

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

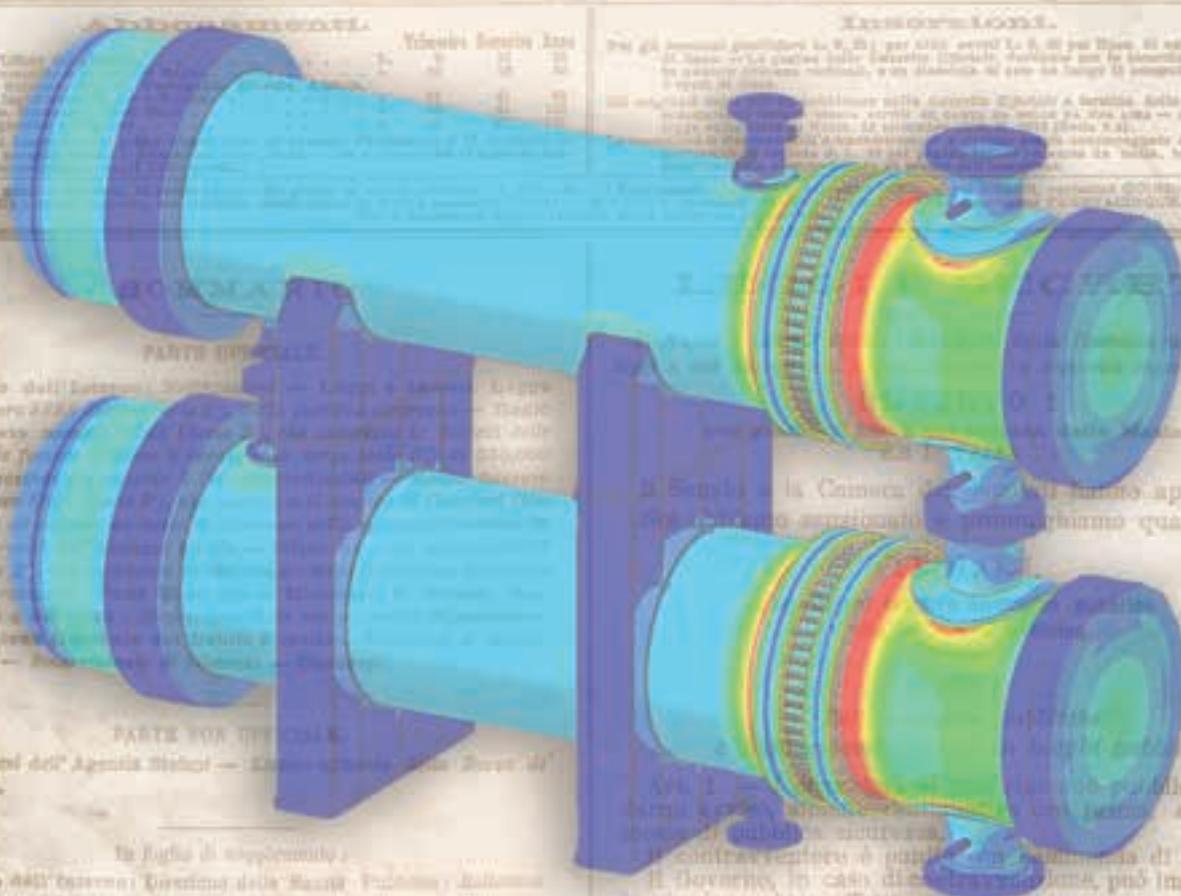
GAZZETTA UFFICIALE

DEL REGNO D'ITALIA

ANNO 1888

ROMA — SABATO 29 GENNAIO

N.° NUM. 22



PARTE UFFICIALE

MINISTERO DELL'INTERNO

Nodi sensore per il monitoraggio dell'integrità strutturale di attrezzature di lavoro mediante il metodo di Emissione Acustica

C. Mennuti¹, M.E. Biancolini², G.C. Cardarilli³, L. De Marchi⁴, L. Di Nunzio³, R. Fazzolari³, A. Marzani⁵, N. Testoni⁵

¹ Inail - Dit

² Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa "Mario Lucertini" - Università degli Studi di Roma Tor Vergata

