

SAFAP 2018

SICUREZZA E AFFIDABILITA' DELLE ATTREZZATURE A PRESSIONE

La gestione del rischio dalla costruzione all'esercizio a 130 anni dalla prima legge sulla sicurezza delle caldaie a vapore

INAIL

Bologna - 28 e 29 novembre 2018

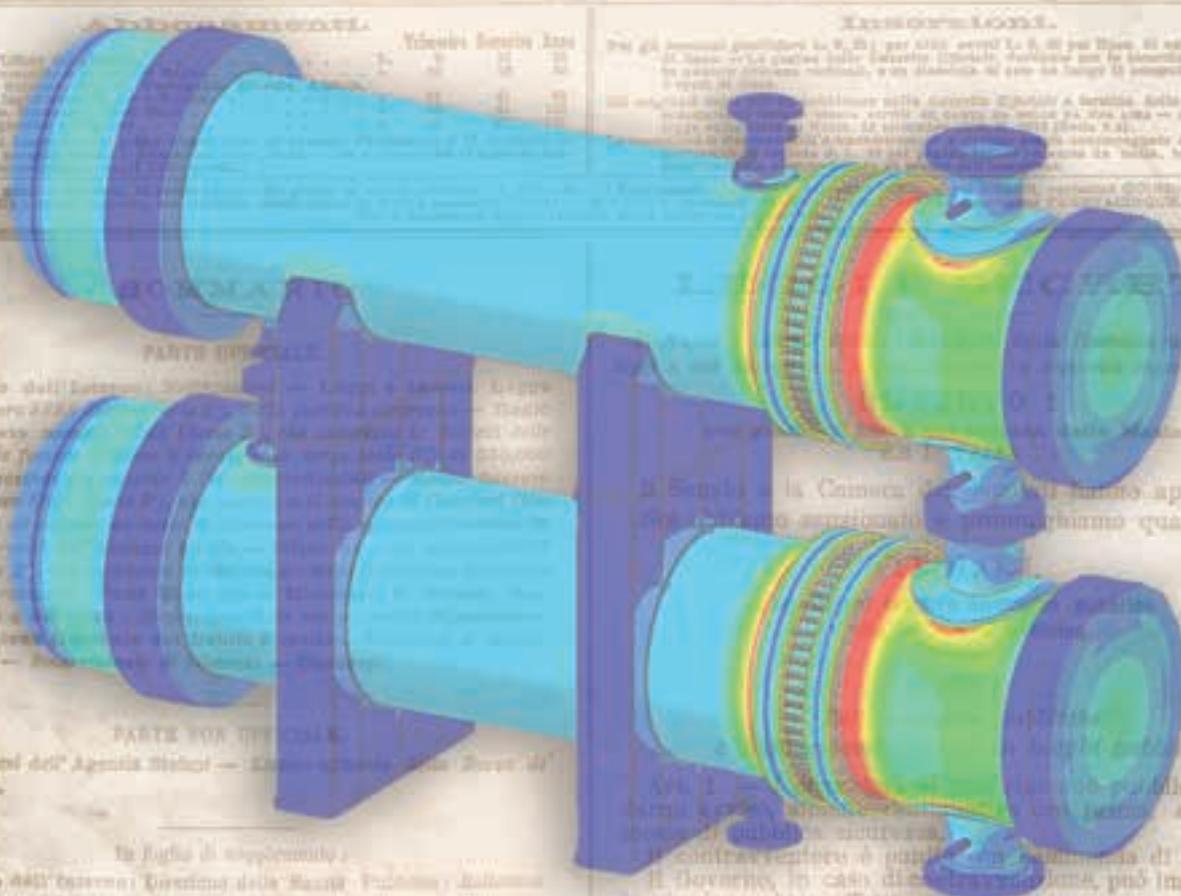
GAZZETTA UFFICIALE

DEL REGNO D'ITALIA

ANNO 1888

ROMA — SABATO 29 GENNAIO

NUM. 22



PARTE UFFICIALE

MINISTERO DELL'INTERNO

Reti di monitoraggio “leggere” basate su un nodo sensore multifunzione

N. Testoni¹, C. Aguzzi², F. Zonzini³, L. De Marchi³, G. Augugliaro⁴, T.S. Cinotti², A. Marzani^{1,2}

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, DICAM, Università di Bologna

² Centro di ricerca sui sistemi elettronici per l'ingegneria dell'informazione e delle telecomunicazioni "Erode De Castro", ARCES

³ Dipartimento dell'Ingegneria Elettrica e dell'Informazione “Guglielmo Marconi”, DEI, Università di Bologna

⁴ Inail - Dit

Sommario

Questo lavoro descrive una rete di micro nodi sensore multifunzione, caratterizzati da un bassissimo consumo di potenza, capacità di elaborazione dati, programmabilità in remoto e funzionalità data-to-cloud. In particolare, ogni nodo sensore equipaggiato con un accelerometro MEMS triassiale è in grado di acquisire le accelerazioni temporali, calcolarne in locale lo spettro delle accelerazioni, estrarne i picchi ed inviarli attraverso un dispositivo gateway sviluppato ad-hoc ad un database on-line. La rete può essere ottenuta mettendo in cascata sullo stesso bus di alimentazione e trasferimento dati fino a 64 nodi sensore. In questo lavoro è stata condotta una prova sperimentale con una rete di 5 nodi sensore per monitorare le vibrazioni libere di una trave in acciaio semplicemente appoggiata. Il peso totale e il consumo energetico dell'intera rete sono rispettivamente inferiori a 50 g e 300 mW in condizioni di monitoraggio continuo. I risultati mostrano un ottimo accordo tra le frequenze di vibrazione nominali e quelle misurate. Come tale, la rete di sensori consente di monitorare a distanza e in tempo reale le frequenze portanti degli spettri di accelerazione, risultando quindi ideale per monitoraggio dinamico di strutture.

