del minimo segnale che deve essere presente in ingresso al ricevitore per avere in uscita un segnale con l'SNR specificato:

$$S = -174 + 10 \log_{10}(BW) + NF + SNR$$

dove -174 è il noise floor, BW la banda, NF il noise figure ed è pari a 6dB, SNR il limite di rapporto segnale rumore per lo SF specificato. Ad esempio, alcuni valori di sensibilità S in funzione dei valori di BW, SF e con CR = 1 sono riportati nella tabella seguente:

BW (kHz)	SF	Sensitivity (dBm)
125	8	-126
125	10	-132
125	12	-137
250	8	-123
250	10	-129
250	12	-134
500	8	-120
500	10	-126
500	12	-131

Quanto più grande è la distanza tra il trasmettitore e il ricevitore, tanto più piccolo sarà il livello del segnale in ingresso al ricevitore, a causa della degradazione del segnale nel canale, e se inferiore alla sensibilità S che garantisce l'SNR limite in accordo alla seguente tabella, non potrà essere rilevato da quest'ultimo.

SF	SNR limit
7	-7.5
8	-10
9	-12.5
10	-15
11	-17.5
12	-20

Anche l'aumento di banda peggiora la sensibilità. Quindi al crescere della distanza tra trasmettitore e ricevitore si dovrà incrementare lo SF e ridurre la banda BW per garantire una sensibilità del ricevitore sufficiente ad ottenere una comunicazione affidabile.

Pertanto, possiamo affermare che con bassi valori di SF e BW massima si ottengono valori più grandi del bit rate (12.500 kbits/s con SF8 per BW pari a 500 kHz) e sensibilità minori (-120 dBm). Aumentando lo SF diminuisce il bits rate (1172 bit/s con SF 12 e BW 500 kHz) ma aumenta la sensibilità (-131 dBm) e quindi il range possibile.

In generale la tecnologia penalizza il throughput a vantaggio della robustezza e presenta un trade-off tra velocità di trasmissione e distanza di comunicazione.

9.1.2 Struttura del pacchetto LoRa

Un pacchetto LoRa è costituito da tre elementi: un preambolo, un header opzionale, un payload. Il preambolo viene utilizzato per permettere al ricevitore di individuare l'inizio di un pacchetto e sincronizzarsi con i dati trasmessi. L'Header fornisce informazioni sul payload: la lunghezza del payload in bytes, the forward errorr correction code rate, la presenza di ulteriori 16 bits opzionali di CRC per il payload. Tuttavia, l'header stesso è opzionale e in alcuni scenari, dove il payload, il coding rate e il CRC sono fissi e noti, è vantaggioso eliminarlo allo scopo di ridurre i tempi di trasmissione. Per una data combinazione di SF, coding rate (CR) e signal bandwidth (BW) il tempo di trasmissione totale del pacchetto LoRa, denominato T_{packet} , è dato da:

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} = [(n_{preamble} + 4.25) + n_{payload}] \cdot T_{symbol}$$

Dove $n_{preamble}$ è la lunghezza programmabile del preambolo e $n_{payload}$ è dato dalla seguente formula:

$$n_{payload} = 8 + \max \left(\left\lceil \frac{(8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH)}{4(SF - 2DE)} \right\rceil \cdot (CR + 4), 0 \right)$$

dove PL è il numero di bytes del payload, SF lo spreading factor, IH=1 se l'header è implicito e 0 se è esplicito, DE è 1 se è utilizzata la modalità di low data rate optimization, 0 altrimenti, CRC è 1 se è abilitato il CRC per il payload e infine CR è il coding rate programmabile da 1 a 4.

In tabella T_{packet} in funzione di BW e SF fissato un preabolo di 8.25 bytes, header esplicito, CR pari ad 1, un payload di 10 bytes con CRC abilitato:

	SF					
BW	7	8	9	10	11	12
150	37.12	64	128	256	430.08	860.16
250	18.56	32	64	128	215.04	430.08
500	9.28	16	32	64	107.52	215.04

Come si nota facilmente, il tempo di trasmissione può variare notevolmente, anche di due ordini di grandezze, se si passa ad esempio da una configurazione con SF7 e BW 500 kHz che permette di ottenere tempi di trasmissione di pochi ms (pari a 9.28 ms), ad una configurazione con SF12 e BW 125 kHz con tempi di trasmissione di quasi un secondo (pari a 860.16 ms) per trasmettere lo stesso payload di 10 bytes.

È evidente che questa caratteristica, che delinea anche i limiti della tecnologia LoRa ha un impatto notevole sulla progettazione della dei sistemi di SHM.

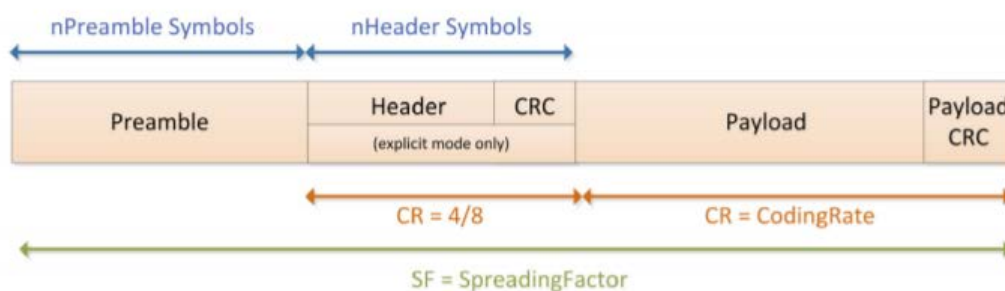


Figura 31 - Pacchetto LoRa.

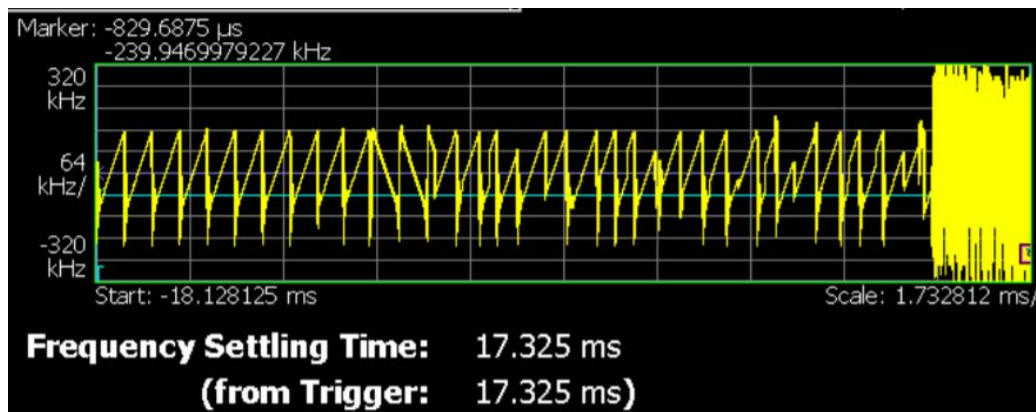


Figura 32 - Esempio segnale LoRa.

9.1.3 Piattaforma LoRaWAN per il monitoraggio

Definito nel 2015 da Semtech e IBM, **LoRaWAN** (*Long Range Wide-Area Network*) è un protocollo MAC che utilizza la tecnologia wireless *LoRa*. Uno dei vantaggi principali di questo protocollo è quello di poter operare a frequenze comprese nelle bande **ISM** (*Industrial Scientific and Medical*) esente da licenze, rendendo quindi LoRaWAN aperto a tutti. Questo è uno dei tanti aspetti che ha suscitato l'interesse di molte aziende del settore, come ad esempio la STMicroelectronics, già membro e sponsor di **LoRa-Alliance** che sta realizzando prodotti ad Hoc per l'IoT mediante l'utilizzo di questo protocollo.

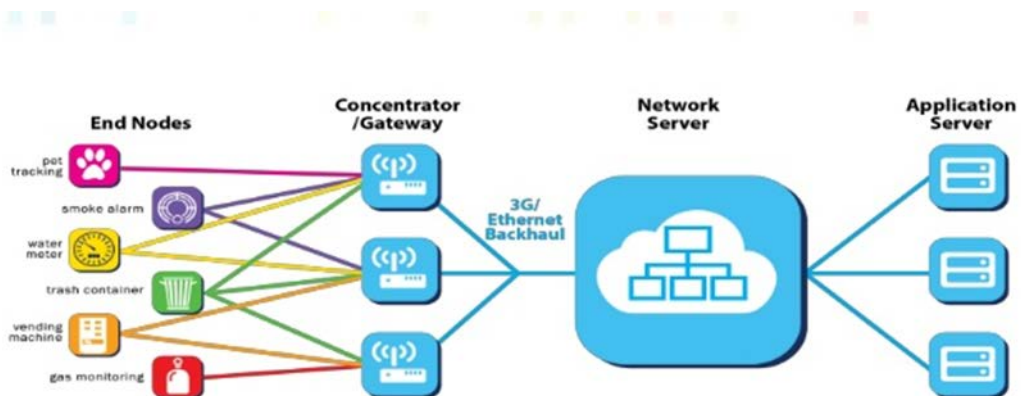


Figura 33 - Architettura rete LoRaWAN.

Il protocollo *LoRaWAN* è un *protocollo MAC* per reti LPWAN ed è ottimizzato per impiegare sensori con ridotto consumo di batteria. Esso include differenti classi di *end-device* a seconda della necessità di favorire la latenza di rete piuttosto che la durata della

batteria. È interamente bidirezionale ed è stato studiato da esperti della sicurezza per assicurare affidabilità e protezione. L'architettura LoRaWAN è stata anche progettata per localizzare e seguire oggetti mobili per il tracciamento dati, che è uno dei punti che più velocemente sta prendendo piede nelle applicazioni dell'*Internet of Things*.

In una rete LoRaWAN i nodi non sono associati solamente ad un solo specifico gateway. I dati trasmessi da un end-device sono tipicamente ricevuti da più gateway i quali verranno resi disponibili al network server tramite connessioni Internet standard (Ethernet, Wi-Fi, 4G).

La comunicazione verso i device è in generale bidirezionale, ma può anche supportare il multicast per gestire l'aggiornamento o la distribuzione massiva di messaggi per ridurre i tempi di comunicazione. Distribuendo opportunamente i gateway all'interno degli insediamenti urbani, si possono realizzare reti pubbliche o private di grande dimensione, analoghe alle reti GSM, ma senza necessità di moduli GPRS, e con un basso volume, abilitanti di una tecnologia IoT per il controllo e la gestione dello stato degli edifici pubblici e privati.