³ Dipartimento di Ingegneria Elettronica - Università degli Studi di Roma Tor Vergata

⁴ Dipartimento dell'Ingegneria Elettrica e dell'Informazione "Guglielmo Marconi" - DEI, Università di Bologna

⁵ Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali - DICAM, Università di Bologna

Sommario

Le attuali procedure di verifica dell'integrità strutturale di attrezzature a pressione mediante il metodo di Emissione Acustica (EA) sono basate su controlli periodici. Incrementi dei livelli di affidabilità e di sicurezza delle attrezzature sono raggiungibili mediante tecniche di monitoraggio strutturale. In questo contesto si palesa la necessità di disporre di strumenti di misura delle EA piccoli, leggeri, poco costosi, facilmente installabili sull'attrezzatura e atti al monitoraggio in continuo. Questo lavoro presenta due prototipi di nodo-sensore ideati per essere installati in modo e capaci di monitorare nel tempo i segnali EA. I nodi sensore, caratterizzati da dimensioni e pesi ridotti, basso consumo di potenza e capacità di elaborazione in locale del segnale acquisito, risultano ideali in diversi scenari applicativi, in particolare nel monitoraggio di attrezzature a pressione o atmosferiche contenenti fluidi pericolosi (esplosivi, infiammabili, tossici, comburenti, ecc.). Sui nodi sensore è possibile innestare algoritmi di processamento del segnale sviluppati ad hoc per i segnali EA, e possono essere programmati per trasferire in modalità wireless, su piattaforme "cloud based service", il segnale processato. Il lavoro mostra i risultati di una prima campagna di prove sperimentali volta a confrontare la capacità di acquisire i segnali EA dei nodi sensore rispetto ad apparecchiature commerciali. Quale scenario di prova, si considera una porzione del mantello di un serbatoio.

1. Introduzione

Il monitoraggio di una attrezzatura a pressione mediante tecniche basate sul metodo EA richiede una continua estrazione ed analisi di informazioni al fine di valutare l'integrità strutturale, preferibilmente secondo tecniche automatiche che semplificano e accelerano l'acquisizione e la gestione dei dati. Inoltre, il consumo energetico, i costi ed il peso degli elementi che costituiscono il sistema di monitoraggio devono essere ridotti al minimo non solo per motivi energetici, ma anche per rendere la presenza di tali dispositivi il più discreta possibile.

In questo scenario, i dispositivi elettronici da impiegare devono essere progettati secondo le funzionalità del monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring o SHM), principalmente con l'intento di fornire una rete di monitoraggio costante delle membrature a pressione ed identificare tempestivamente eventuali fenomeni di danneggiamento o degrado. L'unione di questi due aspetti consente di generare rapporti periodici sullo stato dell'attrezzatura o impianto a pressione per un ampio periodo di tempo.

Le prestazioni ed i requisiti dei sistemi EA tradizionali hanno dimostrato in primo luogo di produrre design di difficile impiego all'atto pratico a causa di peso, dimensioni e cablaggio.

Inoltre, sorgono problemi quando si affrontano fasi di acquisizione a lungo termine: ciò è dovuto all'uso di trasduttori piezoelettrici il cui costo costringe i ricercatori a limitare la durata delle campagne sperimentali per riutilizzare la stessa attrezzatura. Un altro aspetto importante da sottolineare è la consapevolezza del fatto che i segnali registrati dai dispositivi piezoelettrici non sono completamente adatti per indagare il comportamento dinamico delle infrastrutture con sufficiente precisione.

Recentemente, i significativi progressi nel campo della miniaturizzazione dei dispositivi elettronici hanno permesso la realizzazione di reti di sensori distribuiti capaci di fornire non soltanto l'acquisizione ma anche l'elaborazione dei dati registrati direttamente sulla struttura indagata tramite l'uso di strumenti di calcolo distribuito. Inoltre, l'utilizzo di innovativi sensori piezoelettrici specificamente progettati per permettere installazioni permanenti, minimamente invasive ed a basso costo, al posto dei sistemi tradizionali offre, tra i molti vantaggi, versatilità, scalabilità e analisi a lungo termine. Le posizioni possono essere modificate, il processo di acquisizione può essere riconfigurato digitalmente senza particolari conseguenze per la struttura, contenendo quindi l'intrusività del sistema di monitoraggio.