1. Introduzione

Il monitoraggio in tempo reale dell'integrità di strutture civili e industriali, disciplina altrimenti nota con l'acronimo SHM (Structural Health Monitoring), sta maturando un crescente consenso nella comunità scientifica anche grazie allo sviluppo di reti di sensori intelligenti capaci di acquisire contemporaneamente dati provenienti da una pluralità di sensori [1]. Obiettivo del SHM è quello di incrementare la sicurezza di infrastrutture critiche, attraverso l'implementazione di sistemi di misura “embedded” che consentano di monitorare in tempo reale alcune caratteristiche peculiari della struttura sensibili al suo stato di salute. Una idea di SHM per strutture civili e industriali è quella di misurare nel tempo, in modo non invasivo, le caratteristiche vibrazionali della struttura, per discernere possibili cambiamenti iscrivibili a potenziali danneggiamenti intercorsi tra le varie misure. L'idea si fonda sull'assunto che in assenza di danneggiamenti il comportamento dinamico della struttura rimane invariato nel tempo.

Il SHM ben si coniuga con l'evoluzione delle moderne tecnologie costruttive che permettono di progettare e realizzare strutture sempre più ardite e complesse a patto che il loro comportamento strutturale sia continuamente controllato attraverso appunto l'estrazione continuativa di informazioni e la loro conseguente analisi. Questo è oggi possibile grazie all'uso di tecniche automatiche di trattamento dei dati che ne semplificano e accelerano i processi di acquisizione e gestione [2], come pure per merito

dell'evoluzione tecnologica delle reti di misura caratterizzate da bassissimi consumi di potenza, minimi costi di installazione e peso ridotto.

In particolare, con l'intento di monitorare sul lungo periodo lo stato di salute della struttura, le soluzioni affermatesi in ambito elettronico hanno portato allo sviluppo di reti di sensori distribuite su ampie superfici, dotate di un'elaborazione locale e in tempo reale dei campioni acquisiti. In questo contesto, l'uso di sensori Micro-Elettromeccanici (MEMS) garantisce, fra i molti benefici, versatilità, scalabilità e minima invasività, che divengono parole chiave in un'ottica di controllo intelligente e continuo nel tempo. La facilità di installazione dei dispositivi elettronici, il loro bassissimo peso, la possibilità di riconfigurarne i processi di acquisizione digitalmente senza alcuna particolare conseguenza per la struttura, favoriscono sia la loro implementazione che l'indipendenza dell'azione di monitoraggio dall'operatore.

Il presente lavoro propone una soluzione per il monitoraggio in tempo reale delle vibrazioni strutturali mediante una rete di nodi sensore, ognuno dei quali integra al suo interno un accelerometro MEMS triassiale con capacità di processamento locale delle storie di accelerazione misurate, in modo da estrarne lo spettro di potenza (PSD) e le frequenze portanti. Il caso di studio analizzato è basato su una rete costituita da cinque nodi sensori, installati su una trave in acciaio, nella quale i vantaggi hardware si affiancano a metodi avanzati di elaborazione per la stima di parametri modali. La circuiteria presentata, descritta nella seconda sezione, soddisfa esigenze fondamentali di basso consumo di potenza, peso leggero e dimensioni ridotte. Per calcolare la densità spettrale di potenza (PSD) dei dati di accelerazione acquisiti, come pure per ricavare le proprietà modali dei modi principali di vibrare della struttura, sono stati implementati approcci parametrici e non parametrici (sezione 3). Nella quarta sezione si presentano algoritmi nel dominio del tempo (TDD) e della frequenza (FDD), che insieme all'identificazione a sorgenti indipendenti del secondo ordine (SOBI), sono stati implementati per la ricostruzione delle forme modali. La descrizione dei risultati ottenuti a valle della sperimentazione sono riassunti in sezione 5. Accanto ad una soddisfacente sovrapposizione tra valore atteso e dati estratti sperimentalmente, la rete di sensori proposta si contraddistingue per una analisi completamente automatizzata del comportamento modale della struttura osservata, facilitandone quindi il suo controllo in tempo reale. In aggiunta, il nodo sensore sviluppato è in grado di supportare diversi sensori tra i quali piezoelettrici per la misura di emissioni acustiche, termocoppie per la misura di temperatura, come pure inclinometri e strain gauges per la misura di deformazioni locali. Questo fornisce alla rete di monitoraggio proposta flessibilità per poter operare in modo efficace in diversi scenari applicativi.