La comunicazione tra gli *end device* e i *gateway* è estesa su canali di frequenza e *data rate* differenti. Il *data rate* di LoRa va da 0.3 kbps a 50 kbps. Per massimizzare sia la durata della batteria degli *end-device* che la capacità complessiva di rete, il server di rete LoRaWAN gestisce la velocità dei dati e la potenza RF in uscita per ciascun dispositivo tramite uno schema di data rate adattivo (**Adaptive Data Rate**). La funzione ADR regola il data rate per realizzare l'arrivo dei pacchetti, ottimizzando le performance di rete favorendo la scalabilità. La selezione della velocità di trasmissione dati è un trade-off tra range di comunicazione e la durata del messaggio. Grazie alla tecnologia spread spectrum, le comunicazioni con diverse velocità di trasferimento dati non interferiscono tra di loro e creano una serie di canali "virtuali" aumentando così la capacità del gateway: si è in grado di creare in questo modo un network "*scalabile*".

Per esempio, *end-device* vicini al *gateway* utilizzeranno alti *data rate* e una più bassa potenza di uscita. Solo gli *end-device* all'estremità dell'estensione della rete useranno i più bassi *data rate* e la più alta potenza di uscita possibile. La funzione ADR è sensibile ai cambiamenti della topologia di rete per non subire la perdita dei pacchetti. L'Adaptive Data Rate rappresenta quindi un'ottima strategia per massimizzare la capacità del network, evitando collisioni tra pacchetti con lo stesso data-rate, e permettendo ai nodi trasmettenti al limite del loro link budget di abilitare velocità di trasmissioni più basse in modo da massimizzare il range di copertura.

Il **link budget** di un sistema wireless è una misura di tutti i guadagni e di tutte le perdite che si hanno nel passaggio del segnale dal trasmettitore al ricevitore tramite il mezzo trasmissivo.

Il link budget di un sistema wireless può essere espresso tramite la seguente formula:

$$P_{RX}[dBm] = P_{TX} [dBm] + G_{system} [dB] - L_{system} [dB] - L_{channel} - L_M [dB]$$

Dove:

- P_{RX} rappresenta la potenza sul ricevitore;
- P_{TX} potenza nodo trasmittente;
- G_{system} guadagni del sistema come quelli associati alle varie antenne;
- L_{system} perdite del sistema come quelle relative alle linee di alimentazione o alle antenne;
- $L_{channel}$ perdite dovute al canale di trasmissione, calcolate tramite dei modelli matematici (ad esempio quello di Okumura-Hata);
- L_M perdite dovute a meccanismi di fading, mismatch di polarizzazione, multipath ed altri tipi di perdite.

Tramite lo schema di trasmissioni dati adattivo è possibile migliorare la capacità del network diminuendo il cosiddetto **Time on Air** del segnale, ossia la durata del segnale in aria prima di essere ricevuto e decodificato: più è bassa la durata del segnale in aria (anche detto *tempo di volo*) minore sarà la probabilità che il segnale possa essere intaccato da eventuali interferenze.

Un altro aspetto di notevole importanza per le applicazioni IoT è la crittazione di sicurezza incorporata nelle reti LoRaWAN, che consente ai livelli applicazione e dispositivo di offrire una struttura di protezione dei dati personali o delle funzioni critiche dagli attacchi fisici o informatici. Infatti, le reti a livello nazionale rivolte all'Internet delle Cose come le infrastrutture critiche e i dati personali per le società, hanno bisogno di una comunicazione sicura. Questo è stato risolto dai vari strati di crittografia, quali Unique Network key (EUI64) che garantisce la sicurezza a livello di rete; Unique Application key (EUI64), invece, garantisce la sicurezza a livello applicazione; e infine Device Specific key (EUI128) relativamente al dispositivo.

9.1.4 Topologia della rete

Una rete LoRaWAN prevede i seguenti componenti: end-devices o dispositivi terminali posizionati in località remote e dotati di sensori e attuatori; Gateway LoRa, ovvero

l'interfaccia verso gli end-points; LoRa Network Server: l'unità che gestisce la rete. Un computer remoto per la raccolta e l'analisi dei dati.

La scelta della topologia sulle reti LoRaWAN si basa su un compromesso in termini di costi e affidabilità della rete. Esistono tre differenti topologie che possono essere implementate:

- **Punto-punto**: questo tipo di topologia è la più semplice e la più economica e permette il collegamento tra due *end-device*. Il tipo di comunicazione può essere unidirezionale o bidirezionale.
- **Stella di stelle**: in questa topologia gli *end-device* sono collegati a uno o più *gateway*, i quali permettono lo scambio di messaggi tra gli *end-device* e il *network server*. Essa fornisce un ottimo compromesso tra costi e affidabilità.
- **Mesh** (a *Maglia*): è la più complessa e costosa, ma anche la più affidabile. Ogni *end-device* della rete è collegato a sua volta ad altri *end-device* o ai *gateway*, in modo da ottenere un tipo di rete particolarmente robusta, ma di una complessità elevata.

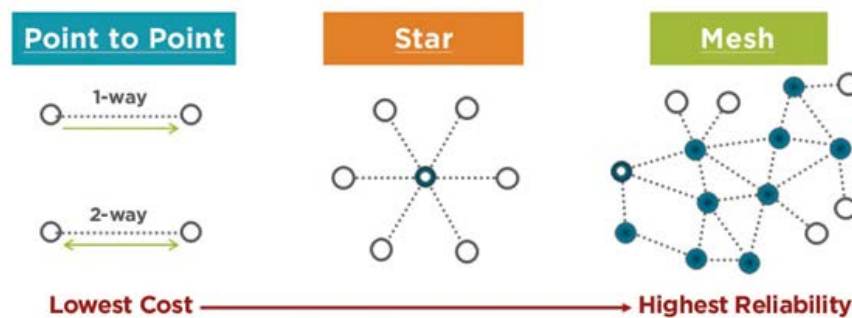


Figura 34 - Tipologia di rete.

La più utilizzata è la topologia a stella di stelle proprio perché ha un ottimo riscontro in termini economici e presenta un buon grado di robustezza. In questo tipo di topologia i *gateway* sono connessi al *network server* attraverso connessioni IP standard, mentre gli *end-device* sono connessi a uno o più *gateway* utilizzando tecniche di modulazione come LoRa o FSK.

9.1.5 End-devices

Gli **end-devices** rappresentano i nodi della rete. Generalmente sono dotati di sensori con i quali elaborano le informazioni ottenute dall'ambiente circostante e comunicano col *network server* attraverso i *gateway* tramite moduli di comunicazione RF.

Gli *end-device* possono trasmettere in ogni canale libero utilizzando un qualsiasi data rate disponibile in quel momento, pur rispettando le seguenti regole:

- Un *end-device* deve cambiare canale in modo pseudo-casuale per ogni trasmissione. La diversità delle frequenze risultanti rende il sistema estremamente robusto alle interferenze.
- Un *end-device* deve rispettare il **duty cycle** (ciclo di lavoro) massimo di trasmissione relativo alla sotto-banda utilizzata e alle normative locali. Tale ciclo massimo di lavoro rappresenterà una limitazione riguardo il numero massimo di pacchetti giornalieri inviabili, e l'intervallo di tempo tra due trasmissioni consecutive.
- Un *end-device* deve rispettare il tempo di permanenza massimo relativo alla sotto-banda utilizzata e alle normative locali.

Il protocollo LoRaWAN cataloga gli *end-device* in diverse classi in base alle loro funzionalità. Ogni funzionalità aggiuntiva o differente definisce una classe. In una rete LoRa è possibile distinguere tre differenti classi di *end-device*:

- **End-device Bidirezionali (Classe A – “All”)**: gli *end-device* di classe A possiedono tutte le funzionalità base che il protocollo fornisce. Essi permettono una comunicazione bidirezionale in base alla quale ogni trasmissione in *uplink* dell'*end device* è seguita da due brevi finestre di ricezione in *downlink*. Lo slot di trasmissione previsto dall'*end-device* si basa solo sulle esigenze di comunicazione del *device* stesso con una lieve variazione basata su un intervallo casuale (protocollo *slotted ALOHA*). Se il server non riesce a trasmettere in *downlink* entro le due finestre di ricezione deve attendere il successivo ciclo di trasmissione in *uplink* dell'*end-device*.
- **End-device bidirezionali con slot di ricezione prestabiliti (Classe B – “Beacon”)**: Possiedono le stesse funzionalità degli *end-device* di classe A con la differenza che i classe B possiedono più finestre di ricezione. Prima che l'*end-device* apra una finestra di ricezione, esso riceve dal *gateway* un messaggio di **Beacon** in modo da permettere al server di capire quando l'*end-device* è in ascolto.
- **End-device bidirezionali con slot di ricezione massimali (Classe C – “Continuous”)**: questa classe di *end-device* possiede finestre di ricezione continuamente aperte che vengono chiuse solo quando il dispositivo è in trasmissione. Per poter operare, questa classe di

dispositivi consuma più energia rispetto a un classe A o a un classe B ma offrono una più bassa latenza per la comunicazione tra server ed *end-device*.

Quindi, tutte e tre le classi di dispositivi possiedono le stesse caratteristiche base, che sono proprie dei classe A. Per il funzionamento dei classe B e classe C, pur possedendo caratteristiche aggiuntive, si può fare comunque affidamento sulle politiche di funzionamento dei classe A.

Attualmente il programma di certificazione è solo per i dispositivi in classe A nella banda Europea 867-869 MHz ed in quella Americana 900-928 MHz. La certificazione per i dispositivi di classe B, classe C e dei *gateway* non è ancora stata definita.

9.1.6 Software per la rete di monitoraggio LoRa

Per la realizzazione della rete di sensori sono stati utilizzati due ambienti di sviluppo differenti:

- La piattaforma *ARM mbed* per la programmazione del nodo;
- Il tool di programmazione *Node-Red* per l'implementazione della rete.

È stato anche utilizzato il software **PuTTY** per la gestione in remoto del gateway e dell'*end-device*. PuTTY è un client (il cui sviluppo risale ai primi mesi del 1999 da parte del programmatore Simon Tatham) che permette di stabilire una sessione remota cifrata ad un altro computer emulando un terminale con i protocolli SSH, Telnet, rlogin TCP e serial. In origine il client *PuTTY* era disponibile solo per i sistemi *Microsoft Windows*, ma in seguito venne esteso anche a vari sistemi *Unix* e *Unix-like*. All'interno dell'ultima versione del client (0.62 rilasciata il 10 dicembre 2011) è stato aggiunto il supporto per l'autenticazione SSH-2, protocollo che dà maggiori garanzie sulla sicurezza delle informazioni scambiate tra terminali, rispetto al protocollo SSH-1.