Questo lavoro presenta due diverse realizzazioni di reti di sensori con elaborazione dati incorporata per SHM in tempo reale, sviluppata specificamente per favorire bassi consumi energetici, leggerezza e dimensioni ridotte. Al fine di valutare le funzionalità del sistema, le misurazioni vibrazionali sono state registrate da una lastra in acciaio sottoposta a sollecitazioni Hsu-Nielsen [1-2]. Nella seconda sezione viene presentata una panoramica generale del nodo proposto e realizzato presso l'Università di Tor Vergata, seguita dalla descrizione degli algoritmi implementati per valutare l'energia contenuta nel segnale EA ed i relativi risultati dell'elaborazione. Nella terza sezione viene invece presentata una simile panoramica del nodo proposto e realizzato presso l'Università di Bologna. I due sistemi si distinguono per dimensioni, peso e connettività. Entrambi i sistemi dimostrano come sia possibile realizzare reti di nodi sensori affidabili ed a basso costo nel contesto SHM.

2. Nodo sensore SHM-TV

Il nodo sensore sviluppato presso l'Università di Tor Vergata (SHM-TV) nasce dall'esigenza di ridurre l'ingombro, la complessità ed aumentare l'efficienza delle apparecchiature attualmente impiegate nella diagnostica non distruttiva per mezzo di EA. Le apparecchiature attualmente utilizzate presentano due grandi svantaggi:

- Impiego difficoltoso su attrezzature a pressione di medie-grandi dimensioni a causa dei numerosi cavi di collegamento sensori-sistema di acquisizione e degli ingombri non trascurabili.
- Progettate per il monitoraggio real-time limitato al tempo di durata della prova EA.

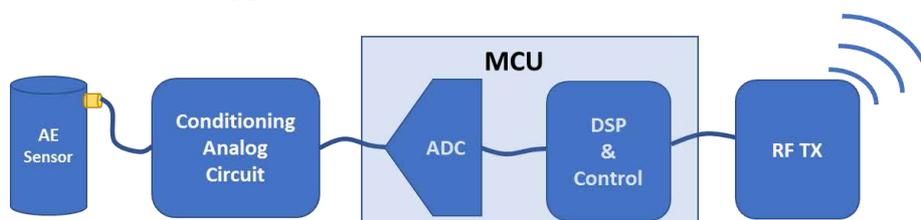


Figura 1. Schema a blocchi del nodo sensore SHM-TV

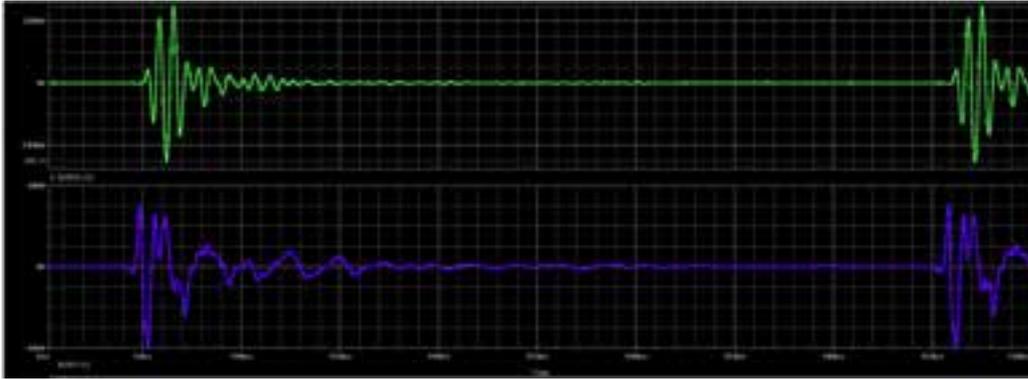


Figura 2. Segnale filtrato (verde) e segnale grezzo proveniente dal sensore Vallen (blu)

Per far fronte a tali limitazioni si è sviluppata una Wireless Sensor Network (WSN) in grado di garantire monitoraggio real-time in continuo e basso ingombro. Una importante caratteristica della WSN sviluppata è quella di essere compatibile con molti sensori presenti in commercio. La WSN è composta da nodi sensore wireless e un sistema remoto per la raccolta e rappresentazione dei dati. I nodi sensore costituiscono sicuramente la parte più complessa del sistema.