2. Materiali

2.1 Nodo sensore

Ciascun nodo sensore è dotato di un accelerometro MEM triassiale, ha sia capacità di elaborazione locale dei dati sia di interfacciamento data-to-cloud. In particolare, l'architettura messa a punto è in grado di registrare serie temporali di accelerazione, di calcolarne la risposta in frequenza e di estrarne le frequenze portanti mediante algoritmi di peak-picking (PP). I dati raccolti vengono poi trasferiti in un database online tramite un gateway appositamente realizzato e un protocollo di comunicazione dedicato. Il cuore del sistema è un microcontrollore STM32F3 a 32 bit alimentato a 3.3 V indicato nello schematico di Figura 1 come MCU. Questa unità funzionale appartiene alla categoria di Microcontroller Unit (MCU), prodotti da ST Microelectronics, caratterizzati da funzionalità di Digital Signal Processing (DSP) compatibili con l'esecuzione di istruzioni Floating Point (FPU) a ridottissimi consumi di potenza.

Il clock di sistema è impostato da un oscillatore RC interno a 8 MHz ed innalzato a 64 MHz tramite un Phase-Locked Loop (PLL), mentre la parte di storage è divisa internamente tra una memoria SRAM con capacità 40 KiB e una di tipo FLASH a 256 KiB.

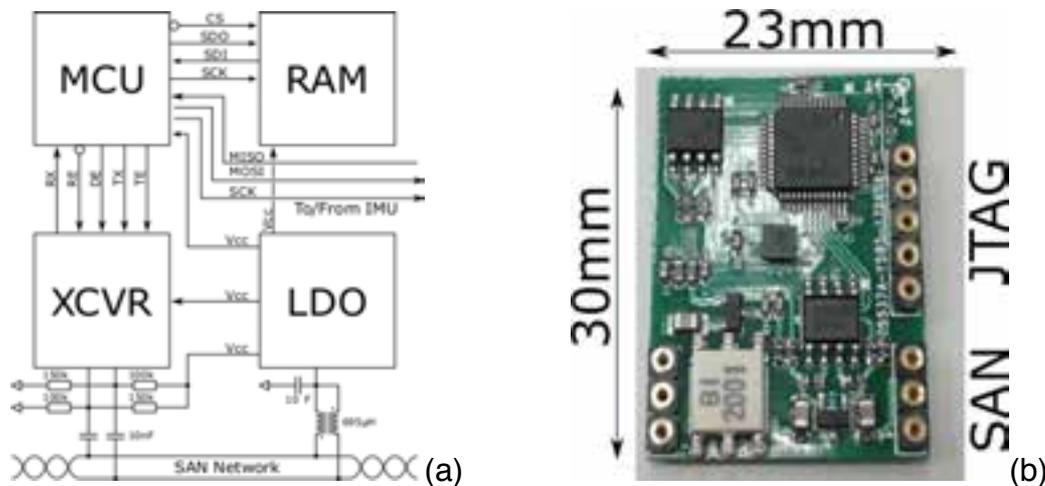


Figura 1. Diagramma schematico del nodo sensore (a) e relativo prototipo realizzato presso il laboratorio del Centro di ricerca sui sistemi elettronici per l'ingegneria dell'informazione e delle telecomunicazioni "Erocole De Castro"(ARCES) (b).

La comunicazione tra il microcontrollore e gli altri elementi è gestita mediante due interfacce seriali integrate: la trasmissione di dati avviene tramite una Serial Peripheral Interface (SPI) o una Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART) ed è indipendente dall'esecuzione del programma grazie alla presenza di generatori di clock, shift register e buffer temporanei interni.

Da un punto di vista del consumo, la corrente di picco registrata quando tutti gli elementi sono attivi alla massima frequenza di sistema, pari a 64 MHz, è inferiore a 40 mA e può essere ridotta a 1.37 mA nel caso di modalità standby.

Una SRAM esterna, accessibile con protocollo SPI, è utilizzata come buffer temporaneo per i campioni pre-elaborati. Caratterizzata da un numero infinito di cicli di lettura e scrittura possibili, presenta anch'essa ridotti consumi. Un Tranceiver (XCVR) consente, invece, di connettere il MCU, tramite interfaccia USART, al bus di sistema costituito da una struttura Sensor Area Network (SAN) e basato su una comunicazione Data over Power (DoP). Il driver è inoltre protetto da sovratensioni per mezzo di una circuiteria di shutdown che impone le uscite in uno stato di alta impedenza. La rete SAN e il XCVR sono collegati per mezzo di una rete di componenti passivi.

Un regolatore di tensione LDO fornisce alimentazione all'intero sensore, fissando la tensione a 3.3 V in modo da ridurre il numero minimo di componenti esterni. L'unità inerziale di misurazione del nodo (IMU), è costituita dalla coppia accelerometro e giroscopio 3D digitale LSM6DSL iNEMO prodotta da ST Microelectronics, in grado di registrare valori di accelerazione fino ad un massimo di ± 16 g ed una velocità angolare di ± 2000 dps. L'accelerometro MEMS triassiale così prodotto dimostra possedere una sensibilità di 825 mV/g e un package complessivo dalle dimensioni di (2.5 mm \times 3.0 mm \times 0.8 mm).

Da un punto di vista operativo, il flusso di elaborazione dell'informazione parte dalla registrazione delle vibrazioni strutturali tramite IMU, passando alla successiva memorizzazione dei campioni nella RAM interna del microcontrollore. Le istruzioni e i coefficienti del filtro digitale sono invece immagazzinati nella memoria FLASH, in modo da garantire funzionalità di pre-processing embedded. Infine, i dati vengono raccolti nella

SRAM esterna a cui vengono inviati con protocollo SPI, nell'attesa di una successiva elaborazione.