ARM mbed, nato dalla collaborazione tra IBM e ARM, è una piattaforma IoT sviluppata pensando a diversi tipi di applicazioni, sia in ambito consumer che professionale. Lato hardware si basa sul **processore Cortex M7** e le sue evoluzioni successive, ma è il lato software il vero cuore pulsante del progetto. Esso presenta infatti un sistema operativo, che serve a fare da collegamento tra i vari device IoT e i sistemi di elaborazione e analisi dei dati

raccolti. *ARM mbed* fornisce supporto per più di 100 schede *mbed-enabled* e possiede una serie di servizi tra cui un servizio *cloud based* per la gestione dei device.



Figura 35 - ARMbed.

Node-Red è un tool di programmazione flow-based per l'Internet of Things. Nasce con l'obiettivo di dare a tutti, anche a chi non è esperto di programmazione, la possibilità di collegare tra loro diversi dispositivi (con eventuali relativi sensori e attuatori), oltre a API (Application Program Interface) e servizi online per poter realizzare sistemi altamente integrati e complessi in modo del tutto semplice ed intuitivo.

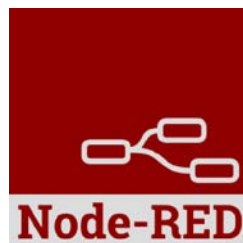


Figura 36 - Node-Red.

Node-RED nasce dall'idea di alcuni ricercatori della IBM, Nicholas O'Leary, Dave Conway-Jones e Andy Stanford-Clark, che nella prima versione si focalizzarono sulla possibilità di utilizzare questo strumento per poter trasferire messaggi ai server di rete attraverso il protocollo *MQTT* costruendo dei flussi in maniera del tutto visuale.

9.1.7 Il protocollo MQTT

Il protocollo **MQTT** è uno dei principali protocolli di comunicazione utilizzati attualmente in ambito IoT, non a caso l'**Organisation for the Advancement of Structured Information Standards (OASIS)** ha dichiarato il protocollo MQTT di IBM lo standard di comunicazione per l'Internet of Things lato network server.

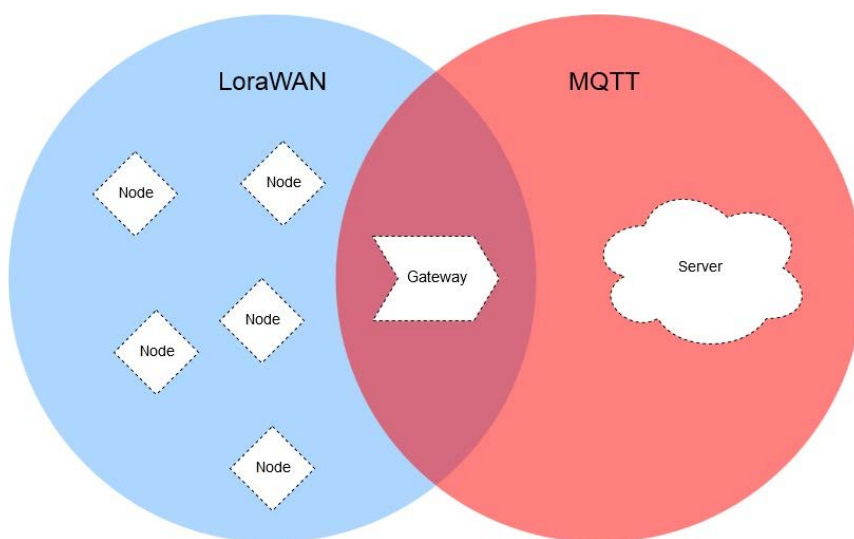


Figura 37 - Architettura livelli di comunicazione.

Questo protocollo, alla base dei Social Networking Services si basa su un meccanismo *publisher* (chi pubblica) e *subscriber* (chi riceve/sottoscrive) gestita attraverso un server centrale (*broker*) che ha il compito di “smistare” i messaggi applicando appunto il pattern publish/subscribe: è proprio questo meccanismo la caratteristica più importante di MQTT. In una comunicazione tradizionale la sorgente del dato, ad esempio un sensore di temperatura, invia il dato direttamente all’utente finale, ad esempio, il termostato nella figura successiva.

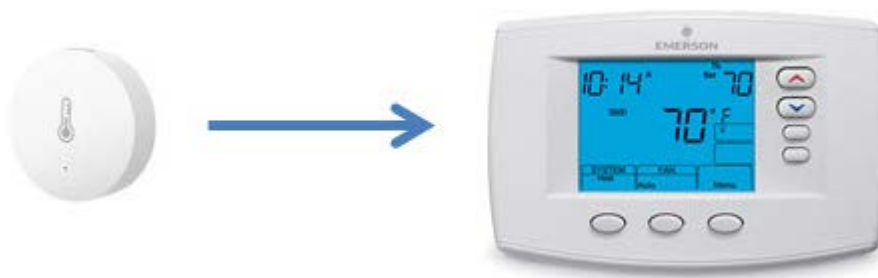


Figura 38 - Comunicazione tradizionale.

In una comunicazione *publish/subscribe* invece il sensore invia (pubblica, *publish* in inglese) il dato ad un sistema centrale detto **broker**. Tutti i dispositivi che vogliono ottenere tale dato lo comunicano al broker (si iscrivono, *subscribe* in inglese) ed è il broker ad inviare loro il dato quando questo è disponibile:



Figura 39 - Comunicazione publish/subscribe.

Il vantaggio principale del paradigma **pub/sub** è il disaccoppiamento tra chi produce il dato e chi lo deve utilizzare:

- disaccoppiamento spaziale: chi genera il dato non deve essere direttamente connesso con chi lo utilizza;
- disaccoppiamento temporale: chi genera il dato non deve essere attivo nello stesso momento di chi lo utilizza;
- disaccoppiamento di sincronizzazione: la produzione del dato non deve essere sincrona con il suo utilizzo.

Da quanto scritto sopra, si capisce perché il protocollo MQTT e in generale il paradigma pub/sub è molto utilizzato in ambito Internet of Things: i dispositivi più semplici, spesso alimentati a batteria, possono attivarsi ogni tot secondi, inviare i propri dati al broker e tornare nello stato di risparmio energetico. Sarà il broker, sempre attivo, a rendere disponibili tali dati ai vari utilizzatori quali ad esempio attuatori o dashboards.

L'MQTT consente ad un dispositivo IoT di generare un messaggio costituito da un Topic ed un Payload, quest'ultimo di solito in formato JSON (JavaScript Object Notation). Il payload costituisce il messaggio postato da un particolare Device secondo lo specifico Topic che viene raccolto da un broker MQTT e instradato verso i clients MQTT connessi ad Internet, che hanno deciso di eseguire quel particolare Topic. Un device può postare diversi Topic e sottoscriverne altrettanti. I dati raccolti dal Broker possono poi essere raccolti in un database e resi disponibili, o immediatamente mediante Grafical User Interface, o sottoposti ad analisi. Attualmente si stanno diffondendo numerose piattaforme IoT che forniscono Servizi Integrati che permettono così, mediante l'utilizzo di un'unica piattaforma, di integrare

numerosissimi dispositivi, immagazzinare i dati raccolti in cloud, analizzarli in real time e generare report o azioni in risposta a un particolare evento.

9.2 Risultati attività

9.2.1 Architettura di sistema

La soluzione sviluppata è composta da: un prototipo di IMU ridondante per rilevare accelerazioni, questi dati rilevati vengono comunicati tramite UART al sensore I-NUCLEO-LRWAN che li invia tramite protocollo LoRaWAN al gateway. Attraverso la comunicazione I²C, programiamo il modulo X-NUCLEO-NFC04A1 che permette di aprire un'applicazione per visualizzare i dati inviati al gateway dai vari sensori; per comunicare con il server, la scheda di espansione LoRa per STM32 Nucleo I-NUCLEO-LRWAN viene utilizzata per le sue caratteristiche peculiari. Questo sensore, mostrato in Figura, è un modulo LPWAN certificato USI LoRaWAN™ classe A a basso costo. È dotato di MCU STM32L052T8Y6 a bassissima potenza, basato su Cortex® M0+ con 64 Kbyte di memoria Flash, 8 Kbyte di RAM, 2 Kbyte di EEPROM, T-RNG con ricetrasmittitore radio Semtech SX1272 che supporta la modulazione LoRa, FSK, GFSK, MSK, GMSK e OOK. Presenta un'elevata sensibilità fino a -137 dBm con una gamma di frequenza da 860 MHz a 1020 MHz e potenza di uscita da 14 dBm a 20 dBm. Il sensore è alimentato da 3,3 V, è dotato di connettori Arduino e di un connettore SMA con antenna da 50 Ω per inviare pacchetti di dati.



Figura 40 – Modulo LoRaWAN STMicroelectronics.

Per accedere ai dati inviati al server è stato utilizzato un sensore NFC che permette ai lettori presenti sui cellulari di aprire un'applicazione per monitorare l'evoluzione dei vari dati nel tempo. Viene utilizzata la scheda di espansione IC tag NFC/RFID dinamica X-NUCLEO-NFC04A1, basata sul tag IC NFC/RFID ST25DV04K di tipo V. Questo modulo è dotato di una memoria EEPROM a doppia interfaccia da 4 kBit. Questa EEPROM è divisa in blocchi da 512 byte, organizzati per aree a 4 byte in modalità I²C con un tempo di scrittura tipico di 5

ms per 1 byte, e 128 blocchi a 4 byte in modalità RF con un tempo di scrittura tipico di 5 ms per singolo blocco. Questa memoria consente la conservazione dei dati per circa 40 anni. Il modulo ST25DV04K offre una modalità di trasferimento veloce tra i dati I²C e le interfacce RF grazie a un buffer half-duplex da 256 byte. Dispone inoltre di protezione in lettura e/o scrittura per la memoria utente con tre password a 64 bit in RF e una password a 64 bit in I²C, mentre per la configurazione del sistema, offre protezione da scrittura con una password a 64 bit sia in RF che in I²C. Questo sensore può essere alimentato dal pin del connettore Arduino o direttamente dal campo elettromagnetico portante ricevuto. La scheda è dotata di un'antenna, incisa in rame su PCB, con un diametro di 54 mm ISO 24.2.