In Figura 1 è mostrato lo schema a blocchi di un singolo nodo sensore, esso è composto da un sensore per emissioni acustiche commerciale (AE Sensor), un circuito di condizionamento analogico, un Microcontrollore per la digitalizzazione del segnale e per il Digital Signal Processing (DSP) e un transceiver per l'invio wireless dei dati al concentratore di dati. Negli esperimenti condotti sin qui si è fatto uso di sensori Vallen VS-150 M.

2.1. Circuito di condizionamento Analogico

Il circuito di condizionamento analogico ha il compito di fornire un segnale compatibile con quanto richiesto dal convertitore analogico digitale (ADC) presente nel Microcontrollore. Esso è costituito da tre blocchi principali:

1. Buffer di ingresso
2. Filtro passa banda
3. Traslatore di livello

Il buffer in ingresso ha il compito di disaccoppiare il sensore commerciale con il circuito di condizionamento analogico fornendo al sensore una alta impedenza. Il filtro passa banda è invece impiegato al fine di rimuovere dal segnale componenti in frequenza non utili al processamento. Il filtro analogico dipende dal sensore utilizzato; nel caso di un Vallen VS-150 M, ad esempio, è stato impiegato un filtro attivo passa banda Butterworth del decimo ordine centrato su 150 KHz, larghezza di banda di 120 KHz e un'attenuazione in banda oscura di 30 dB. In Figura 2 è mostrato il segnale prima e dopo il filtraggio.

L'ultimo blocco costituente il circuito di condizionamento analogico è un traslatore di livello basato su amplificatore operazionale. Tale traslatore viene impiegato per trasformare il segnale, che si può considerare a media nulla, in un segnale solo positivo con ampiezza compresa tra 0 e 3.3 V.

2.2. Sistema DSP

Il sistema di acquisizione ed elaborazione è basato su un microcontrollore ST Microelectronics. Si tratta di un microcontrollore ARM Cortex M4 montato su una scheda STM32 Nucleo STM32L476RG. Il microcontrollore è fornito di un convertitore analogico-digitale (ADC) a 12 bit in grado di effettuare acquisizioni alla velocità di 2 mega samples

per secondo (MSPS). Il microcontrollore è in grado di lavorare fino a una frequenza di clock di 180 MHz, ciò lo rende adatto ad effettuare delle elaborazioni numeriche del segnale anche di una certa complessità.

L'acquisizione del segnale è effettuata sfruttando un comparatore analogico presente sul Microcontrollore stesso. Tale comparatore permette la generazione di un interrupt quando il segnale di ingresso (in questo caso il segnale dell'emissione acustica) supera una soglia definita dall'utente. Tale interrupt attiva automaticamente l'ADC che, a questo punto, inizia l'acquisizione del segnale. Questo approccio permette inoltre di ottimizzare il consumo di potenza dinamica in quanto la conversione si avvia solo in seguito al superamento di tale soglia.

Nel nodo sensore sviluppato, la soglia di comparazione è selezionabile dall'utente mentre la frequenza di campionamento è stata fissata a 2MSPS. Quando il comparatore invia l'interrupt di superamento soglia, l'ADC acquisisce 1000 campioni corrispondenti a circa 0.4 ms di segnale. Per ottimizzare il processo di acquisizione, il salvataggio dei dati in memoria avviene tramite Direct Memory Access (DMA), ovvero un processo che permette che i dati vengano memorizzati dall'ADC direttamente sulla memoria RAM senza che questi passino per il processore. La quantità di campioni acquisita occupa circa 2 KBytes di spazio in memoria, ma si tratta di un numero abbastanza esiguo, in quanto la quantità di memoria RAM disponibile è di 128 KBytes.