Complessivamente, l'area occupata dall'intero nodo è pari a 30 mm × 23 mm per un peso totale inferiore ai 5 g ed un assorbimento di corrente massimo di 44.8 mA quando il bus è alimentato a 5.0 V. La forte scalabilità dell'architettura, legata alla possibilità di estendere le dimensioni del sistema fino alla connessione di 64 nodi sensore contemporaneamente, rappresenta un ulteriore punto di forza, rendendo la rete di sensori particolarmente promettente per applicazioni di monitoraggio strutturale real-time in termini di consumi, invasività e velocità di funzionamento.

2.2 Online database

Affinché il monitoraggio possa essere eseguito in remoto, i dati misurati dai nodi sensore, una volta immagazzinati, devono essere trasferiti e raccolti online. La tecnologia database implementata nella presente architettura utilizza le istanze di Cassandra2, sistema NoSQL open access, installate in un datacenter remoto.

La raccolta dei dati si fonda sulla presenza di tre chiavi di memorizzazione: ovvero la (i) PARTITION KEY e il (ii) CLUSTERING COLUMNS, che identificano rispettivamente la località dei dati, ovvero righe con la stessa chiave si trovano nello stesso cluster, e la modalità di memorizzazione delle righe stesse, cioè al modo in cui le righe sono ordinate nel singolo cluster consentendo di inserire, cancellare, aggiornare e leggere dati più rapidamente; ed infine, il (iii) TIMESTAMP ovvero l'istante temporale in cui il singolo campione viene registrato. Per la rete progettata, l'identificativo di ogni nodo sensore rappresenta la PARTITION KEY, che viene integrata dall'ordinamento dei dati per valori decrescenti e infine per TIMESTAMP. In questo modo, la tripletta risulta univoca e la query può essere generata con elevato *throughput*, condizione indispensabile in scenari di monitoraggio critici per i quali la capacità di gestire grandi quantità di dati è fondamentale.

3. Estrazione parametri modali

L'analisi modale di una determinata struttura consiste nel valutare la risposta dinamica del sistema in presenza di sollecitazioni libere o indotte da forzanti esterne [3]. Lo studio delle vibrazioni caratteristiche di una struttura, estraibili generalmente a seguito di una analisi in frequenza dei dati raccolti, consente di identificarne e/o stimarne una serie di proprietà strutturali notevoli. In questo contesto, l'obiettivo finale è generalmente quello di ricavare alcune grandezze fondamentali, prime fra tutte le frequenze naturali di vibrazione f_i , i fattori di smorzamento modale ζ_i , le forme modali ϕ_i . Le quantità appena definite vanno a costituire complessivamente il modello modale della struttura, dal momento in cui sono in grado di sintetizzare le informazioni dinamiche in un insieme ridotto di parametri, la cui analisi continuativa è correlabile al livello di integrità del sistema corrispondente.

3.1 Analisi spettrale

Attraverso l'analisi spettrale dei dati di accelerazione registrati si determina il loro contenuto frequenziale ovvero la distribuzione energetica delle diverse componenti armoniche. In particolare, è usuale indicare con $S_{xx}(\omega)$ lo spettro di un segnale discreto $x(n)$ caratterizzato da N campioni. Per il calcolo dello spettro sono stati implementati una molteplicità di algoritmi distinguibili in funzione della tipologia di segnali per i quali sono stati pensati, nonché per l'onere computazionale e la quantità di dati da processare.

Gli stimatori spettrali tradizionali (non parametrici), si suddividono in metodi diretti o indiretti, basati rispettivamente sulla trasformata discreta di Fourier (Discrete Time Fourier Transform - DTFT) oppure sulla funzione di autocorrelazione (Autocorrelation Function - ACF). Tali approcci necessitano di un numero limitato di campioni per poter produrre lo

spettro cercato. In alternativa, le tecniche cosiddette parametriche, si contraddistinguono per la creazione di un modello matematico equivalente del segnale osservato, particolarmente vantaggioso sotto particolari condizioni operative. Nel seguito saranno utilizzate sia tecniche non parametriche che parametriche. Una volta calcolato lo spettro del segnale di accelerazione le vibrazioni naturali della struttura monitorata vengono ottenute mediante strategie di ricerca del picco della funzione $S_{xx}(\omega)$. Queste si fondano solitamente sulla ricerca di un valore di soglia oltre il quale si selezionano i contributi dominanti.

3.2 Ricostruzione forme modali

La ricostruzione delle forme modali ha quale obiettivo quello di identificare l'andamento spaziale dei modi propri di oscillazione della struttura a partire dai segnali di accelerazione registrati da un certo numero di nodi sensore distribuiti lungo la struttura. All'aumentare della dimensione del numero di sensori e della durata del monitoraggio, la ricostruzione diviene sempre più precisa ed è pertanto indispensabile soddisfare esigenze di sincronizzazione e gestione efficiente dei valori estratti da ciascun nodo sensore.

La ricostruzione di queste curve rappresenta una delle sfide più avvincenti nel contesto del monitoraggio strutturale, essendo esse intrinsecamente collegate allo stato di integrità della struttura. Le metodologie di calcolo più avvincenti sono di tipo "output-only", ovvero si fondano unicamente sull'elaborazione dei campioni acquisiti senza analizzare nel dettaglio le caratteristiche fisiche dei fenomeni registrati.