Figura 41 – Modulo NFC STMicroelectronics.

9.2.2 Risultati

Sei iNemo sono montati sulle facce di un cubo in modo da avere sei misure di accelerazione e velocità angolare per ogni asse della tripla cartesiana di riferimento. Le misurazioni vengono mediate e poi filtrate da un filtro di Kalman per ottenere misurazioni compensate principalmente per eventuali distorsioni e derive dei singoli sensori. Viene progettato e realizzato un primo prototipo di laboratorio su cui eseguire una verifica preliminare di funzionamento e prestazioni. A tal fine, viene utilizzato un mockup semplificato costituito da un profilo a C in acciaio per le vibrazioni e le misure di oscillazione.



Figura 42 – Mockup a C per le prove di oscillazione; sistema di riferimento (STIM3000) e prototipo realizzato a confronto.

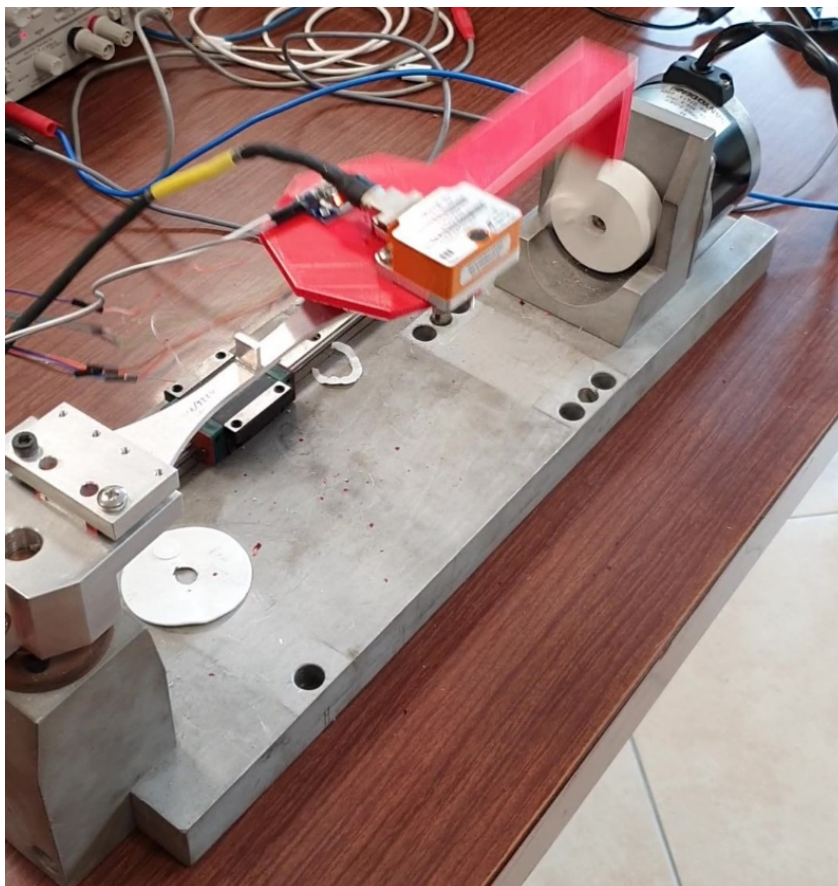


Figura 43 – Piattaforma per realizzare oscillazioni controllate.

Le prestazioni del prototipo sono state verificate confrontando i risultati di misura forniti dal sistema realizzato con quelli garantiti da un sensore MEMS di grado tattico, in particolare lo STIM318 prodotto da SensororTM. Sono state eseguite l'implementazione delle operazioni di

acquisizione e media nel concentratore e la verifica delle prestazioni offline in ambiente MatlabTM sui dati forniti dal concentratore.

I risultati ottenuti come confronto tra il prototipo ed il riferimento, ovvero un sensore di tipo tattico, sono riportati nella tabella 1, in termini di Root Mean Square Error, deviazione

Tabella 8 – Confronto in termini di RMSE, Mean Value e STD tra il prototipo ed il riferimento.

	RMSE	Mean Value	STD
Accelerometers [g]			
z-axis	0.0116	0.0114	0.0021
y-axis	0.0202	0.0201	0.0022
x-axis	0.0140	0.0138	0.0024
Gyroscopes [deg/s]			
z-axis	0.2165	0.2015	0.0792
y-axis	0.1684	0.1682	0.0831
x-axis	0.2952	0.2831	0.0836

standard e media. L'analisi preliminare del sistema in condizioni stazionare ha evidenziato un notevole accordo tra le misure del prototipo e del sistema di riferimento.

Successivamente sono stati confrontati i due sistemi ai quali è stata applicata la stessa frequenza di oscillazione mediante il mockup realizzato (Figura 1).

I risultati ottenuti hanno mostrato un netto miglioramento grazie alla configurazione ridondante, sia in termini di spettro di vibrazioni che nelle misure dello spettro di oscillazione controllata.

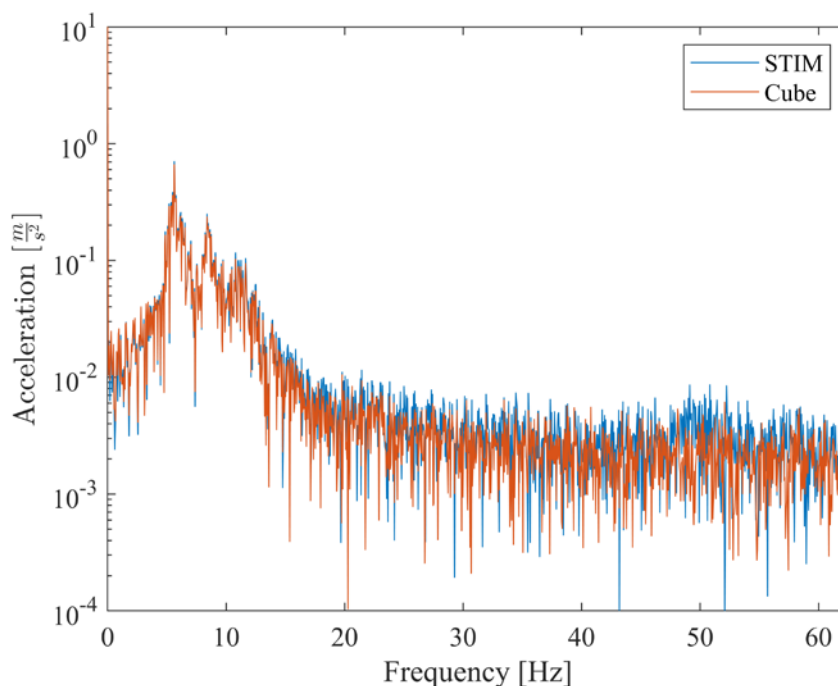


Figura 44 – Confronto dello spettro delle vibrazioni tra il riferimento ed il prototipo.

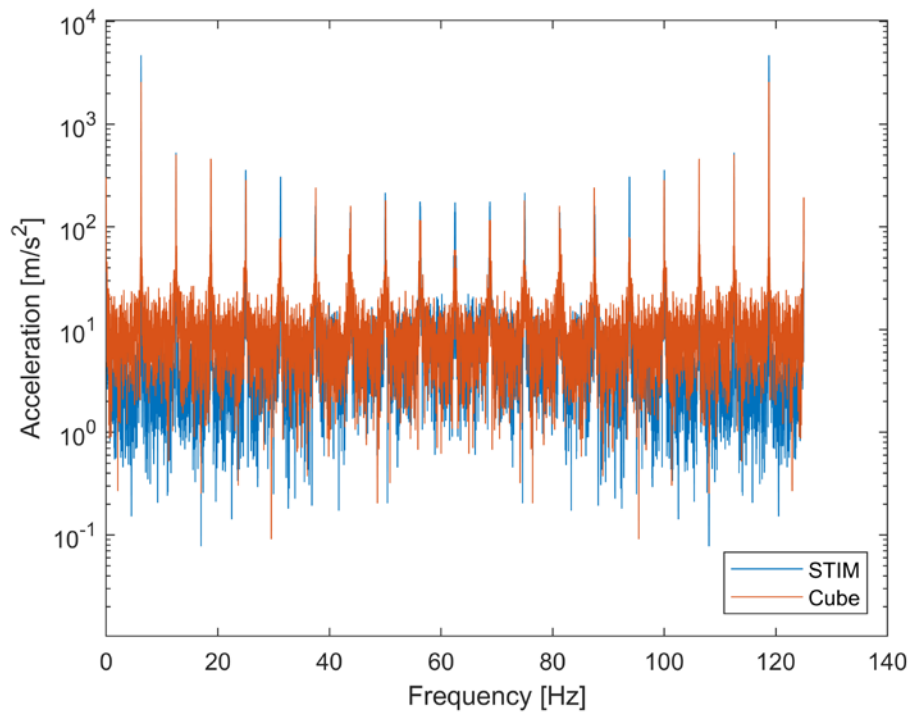


Figura 45 – Confronto in termini di oscillazioni tra il riferimento ed il prototipo con frequenza pari a 2Hz.

Si osservano inoltre, le performance raggiunte nelle figure successive, il sistema mostra differenze dell'ordine del mHz rispetto al sistema di riferimento.

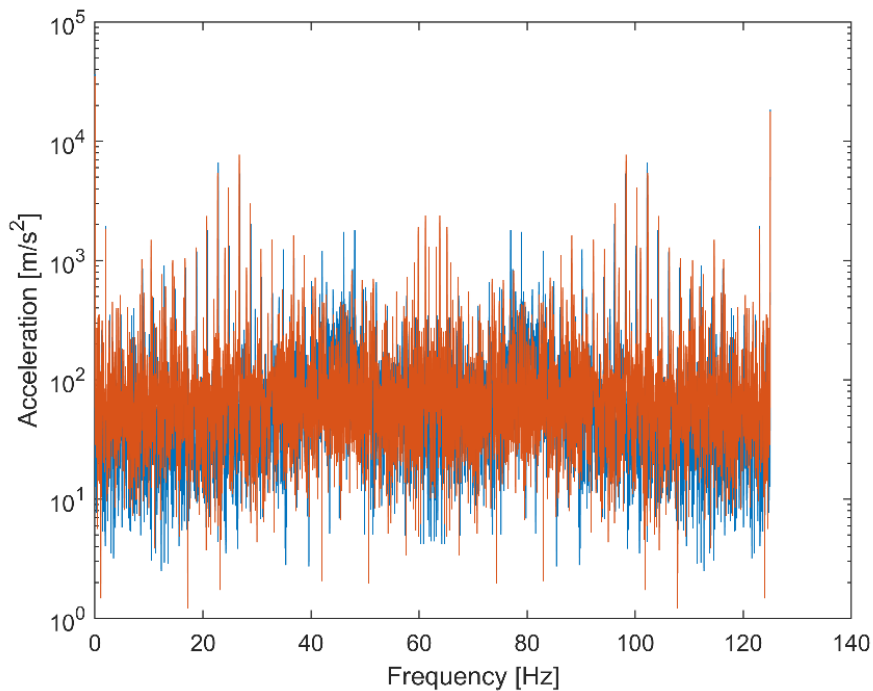


Figura 46 - Confronto in termini di oscillazioni tra il riferimento ed il prototipo con frequenza pari a 0.5Hz..