Al fine di ridurre il traffico di dati wireless e quindi la potenza dissipata il nodo sensore invia solo le features utili all'analisi. È quindi necessario un processing locale sul sensore per l'estrazione di tali features che sono:

1. Numero di attraversamenti per una data soglia (threshold)
2. Durata del segnale
3. Valore Massimo e valore Minimo
4. Energia

2.2.1. Numero di attraversamenti di una data soglia e durata

Data una determinata soglia scelta dall'utente, il numero di attraversamenti di tale soglia è definito come il numero di volte che il segnale oltrepassa dal basso verso l'alto tale soglia. L'intervallo di tempo tra il primo e l'ultimo istante di attraversamento della soglia corrisponde alla durata del segnale.

2.2.2. Valore massimo e valore minimo

Si tratta dei valori massimo e minimo relativi al segnale Tali valori sono espressi in millivolt (mV).

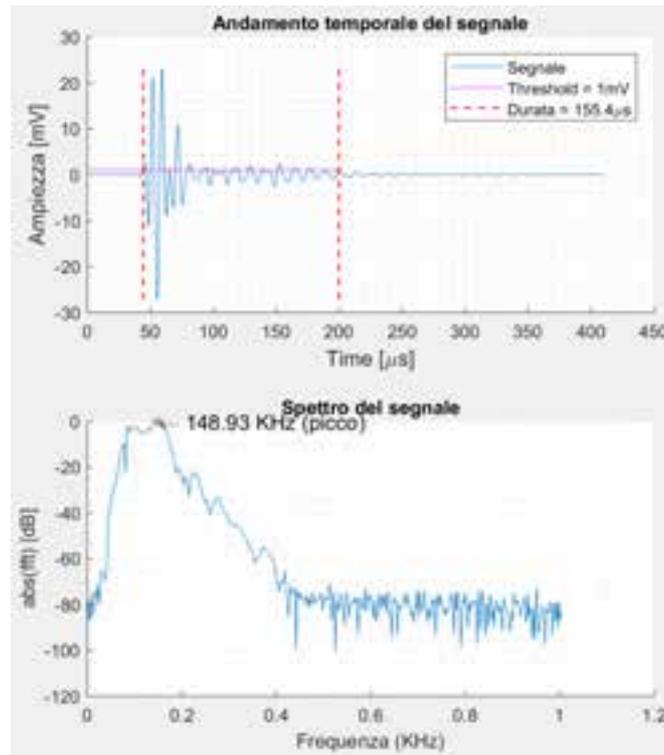


Figura 3. Andamento temporale e spettro di una emissione acustica

FEATURES	SEGNALE CON FILTRO
Numero di attraversamenti della threshold	15
Valore massimo [mV]	23
Valore minimo [mV]	-27.2
Energia	20471
Durata [us]	155.4

Tabella 1. Risultati ottenuti dalla estrazione delle feature da parte del nodo sensore

2.2.3. Energia del segnale

L'energia di un segnale generico $x(\tau)$ tempo continuo è mostrata nell'equazione (1):

$$E(t) = \int_{t_{in}}^{t_f} P(\tau) d\tau = \int_{t_{in}}^{t_f} |x(\tau)|^2 d\tau \quad (1)$$

dove t_{in} e t_f sono rispettivamente gli istanti iniziale e finale del segnale, mentre $P(t)$ rappresenta la potenza istantanea del segnale stesso. Nel nostro caso, trattandosi di un segnale tempo discreto, la (1) può essere riscritta come mostrato nell'equazione (2):

$$E(n) = \sum_{n=t_{in}}^{t_f} P(n) = \sum_{n=t_{in}}^{t_f} |x(n)|^2 \quad (2)$$

Dall'equazione (2) si evince che la l'energia di un'emissione acustica può essere calcolata sommando il quadrato dei campioni del segnale.

2.3. Test di laboratorio e risultati sperimentali

La **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** mostra i risultati di elaborazione di un segnale EA ottenuto con la rottura di una mina a pochi centimetri dal sensore posizionato su una lamiera di acciaio P355NH. Per validare la funzionalità degli algoritmi implementati, oltre alle features, è stata esportata anche l'intera forma d'onda acquisita. Tramite il tool matlab sono state estratte le features dalla forma d'onda e i valori ottenuti sono stati confrontati con quelli elaborati dal microcontrollore. Entrambe le elaborazioni

hanno prodotto gli stessi valori di features. La Tabella 1 riassume tutte le caratteristiche estratte dal nodo sensore per il segnale mostrato in Figura 1.