Una metrica assodata per validare l'estrazione dei modi di vibrare da dati sperimentali si fonda sul calcolo del parametro MAC (Modal Assurance Criterion), ovvero un indice di correlazione tra i modi identificati al termine dell'analisi modale sperimentale e quelli prodotti da un opportuno modello analitico (analisi modale teorica) [8]. L'output dell'analisi MAC è costituito da una matrice con valori compresi nell'intervallo [0-1], in cui ciascun elemento indica la corrispondenza tra il modo i dell'insieme di forme modali teoriche φ_t e il modo j della forma modale sperimentale φ_s . A livello applicativo, si considerano ottimamente correlati i modi appartenenti a due distinte famiglie φ_t e φ_s se il parametro in esame assume valori maggiori di 0.9 [9]. A livello operativo, una volta ordinati i vettori colonna delle forme modali per valori crescenti di frequenza, il processo di ricostruzione delle curve si può definire preciso qualora la matrice risultante approssimi una matrice diagonale. Ciò significa che la sovrapposizione per modi $i=j$ deve essere prossima all'unità, mentre per modi spuri l'affinità deve tendere a zero.

4. Validazione sperimentale

4.1 Setup

Il setup sperimentale è costituito da una trave di acciaio, le cui proprietà geometrico/meccaniche sono riassunte in Tabella 1. La trave è semplicemente appoggiata agli estremi ed è in grado di vibrare in condizioni di oscillazione libera. Su una metà della trave sono stati posizionati cinque nodi sensore, equamente distribuiti con passo $d=214$ mm come mostrato in Figura 2. La trave è stata eccitata in mezzeria mediante un martello da impatto.

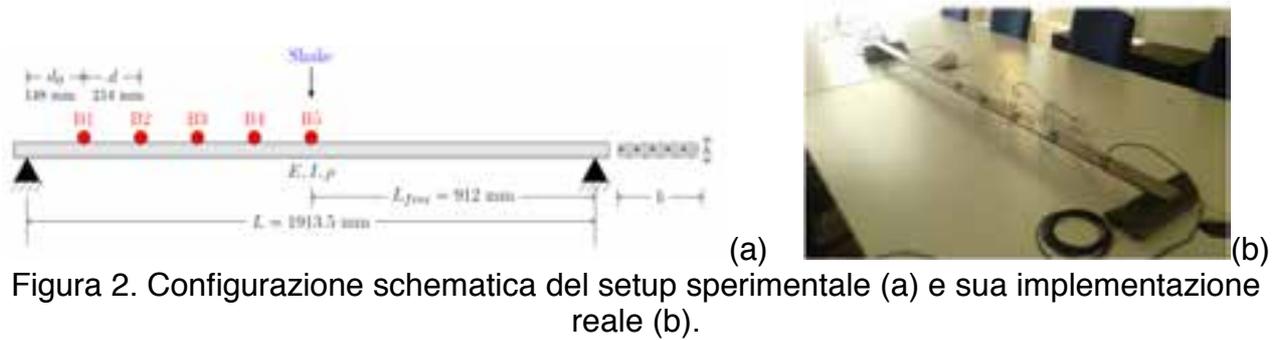


Figura 2. Configurazione schematica del setup sperimentale (a) e sua implementazione reale (b).

Densità (ρ)	7870 kg/m ³
Modulo di Young (E)	200 GPa
Base sezione trasversale (b)	60·10 ⁻³ m
Spessore (h)	10·10 ⁻³ m
Momento di Inerzia (I)	5·10 ⁻⁹ m ⁴

Tabella 1. Parametri caratteristici della trave

L'intento è quello di verificare che l'acquisizione sincronizzata di segnali, ottenuta con nodi sensori multifunzione a basso costo e ridotti requisiti energetici, è in grado di produrre dati ad elevato contenuto informativo, dimostrandosi così affidabili nell'ambito dell'analisi modale in tempo reale. Per questa motivazione si è scelto di testare l'attendibilità della rete progettata all'interno di un ambiente facilmente modellabile anche per via analitica, così da comprovare la qualità dei risultati rispetto ad un noto riferimento teorico. Da un punto di vista energetico, l'architettura realizzata prevede un consumo complessivo inferiore a 300 mW in condizioni di monitoraggio continuo e un peso dell'intera circuiteria minore di 50 g.

Per il caso in esame la formula chiusa di Equazione (1) consente di stimare algebricamente le frequenze di vibrazione naturali della trave:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \frac{(n\pi)^2 \sqrt{E \cdot I}}{L^2 \cdot A \cdot \rho} \quad (1)$$

in cui n indica l'ordine dell'armonica considerata, $A=b \cdot h$ identifica l'area della sezione ortogonale della trave ed L la distanza effettiva tra gli appoggi, che nel caso specifico in esame sono stati supposti ideali. Il peso della rete di nodi sensore, pari allo 0,5 % del peso della trave (9,69 kg) è stato trascurato nel calcolo delle frequenze di vibrare.

In accordo con la (1), le prime tre frequenze di oscillazione risultano rispettivamente pari a $f_1=6.243 \text{ Hz}$, $f_2= 24.972 \text{ Hz}$, $f_3=56.188 \text{ Hz}$. Sperimentalmente, si è deciso di operare con una frequenza operativa massima di 200 Hz, su buffer di 6000 campioni.