Nella prima figura il sistema di misura è stato impostato per generare un'oscillazione controllata pari a 2Hz, mentre nella seconda figura la frequenza è impostata a 0.5Hz.

Dall'analisi dei risultati ottenuti sia in condizioni statiche che in condizioni dinamiche, ovvero sottoposto ad oscillazioni controllate, il sistema ridondante di sensori a basso costo MEMS risulta essere confrontabile con un sensore di tipo tattico ad alte prestazioni ed elevato costo. È possibile quindi, utilizzare la soluzione proposta per applicazioni strutturali, utilizzando una rete di sensori a basso costo lungo tutta la struttura da monitorare ed inoltre in queste tipologie di applicazioni le misure di oscillazione e vibrazione sono dell'ordine valutate sperimentalmente in laboratorio.

Le capacità sperimentate consentono di realizzare una rete di sensori distribuiti che consente quindi l'installazione in punti chiave della struttura da monitorare come i ponti con il vantaggio di ridurre notevolmente i costi. Si può infatti osservare il notevole accordo tra le misure fornite dal prototipo del nodo sensore ridondante e quelle del sensore di riferimento evidenziando le differenze di ampiezza di mHz.

È stata realizzata una piattaforma basata sull'Internet of Things (IoT) per il monitoraggio di grandi strutture come ponti e gallerie. Per raggiungere questo obiettivo, il nodo sensore adottato è il prototipo precedentemente sviluppato come parte di un sistema di navigazione a cui sono state aggiunte opportune funzionalità aggiuntive con l'introduzione di un modulo NFC e LoraWAN di STMicroelectronics™ che ha permesso di realizzare un nodo sensore IoT in grado di comunicare in tempo reale le informazioni sullo stato di salute della struttura attraverso un'apposita dashboard di NodeRed™. Le prestazioni del sistema sono state valutate attraverso un confronto con una IMU di tipo tattico di Sensoror™ e i risultati hanno mostrato misure di oscillazioni e vibrazioni compatibili. I risultati ottenuti consentono di realizzare una rete di sensori distribuita in cui ogni singolo modulo potrebbe essere installato in un punto specifico della struttura da monitorare.

10 Progettazione hardware del NODO Sensore basato su microcontrollore STM32L476

I principali problemi dei sistemi SHM commerciali sono l'elevato costo del sensore e dell'installazione, per cui in questo WP abbiamo combinato i requisiti di microvibrazione del sensore MEMS con un ricetrasmittitore LPWAN, e progettato una scheda SHM con connettività wireless e alimentazione a batteria riduce drasticamente i costi di installazione.

I componenti principali del prototipo progettato sono:

1. **Microcontrollore STM32L476** di STMicroelectronics: microcontrollore serie L4 con ARM Cortex-M4 e unità in virgola mobile (FPU). È caratterizzato da un basso consumo energetico (39 $\mu\text{A}/\text{MHz}$) e da un'interfaccia diretta per schede SD;
2. Sensore inerziale **MEMS LIS344DH**: accelerometro lineare ultracompatto a 3 assi ad alte prestazioni $\pm 2 \text{ g} / \pm 6 \text{ g}$;
3. **IIS2ICLX** Inclinometro digitale a 2 assi ad alta precisione, alta risoluzione e bassa potenza; incorpora un core di apprendimento automatico per il riconoscimento di modelli e la generazione automatica di trigger. Inoltre, è in grado di fornire misure inclinometriche con un'accuratezza di $0,015 \text{ mg}/\text{LSB}$;
4. **Modulo Quectel BC95-G** LTE-CatNB1 NB-IoT, caratterizzato nella Sezione III-C

La scheda è dotata di due sensori di temperatura per le temperature di bordo e quelle esterne. Il regolatore di tensione è stato aggiunto per fornire una tensione di alimentazione stabile a partire dall'uscita della batteria. Un caricabatterie compatibile con USB il sistema con interruttore di alimentazione integrato per Li-Ion/Li-Polymer è montato nel caso di batterie ricaricabili o di un energy harvester.

×

L'inclinometro IIS2CLX viene utilizzato per due compiti principali: raccogliere dati inclinometrici e fornire un interrupt in caso di picco. Per ridurre il consumo energetico tra due sessioni di misura, la scheda viene fermata in una condizione di "sleep", ma in caso di un evento straordinario (ad esempio, picco accelerometrico), l'IIS2CLX si riattiva per trasmettere le misurazioni di emergenza. Il circuito stampato (PCB) a 4 strati finale è di $120 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ed è mostrato in Figura.

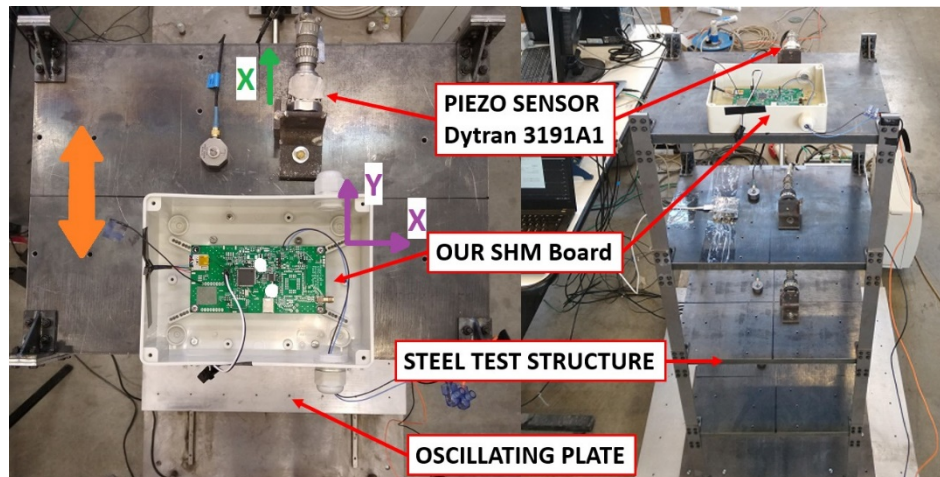


Figura 47. Nodo sensore ed esempio di installazione.

10.1 Firmware e acquisizione dati

Il firmware della scheda è basato su FreeRTOS per garantire l'efficienza e la scalabilità del codice. Sono definiti tre compiti principali:

1. **BC95-G management Task:** gestisce tutte le operazioni di comunicazione e rete tra il modulo NB-IoT e il microcontrollore. L'STM32 controlla le impostazioni iniziali e la prima procedura di connessione; quindi, consente sia la trasmissione che la ricezione dei dati;
2. **SD card Task:** in questo task, l'MCU gestisce la registrazione dei dati sulla scheda SD. Le misurazioni provenienti da diversi sensori e sessioni sono organizzate e salvate in file di testo, fornendo un formato pronto all'uso per gli utenti finali;
3. **Sensor acquisition Task:** in questo task vengono considerate tutte le procedure che riguardano l'acquisizione dei dati dei sensori; in particolare, l'MCU gestisce l'acquisizione e il filtraggio dei dati inerziali dei sensori.

Nell'attività di gestione BC95-G, il microcontrollore gestisce la comunicazione NB-IoT fornendo comandi AT appropriati attraverso una porta seriale UART. Inoltre, la macchina a stati include anche un set completo di funzionalità di ripristino in caso di errori o situazioni impreviste. Ad esempio, quando la connessione all'operatore di rete si blocca o richiede più di 1 minuto, il software ripristina automaticamente il modulo e tenta una nuova connessione.

Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati del sensore, viene implementata un'attività di filtraggio. SHM misura tipicamente le vibrazioni nella larghezza di banda 0-20 Hz, mentre le modalità principali delle strutture civili sono spesso nell'intervallo 0-10 Hz. In caso di eventi stressanti straordinari per la struttura (come un terremoto) le frequenze tipiche possono raggiungere una gamma più elevata, tipicamente fino a 45Hz. Per questo motivo, il nodo SHM fornisce valori di accelerazione a 16 bit sui tre assi a velocità dati di 100Hz. Abbiamo applicato il sovracampionamento sull'ADC a 12 bit del microcontrollore per ottenere 16 bit come ENOB (Effective Number Of Bits) necessario per raggiungere i requisiti di sensibilità e precisione.

Un ulteriore vantaggio associato alla tecnica del sovracampionamento riguarda la post

processing, che facilita l'implementazione dei filtri digitali. Infatti, il filtro digitale FIR (Finite Impulse Response) è ottimizzato direttamente per ARM Cortex-M4 per decimare i dati applicando un filtraggio passa-basso.

L'attività della scheda SD gestisce la registrazione dei dati della sessione. Durante l'esecuzione dell'attività di acquisizione del sensore, i pacchetti con i dati filtrati vengono salvati su una scheda SD in un formato di file di testo. Viene utilizzata una tecnica di buffering doppio tra questa attività e l'attività del sensore.

10.2 Stima della durata della batteria

Sono state effettuate diverse misurazioni di corrente in più condizioni operative per caratterizzare il comportamento del sensore SHM.

Per ogni fase di acquisizione e trasmissione, il modulo NB-IoT invia 1300 B, ogni pacchetto è composto da 650 campioni filtrati (profondità 16 bit per campione) salvati sulla scheda SD e successivamente trasmessi. In Figura viene rappresentato come il consumo di energia varia con il numero di pacchetti (N_{pkt-TX}).