4.1 Spettro di accelerazione

Nel presente lavoro sono state considerate tecniche di analisi spettrale non parametriche, quali il periodogramma e la sua versione ottimizzata secondo Welch, insieme approcci di decomposizione in frequenza. Parallelamente, sono state eseguite stime applicando alcune strategie parametriche autoregressive (AR), con particolare riferimento al modello di Burg e all'algoritmo AR+Noise, ideale in condizioni di forte rumore di fondo. Gli spettri di accelerazione risultanti dall'implementazione delle diverse tecniche per una serie di accelerazione verticale (piano di flessione della trave), misurata al nodo B3 di Figura 2.a, è riportato in Figura 3.

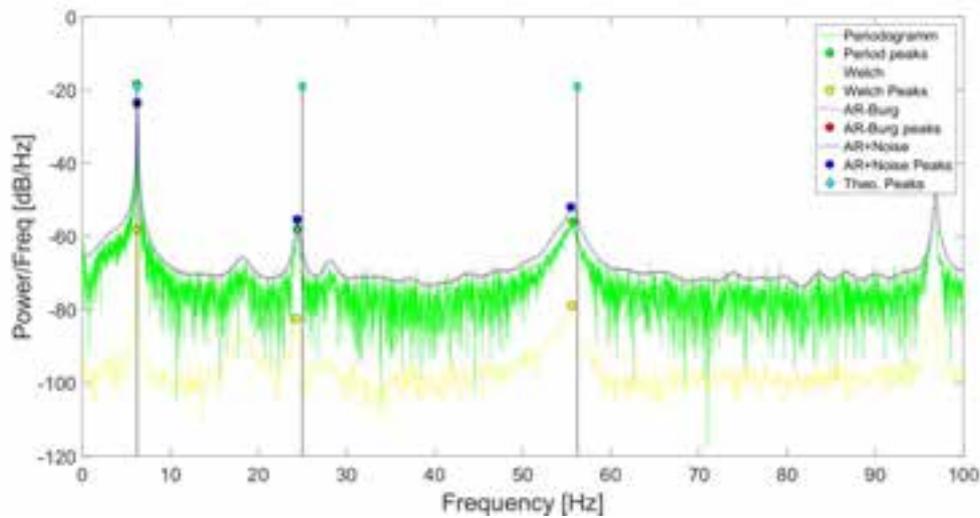


Figura 3. Confronto fra diversi stimatori spettrali considerate per una storia accelerazione misurata al nodo B3.

Gli andamenti spettrali calcolati palesano immediatamente la predominanza del primo modo di vibrare, ovvero quello a frequenza minore. La Figura 3 mostra, inoltre, un buon accordo tra i risultati sperimentali e le frequenze calcolate secondo l'equazione (1), indicate con delle linee verticali continue. In accordo con la posizione di impatto scelta, prossima al punto antinodale della prima armonica di vibrazione, il primo modo viene sollecitato in corrispondenza del suo massimo e risulta perciò prevalente, mostrando un rapporto segnale-rumore (SNR) di circa 40 dB rispetto agli altri. Analogamente, la seconda armonica risulta scarsamente eccitata in quanto presenta un punto nodale nella posizione di eccitazione. Le osservazioni appena esposte giustificano la distribuzione dell'errore relativo commesso, rappresentato dagli istogrammi di Figura 4. In particolare, è stato possibile calcolare l'errore grazie al fatto che i parametri caratteristici della trave, in ingresso all'espressione (1), sono noti con precisione. Per ciascuna tecnica implementata, l'errore relativo percentuale e_n commesso nella stima della frequenza di ordine n è stato calcolato come media tra i valori estratti da ciascun nodo, mediante la formula di equazione (2)

$$e_n = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \frac{|f_s - f_n|}{f_n} \cdot 100 \quad (2)$$

in cui $S=5$ indica il numero di sensori utilizzati, f_s si riferisce alla frequenza individuata sperimentalmente sul singolo nodo ed f_n coincide con la corrispondente frequenza teorica prevista da modello analitico.

Nello specifico, tutte e quattro le strategie utilizzate mostrano un errore inferiore allo 0.5% nell'estrazione della frequenza fondamentale f_1 . L'errore cresce percentualmente nella estrazione della seconda frequenza di vibrare rimanendo tuttavia inferiore al 2.5%. Per l'estrazione della seconda armonica, dove il margine rispetto al rumore non va oltre i 10 dB, la prestazione migliore è restituita dalla tecnica autoregressiva. Anche la terza componente viene individuata con ottima accuratezza, mostrando percentuali di errore intorno all'1%. Gli algoritmi proposti, al di là della particolarità intrinseca all'eccitazione del secondo modo, non mostrano particolari differenze in termini di performance e possono pertanto ritenersi ugualmente efficienti per l'analisi proposta.

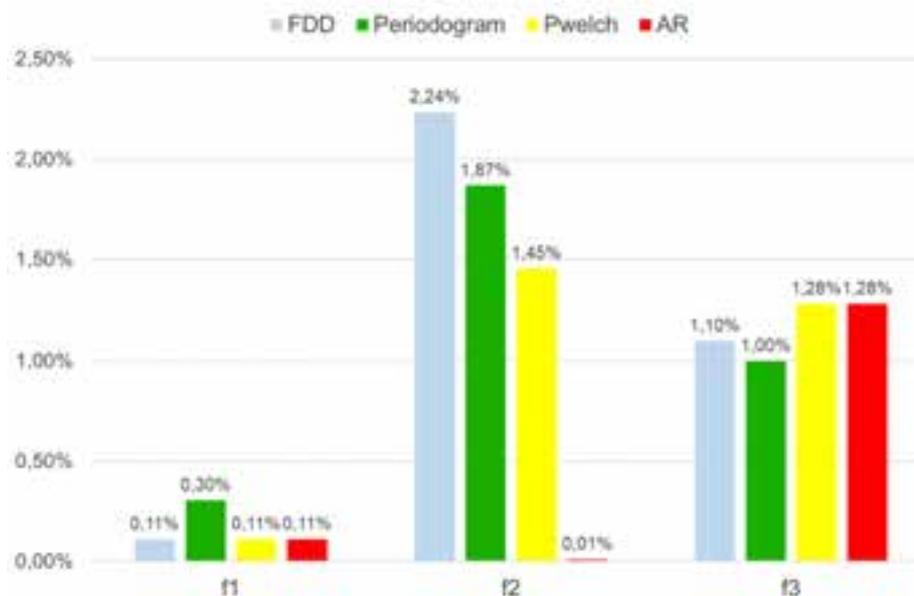


Figura 4. Distribuzione dell'errore relativo nell'estrazione delle frequenze di vibrazione mediante differenti tecniche non parametriche e parametriche di analisi spettrale.

4.2 Ricostruzione forme modali

Grazie alla sincronizzazione temporale dei campioni estratti dai cinque sensori, intrinsecamente garantita dalla soluzione di bus adottata, è stato possibile procedere con la stima output-only delle forme modali. Sono stati implementati algoritmi tradizionali nel dominio della frequenza, i.e. la Frequency Domain Decomposition (FDD), e del tempo, i.e. Time Domain Decomposition (TDD), unitamente alla tecnica SOBI (Second Order Blind Identification) che identifica le forme modali nelle componenti indipendenti nascoste all'interno di un set di segnali misurati [4]. La FDD si fonda sull'applicazione della decomposizione a valori singolari (SVD) alla matrice di densità spettrale [5], mentre nella tecnica TDD viene calcolata la SVD della matrice di correlazione energetica, ottenuta da dati filtrati nell'intorno delle frequenze di vibrazione attese [6].

Le curve di Figura 5, in cui si riportano i primi tre modi estratti con le tre differenti tecniche analizzate, rivelano una sovrapposizione praticamente perfetta tra dato atteso e dato sperimentale per il primo modo di vibrare, indipendentemente dall'algoritmo utilizzato. La deviazione dal modello analitico è, ancora una volta, più pronunciata ad alta frequenza e per l'approccio SOBI, dove si manifestano i discussi fenomeni di rumore indesiderato. Coerentemente con quanto riportato in letteratura [7], la tecnica SOBI risulta meno indicata rispetto agli approcci tradizionali in quelle situazioni di basso rapporto segnale/rumore visto che è pensata per processare sorgenti di segnale i cui picchi energetici sono circa equivalenti e l'oscillazione indotta stazionaria. In scenari reali, caratterizzati da bassi valori di SNR, il rumore può deteriorare i risultati ottenuti con questo approccio, specialmente per il ridotto insieme di operazioni di pre-processamento che vengono applicate ai campioni in ingresso.

Tuttavia, occorre sottolineare che il metodo SOBI è completamente non supervisionato, poiché richiede una minima o nulla conoscenza a priori sul tipo di eccitazione presente, risultando quindi un metodo particolarmente promettente per una rilevazione autonoma del danno in molteplici scenari. In aggiunta, questo metodo prescindendo dal calcolo della SVD, diventa particolarmente vantaggioso dal punto di vista computazionale in ampie e distribuite reti di monitoraggio.

A conferma dei risultati prodotti, analizzando la diagonale principale delle matrici di MAC prodotte per la tecnica TDD (Figura 6(a)) e SOBI (Figura 6(b)), vengono raggiunte percentuali simili, evidenziate da analoghe intensità: accanto a valori prossimi all'unità per il primo modo, si osservano correlazioni via via meno accentuate al crescere della frequenza. L'importanza dell'indice di sovrapposizione modale proposto si traduce dunque nella capacità di quantificare la bontà del dato sperimentale al di là dell'evidenza empirica, fondando cioè l'analisi in tempo reale sulla presenza di parametri oggettivi, facilmente controllabili da remoto e manipolabili per via algebrica.

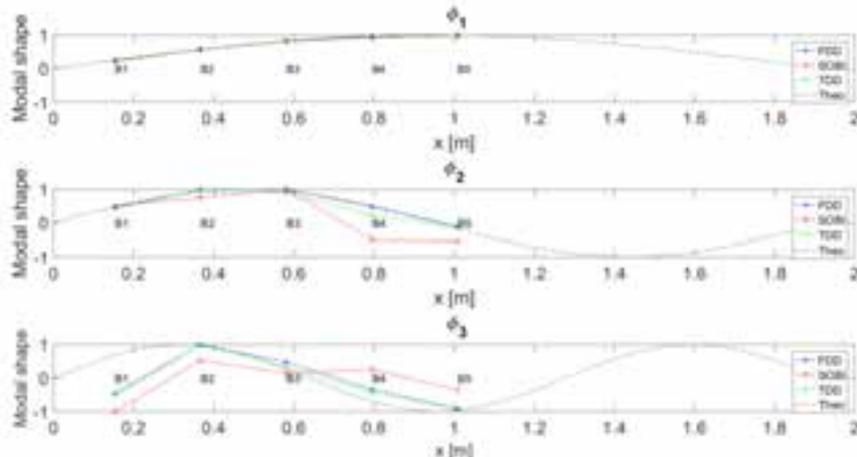


Figura 5. Prime tre forme modali ricostruite con tre differenti tecniche di analisi: Frequency Domain Decomposition (FDD), Time Domain Decomposition (TDD) e Second Order Blind Identification (SOBI).