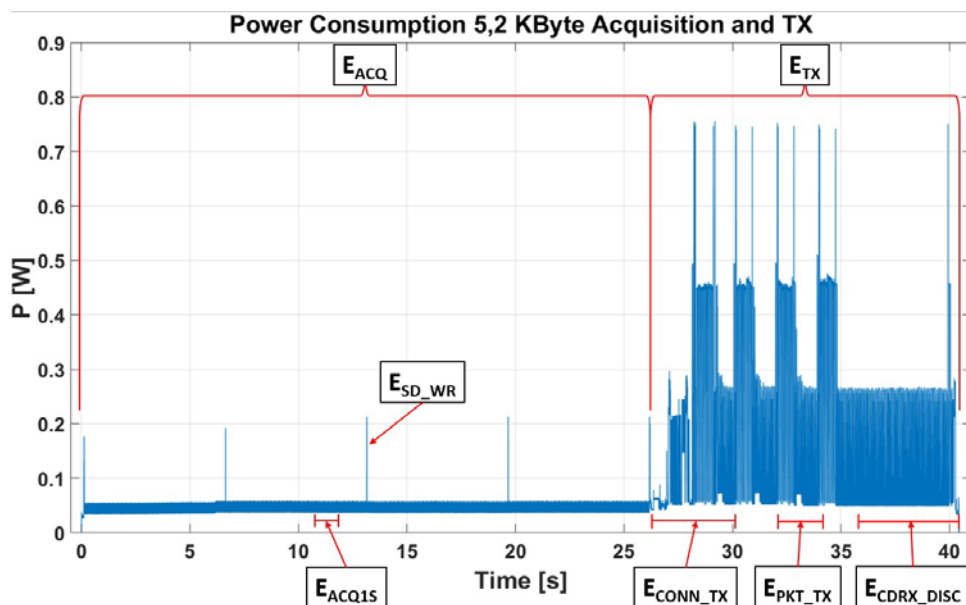


Figura 48. Diversi contributi energetici dei vari task allineati su una trasmissione dei dati accelerometrici

La batteria selezionata per la nostra applicazione è prodotta da SAFT, denominata LS336000. È una batteria litio-cloruro ($Li\ SOCl_2$) nella cella primaria, è ideale per applicazioni a lunga operatività con la sua capacità di 17Ah in un formato di cella a cilindro formato D.

Il totale energia disponibile presso questa batteria è 226440J. La Figura sotto mostra la durata della batteria (in anni) in funzione del tempo di acquisizione per ogni sessione e il numero di sessioni al giorno. Il tempo di acquisizione tracciato in figura va da 4 minuti a 20 minuti, ma può essere inferiore o superiore a seconda dell'applicazione. Mostriamo quattro diverse curve in base al diverso numero di sessioni al giorno: 1, 2, 4, 6. Si noti che una configurazione con non più di 7 minuti di tempo di acquisizione e una sessione al giorno, è necessaria per raggiungere dieci anni di durata, con 84 kB trasmessi quotidianamente. D'altra parte, acquisizioni molto frequenti possono scaricare la batteria abbastanza rapidamente. Ad esempio, 6 sessioni con 20 minuti di misurazione consumano la carica della batteria in 214 giorni, perché ogni giorno

vengono trasmessi 1,44 MB.

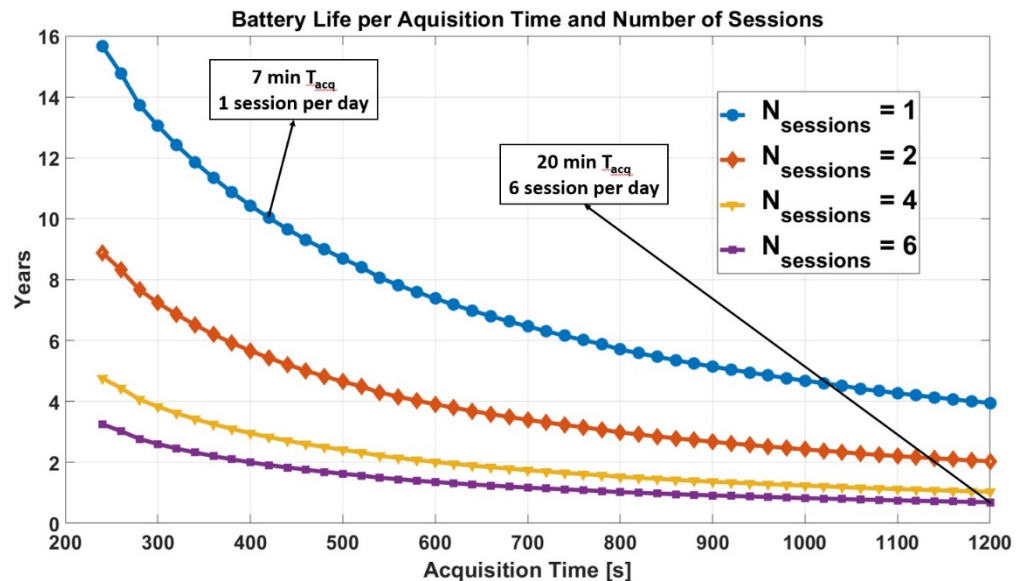


Figura 49. Stima della durata della batteria: in funzione del tempo di acquisizione dei sensori e del numero di sessioni al giorno

10.3 Validazione in laboratorio

Per verificare la correttezza delle acquisizioni e per verificare l'accuratezza di misura del nodo sensore SHM, abbiamo valutato il sistema in presso laboratorio di ingegneria strutturale dell'università di Bologna. La struttura di prova è un telaio acciaio ed è montata su una tavola vibrante che può applicare vibrazioni programmate per simulare i comportamenti tipici degli edifici. Il sensore utilizzato come riferimento è un trasduttore piezoelettrico ad alta precisione, il Dytran 3191A1. È specificamente progettato per applicazioni SHM e utilizzato in strumentazione di fascia alta, come riportato in diversi studi a partire dal 2010.

Una vibrazione con spettro di rumore bianco è stata imposta alla tavola vibrante per vedere le prime quattro modalità di vibrazione della struttura su 2,8 Hz, 8,4 Hz, 13,1 Hz e 16,2 Hz. I dati provenienti dal Dytran 3191A1 e dal LIS344ALH sono stati registrati in sessioni di misurazione multiple di 180 s. La Fig. 8 mostra le due FFT risultanti. Si noti che i dati di LIS344ALH consentono di rilevare le modalità di vibrazione previste, così come il Dytran 3191A1. Inoltre, non ci sono altre componenti di frequenza impreviste. I valori esatti di frequenza calcolati dai due sensori sono mostrati in Figura. La differenza è massima dello 0,08%; confermando che gli accelerometri MEMS analogici a basso costo possono essere utilizzati per la valutazione degli edifici in SHM.

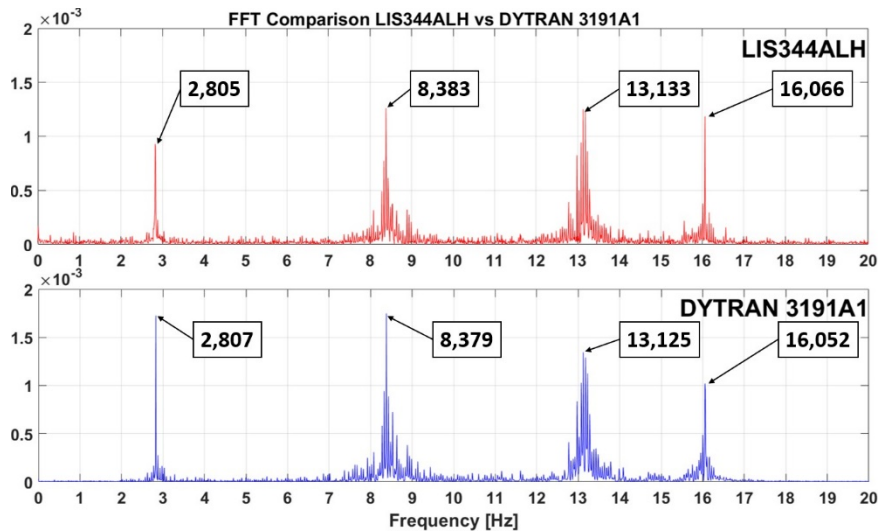


Figura 50. Analisi FFT dei dati di Dytran 3191A1 (grafico in basso) e LIS344ALH (grafico in alto); I valori vicino ai toni sono la frequenza precisa.

Dopo i test di confronto, è stata eseguita una simulazione di rilevamento dei danni. La struttura in acciaio utilizzata nelle prove può essere modificata per simulare danni specifici, e sono state simulate 2 diverse situazioni, sostituendo le colonne della struttura in acciaio con altre più sottili.

La Figura mostra la FFT di 3 misure; Il primo tono modale è dettagliato per evidenziare lo spostamento di frequenza. Si noti che il primo tono modale con struttura non danneggiata (Label NESSUN DANNO) è a 2,807 Hz, ma quando una colonna della struttura viene sostituita con una più sottile che simula danni leggeri (Label DAMAGE 1), la frequenza del primo tono modale si sposta di 0.089 Hz (2,718 Hz). Nell'ultimo test 4 colonne della struttura vengono sostituite con altre più sottili per simulare un danno moderato (Label DAMAGE 2), e questo può essere chiaramente misurato nella frequenza risultante del primo tono modale 2.284 Hz (0,523 Hz in meno rispetto alla struttura "non danneggiata").