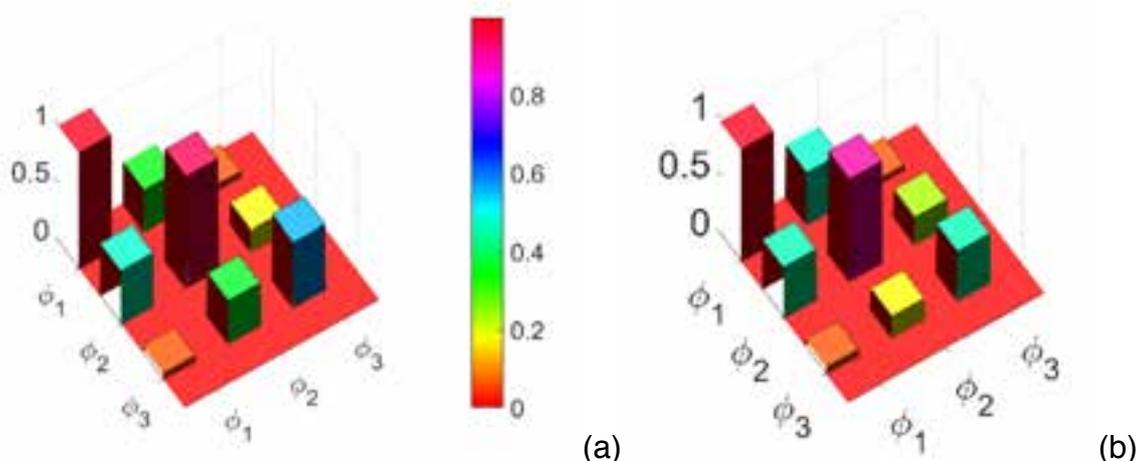


Figura 6. Valori di MAC per la Time Domain Decomposition (TDD) (a) e per la Second Order Blind Identification (SOBI) (b).

5. Conclusioni

Il lavoro mostra come la rete di micro nodi sensore multifunzione progettata consente di estrarre le frequenze di vibrazione e i modi di vibrare di una trave in flessione. Per quanto semplice, il caso studio mostra come la rete di monitoraggio proposta, grazie alla sua facilità di implementazione (basso peso, basso costo e basso consumo di potenza), risponde in maniera estremamente precisa alle necessità di analisi modale, configurandosi come soluzione ideale in tutti quei casi in cui sia necessario monitorare sul lungo periodo, in tempo reale e con minimi consumi le proprietà dinamiche di specifiche strutture. L'alta corrispondenza tra riferimento teorico ed esito sperimentale osservato, sia nel calcolo delle frequenze naturali di vibrazione che nel processo di ricostruzione delle forme modali, è garanzia del corretto funzionamento dei nodi sensore, della loro

sincronizzazione, e delle procedure di processing innestate direttamente in essi. La rete proposta, pertanto, si qualifica per eseguire il monitoraggio dinamico in remoto di strutture civili.

6. Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato da INAIL nell'ambito del bando BRIC/2016 ID=15, progetto SMARTBENCH.

7. Bibliografia

- [1] Lynch J. P., Loh K.J. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring. *Shock and Vibration Digest*, 2006; 38: 91–130.
- [2] Girolami A., Brunelli D., Benini L., et al. Low-cost and distributed health monitoring system for critical buildings. Atti della conferenza su *Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems, EESMS 2017. Milano, Luglio 24-25, 2017*.
- [3] Heylen W., Sas P. *Modal analysis theory and testing*. Katholieke Universteit Leuven, Departement Werktuigkunde, 2006.
- [4] Poncelet F., Kerschen G., Golinval J.C. Experimental modal analysis using blind source separation techniques. Atti della conferenza su *Noise and Vibration Engineering. Leuven, Settembre 18-20, 2006*.
- [5] Gade S., Møller N.B., Herlufsen H., KonstantinHansen H. Frequency domain techniques for operational modal analysis. Atti della conferenza su *International Operational Modal Analysis. Copenhagen, Aprile 26-27, 2005*.
- [6] Kim B.H., Stubbs N., Park T. A new method to extract modal parameters using output-only responses. *Journal of sound and vibration*. 2005; 282: 215-230.
- [7] Swaminathan B., Sharma B., Chauhan S. Utilization of blind source separation techniques for modal analysis. *Structural Dynamics*, 2011; 3: 189–206.
- [8] Allemang R.J., Brown D.L. A correlation coefficient for modal vector analysis. Atti della conferenza su *international modal analysis conference. Orlando, Novembre 8-10, 1982*.
- [9] Vincenzi L. *Identificazione dinamica delle caratteristiche modali e delle proprietà meccaniche di strutture mediante algoritmi di ottimizzazione*. PhD thesis, Università di Bologna, 2007.