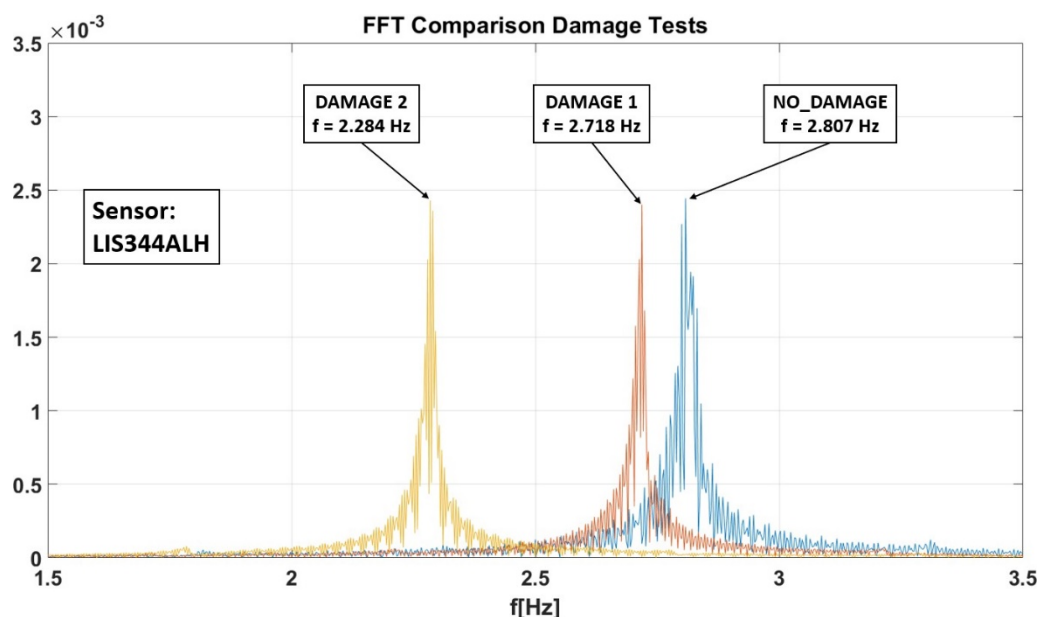


Figura 51. Analisi FFT di LIS344ALH in 3 test: struttura non danneggiata (NESSUN DANNO), struttura leggermente danneggiata (DAMAGE 1) e struttura danneggiata (DAMAGE 2)

La stessa analisi è stata eseguita con i dati raccolti dal sensore inclinometrico IIS2CLX. I risultati mostrano frequenze modali simili, una differenza inferiore allo 0,3%. In Fig.10 è riportato il risultato del test, con lo spostamento di frequenza nei 3 casi. IIS2CLX è un sensore digitale con funzioni programmabili integrate come un Processore di Machine Learning e filtro passa-basso programmabile. L'accelerometro IIS2CLX potrebbe essere una soluzione praticabile se l'obiettivo principale è la riduzione dei costi o se l'applicazione ha bisogno di uno scale-up a centinaia o migliaia di misurazioni.

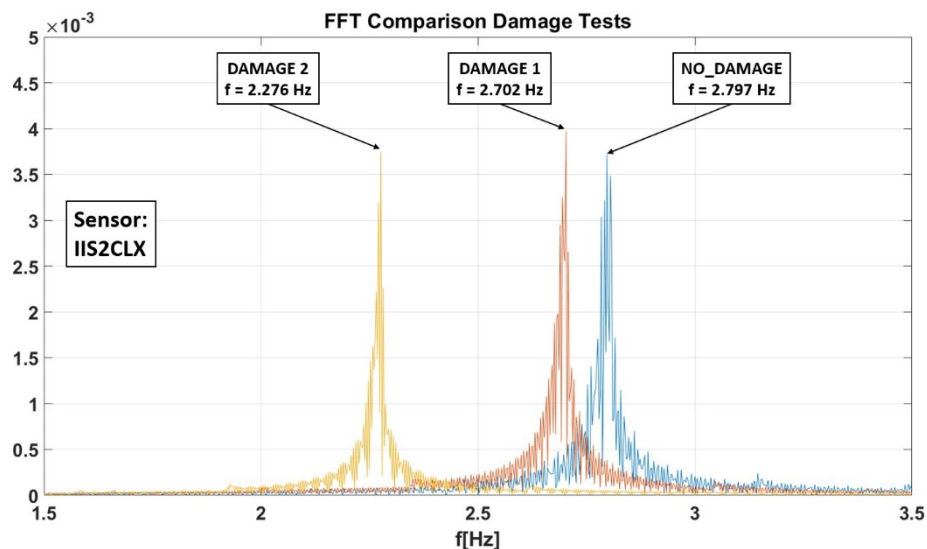


Figura 52. Analisi FFT di IIS2CLX in 3 test: struttura non danneggiata (NESSUN DANNO), struttura leggermente danneggiata (DAMAGE 1) e struttura danneggiata (DAMAGE 2)

10.4 Considerazioni

Al giorno d'oggi, la capacità di monitorare l'integrità di un'ampia varietà di edifici con misurazioni a basso costo e in tempo reale è essenziale sia dal punto di vista economico che della sicurezza della vita. In WP, abbiamo proposto un nodo sensore wireless completamente svincolato specificamente progettato per supportare l'analisi modale a lungo termine con connettività a lungo raggio a basso consumo energetico. Abbiamo analizzato e sintonizzato i principali parametri del protocollo di comunicazione NB-IoT, scelto perché fornisce connettività wireless alla rete infrastrutturale globale 4G (e 5G) a basso consumo energetico, adatta al monitoraggio continuo. Abbiamo fornito un confronto tra i più recenti moduli NB-IoT sul mercato e selezionato il più appropriato per uno scenario SHM continuo. Abbiamo presentato la progettazione, sia hardware che software, di un nodo SHM in grado di operare senza manutenzione per più di 10 anni, o anche indefinitamente con il supporto di un pannello solare.

Abbiamo convalidato l'accuratezza di misura del sistema confrontando i nostri dispositivi a basso costo con un trasduttore piezoelettrico all'avanguardia utilizzato nella strumentazione commerciale di fascia alta per installazioni cablate temporanee.

I risultati mostrano una differenza inferiore allo 0,08% nell'accuratezza della stima delle frequenze di vibrazione modale, con un costo riduzione di circa 10 volte. Inoltre, la soluzione progettata in INSIST consente facilità di implementazione grazie alla totale assenza di cavi e lunghi durata dell'operazione. Test di validazione in laboratorio sui danni strutturali emulati confermano l'usabilità della nostra soluzione in applicazioni SHM.

11 NODI sensore basati su Raspberry Pi4

Lo scopo dell'attività è stato di caratterizzare accelerometri MEMS digitali, in modalità high performance e low-power. Sono stati condotti esperimenti anche per valutare la sincronizzazione tra diversi nodi utilizzando un protocollo NTP. E' stata realizzata una scheda prototipo e un software apposito per realizzare la sincronizzazione.

11.1 Scheda prototipo RPi4

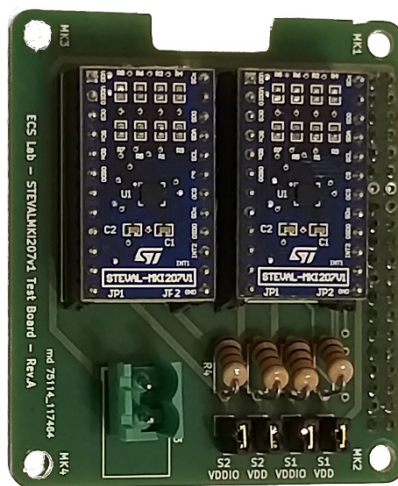


Figura 53. Scheda nodo sensore prototipale per MEMS ISM330DHCX

Sviluppo di un nodo sensore sperimentale per misure inerziali multi-sensore con le seguenti caratteristiche:

- Nodo di calcolo: Raspberry-Pi4
- Accelerometri 2x STEVAL-MKI207V1 con accelerometri ISM330DHCX.
- Configurazione accelerometri:
 - o MEMS 1 configurato in High-Performance mode (HP) @ 833Hz
 - o MEMS 2 configurato in Low-Power mode (LP) @ 52Hz
- Protocollo di sincronizzazione NTP su rete locale ethernet con un nodo eletto a riferimento temporale.
- È stato progettato un PCB per espandere una scheda RPi4 in grado di ospitare 2 integrati MEMS e le relative resistenze di shunt per la misurazione dei consumi di corrente in tempo reale.

Sfruttando le capacità del sensore ISM330DHCX è stato possibile sviluppare un sistema di acquisizione dati a basso costo e di facile prototipizzazione. Il sensore permette di programmare l'acquisizione contemporanea di dati accelerometrici, giroscopici e di temperatura. Usando la capacità di memorizzazione interna del sensore è stato programmato il salvataggio dei campioni direttamente all'interno di una memoria FIFO capace di disaccoppiare l'acquisizione dei campioni

da parte del sensore dalla lettura degli stessi da parte del sistema di calcolo, rappresentato in questo caso dal processore BCM2711 di cui è provvista la scheda prototipale. Senza la necessità di sviluppare un firmware ad-hoc per l'interazione con il sensore è stato possibile configurare il sensore, la FIFO e leggere i dati da quest'ultima tramite una interfaccia SPI (è anche possibile usare un bus I²C).

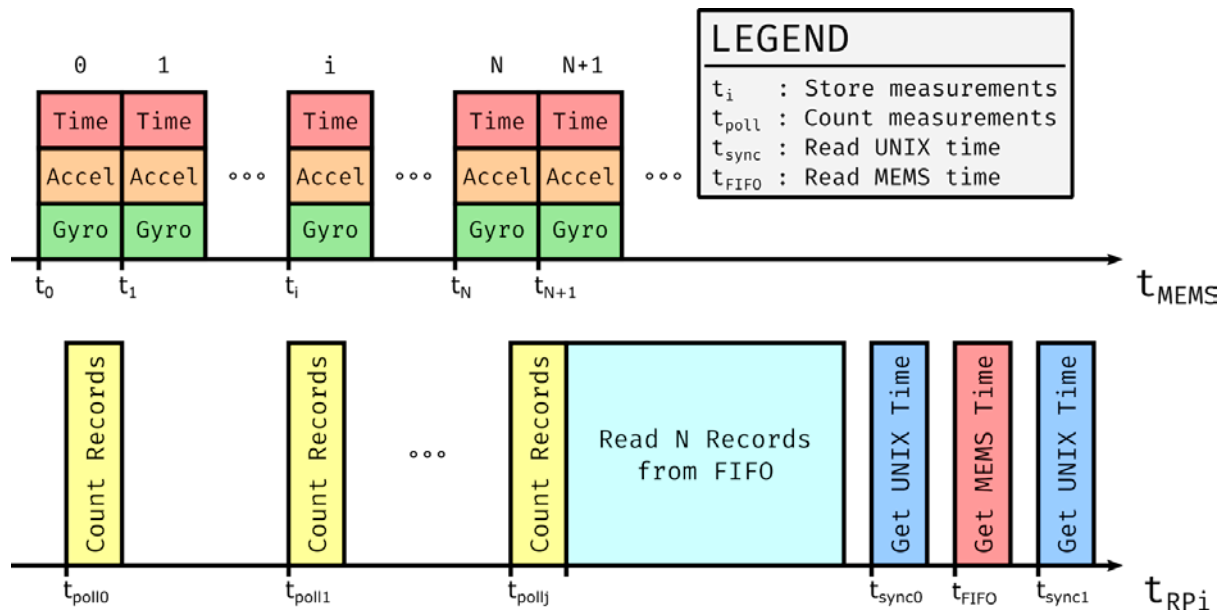


Figura 54 Diagramma temporale dell'acquisizione di campioni dal sensore

Non è possibile fornire al sensore un segnale di clock esplicito per le funzioni di campionamento. È stato quindi sviluppato un sistema ad-hoc per poter sincronizzare N sensori tra di loro.

In Figura 8 sono rappresentate, nella parte alta dell'immagine, le fasi di acquisizione e memorizzazione dei campioni nella FIFO del sensore ISM330DHCX. Viene esplicitata la direzione temporale come t_{MEMS} che rappresenta il dominio temporale dato dal clock interno al sensore e t_{RPI} il dominio temporale del BCM2711.

Nella parte bassa della figura vengono descritte due fasi, nella prima il dispositivo interroga sporadicamente il sensore per conoscere lo stato interno della FIFO. Quando il sistema si accorge che ci sono sufficienti elementi all'interno della memoria, avvia una fase di download dei dati tramite SPI. Successivamente, viene costruita un'ancora temporale tra due riferimenti temporali ("Get UNIX Time", in figura) interni al sistema ospitante (Host), in questo caso il processore BCM2711 della RPi4. Viene interrogato il sensore in modo da ottenere un riferimento temporale del MEMS ("Get MEMS Time" in figura). In questo modo è possibile costruire per interpolazione lineare un modello che legghi tra loro i riferimenti temporali del MEMS ed i riferimenti temporali del sistema Host.

È quindi possibile ricostruire l'istante di acquisizione del campione sul riferimento temporale del sistema Host.

La sincronizzazione multinodo è stata ottenuta tramite il protocollo NTP. Tutte le schede RPi sono collegate tra loro tramite protocollo IEEE 802.3ab (1000BASE-T Gbit/s Ethernet). Il protocollo NTP è stato configurato identificando come riferimento temporale (stratum 1) un nodo sensore il cui tempo diventa riferimento per tutti gli altri nodi.

La sincronizzazione dei dati viene quindi derivata da un sistema a due passaggi. Ogni nodo sincronizza sul proprio asse temporale i riferimenti di tempo introdotti dal MEMS. Questa operazione viene eseguita per entrambi i sensori, sia in Low Power che in High Performance. Il protocollo NTP si preoccupa di sincronizzare i riferimenti temporali tra tutti i nodi sensori. Si ottengono in questo modo i tempi di acquisizione di ogni sensore riferiti sul tempo NTP dello stratum 1. È possibile in seguito calcolare per interpolazione i valori dei sensori in modo da far coincidere i campioni sull'asse

temporale. Sperimentalmente si è ottenuto in media un range di errore di sincronizzazione inferiore a 10 μ s..

11.2 Valutazione della sincronizzazione

La sincronizzazione è stata ottenuta con NTP su una rete IEEE 802.3ab cablata e misurata in laboratorio tramite le seguenti operazioni:

- Sono stati configurati 10 nodi sensori. Ogni nodo sensore è provvisto di un ISM330DHCX configurato in High-Performance con frequenza di campionamento a 833Hz e di un secondo ISM330DHCX configurato il Low Power con frequenza di campionamento a 52Hz. I nodi sensore sono collegati ad una macchina MTS Landmark attraverso una piastra metallica.



Figura 55 MTS Landmark e accelerometri pronti per la prova con forzante sinusoidale

- La macchina MTS in Figura 9 applica uno stimolo armonico con un frequenza principali di 1, 5, 10 e 30 Hz e ampiezze di 0.05, 0.10 e 0.20g.
- Le tracce (Figura 4) misurate vengono raccolte e sincronizzate. Successivamente sono confrontate con le relative tracce misurate tramite un sensore piezoelettrico posto sulla stessa piastra metallica ed usato come riferimento.

- Il ritardo di sincronizzazione è stimato attraverso il ritardo del segnale misurato tra i nodi.

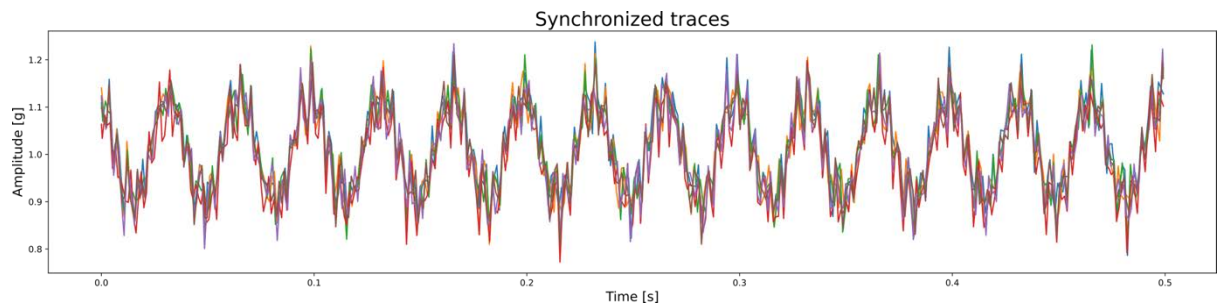


Figura 56 Tracce accelerometriche ottunteute dai MEMS durante lo stimolo sinusoidale

Le misurazioni del ritardo mostrano un errore di sincronizzazione inferiore ai 10us. Una incertezza di sincronizzazione di 10us è sufficiente per la stima modale su una struttura del reale, validando il sistema ad poter essere testato in contesti applicativi.

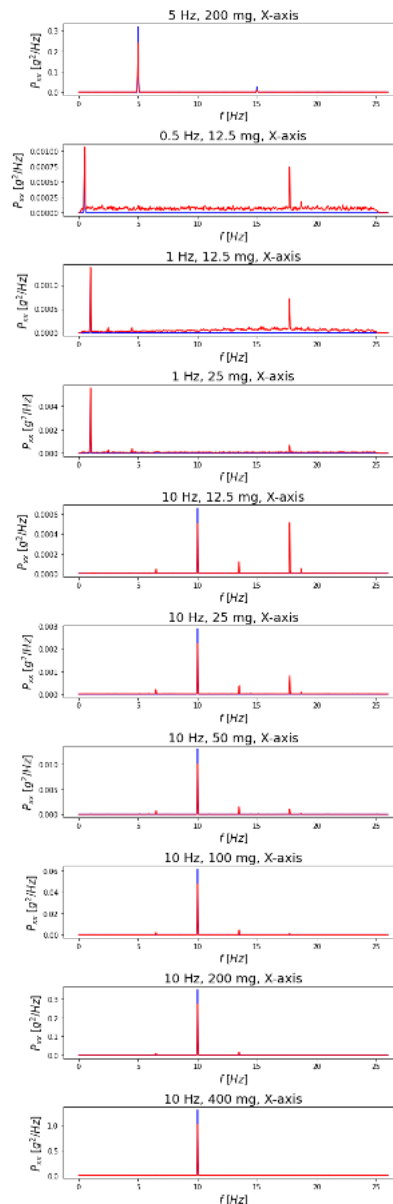


Figura 57 Picchi in PSD su test con forzante sinusoidale

	PCB	LIS	ISM _H	ISM _L
$\mu g/\sqrt{Hz}$	10.28	23.98	65.86	436.20
mg_{RMS}	0.06	0.12	0.35	2.19

Tabella 9 Valori di rumore

11.3 Analisi del rumore

Nella Tabella 1 sono riportati i valori di rumore confrontando un sensore piezoelettrico (PCB), un accelerometro analogico (LIS) e i MEMS digitali in modalità high performance (ISM_H) e low-power (ISM_L). Si evidenzia come il livello di rumore sia elevato per la modalità low-power. La modalità low-power tuttavia consente di effettuare analisi modale alle frequenze di interesse. Il problema si riscontra (Figura 11 Picchi in PSD su test con forzante sinusoidale) quando, a causa di un problema di reiezione dovuta alla presenza di elevato rumore ad altra frequenza che rende il filtraggio meno efficiente, si evidenziano alcuni picchi spuri. Al contrario, in high performance questo problema non sussiste, rendendo l'uso di MEMS completamente adeguato al riconoscimento dei modi nei casi studiati. In questa tipologia di MEMS, infatti, in low power e in normal mode il consumo è abbassato mediante power cycling; in presenza rumore fuori banda, il filtraggio non è quindi tale da permettere una reiezione completa. In high performance, invece, dove il campionamento è continuo, il filtraggio è più efficiente e il rumore fuori banda non presenta problemi.

12 IMPATTO ATTESO

L'impatto atteso dalle attività ed i risultati ottenuti per questo OR1 sono molteplici.

Innanzitutto, c'è l'evidenza dell'impegno profuso da tutti i partner nel gettare le basi, sia dal punto di vista tecnologico (sensoristica innovativa, sistemi di installazione e materiali) sia dal punto di vista del sistema di monitoraggio (sviluppo di reference design, software avanzato, algoritmi, cloud), per poter costruire un framework di monitoraggio innovativo, intelligente, integrato e connesso, utilizzabile da enti gestori e pubbliche amministrazioni, con l'obiettivo di:

- migliorare la sicurezza delle infrastrutture su scala urbana e territoriale;
- intervenire tempestivamente e prevenire situazioni critiche o di rischio;
- migliorare la gestione del sistema di trasporto di merci e persone.

Non trascurabile, inoltre, è il fatto che i risultati del progetto INSIST possono indubbiamente portare positivi risvolti occupazionali, a tutti i livelli di competenze.

13 CONCLUSIONI

Nonostante durante le fasi cruciali del progetto ci siano state, purtroppo, delle difficoltà create dall'emergenza COVID-19, tutti i partner hanno mostrato la massima disponibilità a rimodulare le proprie attività e a far sì che tutti i punti dell'OR1 fossero coperti al massimo dalla migliore risposta in termini di qualità e quantità dei risultati ottenuti, confermando un'elevata professionalità nella gestione e implementazione delle attività.

14 RIFERIMENTI

- [1] Pappalardo F, Pennisi A, Guidetti E, Doriani A (inventors). ST Microelectronics s.r.l. (Assegnee) Capacitive pressure sensor for monitoring construction structures, particularly made of concrete, Patent n. US 10,914,647 B2, 2019/ US 20190011320 A1.
- [2] Abbasi M, Bertagnoli G, Caltabiano D, Guidetti E (inventors). ST Microelectronics s.r.l. (Assegnee). Stress sensor for monitoring the health state of fabricated structures such as constructions, buildings, infrastructures and the like, Patent No. EP 3 392 637 B1, 2017. ss