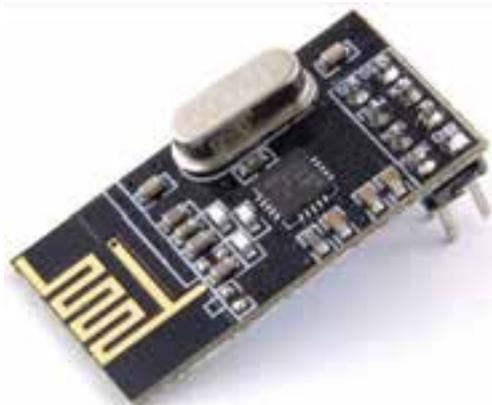


Figura 4. Transceiver Wireless

Date	Time	Sensor	Max Value	Zero cross	Energy	Duration
2015-04-21	15:30:21	2	96.0	107	26.0	8.0
2015-04-21	15:33:09	2	100.0	134	175.0	200.0
2015-04-21	15:34:08	2	67.0	108	15.0	17.0
2015-04-21	15:33:49	2	146.0	200		
2015-04-21	15:33:49	2	146.0	200		
2015-04-21	15:33:41	2	27.0	100		
2015-04-21	15:33:41	2	27.0	100		
2015-04-21	15:33:41	2	27.0	100		
2015-04-21	15:33:41	2	27.0	100		1.0

Figura 5. Interfaccia sito web per la visualizzazione dei dati

2.4. Trasmissione wireless

Le features estratte dal Microprocessore sono inviate verso un sistema di raccoglimento dati dotato di sito web. La trasmissione dati avviene mediante il transceiver NRF24L01 mostrato in Figura 4 prodotto da Nordic Semiconductor (2.4 GHz, data rate 1Mb/s, raggio circa 30m all'aperto). Il sistema di raccoglimento dati basato su scheda Raspberry Pi, permette, invece, di raccogliere e rendere disponibili i dati provenienti dai vari sensori wireless in modo da consentire un monitoraggio real time e continuo nel tempo, come mostrato in Figura 5, dove è possibile osservare l'interfaccia web alla rete per la visualizzazione dei dati.

3. Nodo sensore SHM-BO

La rete di nodi sensore sviluppata presso l'Università di Bologna (SHM-BO) è caratterizzata da dimensioni ridotte, bassa potenza e peso leggero ed è particolarmente adatta per il rilevamento di onde guidate generate da sorgenti EA sia su strutture composite che metalliche. Un dispositivo gateway permette l'accesso alla rete sia per quanto riguarda la comunicazione dati che per quanto riguarda l'alimentazione: ciò è possibile grazie all'impiego di un bus di rete basato sull'uso della tecnologia ad onde convogliate o Data Over Power (DOP). L'alimentazione elettrica può essere ottenuta sia dal collegamento USB del PC o da un alimentatore esterno a bassa tensione (PSU).

Ciascun nodo sensore è stato progettato per essere collegato ad altri dispositivi simili per creare una rete con un massimo di 64 nodi, ma il numero totale di nodi sulla rete può essere esteso arbitrariamente tramite nodi ripetitori, non discussi in questo lavoro. La comunicazione ad un PC notebook o ad una piattaforma embedded come Intel Edison® o Raspberry Pi viene eseguita in modo half-duplex a una velocità effettiva minima di 200kbps tramite un ricetrasmittitore RS485 a bassa tensione e alta velocità.

Il cuore del nodo sensore, mostrato in Figura 6, è un microcontrollore (MCU) STM32F3 a bassa tensione che permette una elaborazione mista analogica/digitale dei segnali a 32 bit tramite istruzioni DSP e FPU, inoltre integra quattro convertitori analogico/digitali con risoluzione 12bit, tempo di conversione pari a $0.2\mu\text{s}$ e riferimento di tensione incorporato.

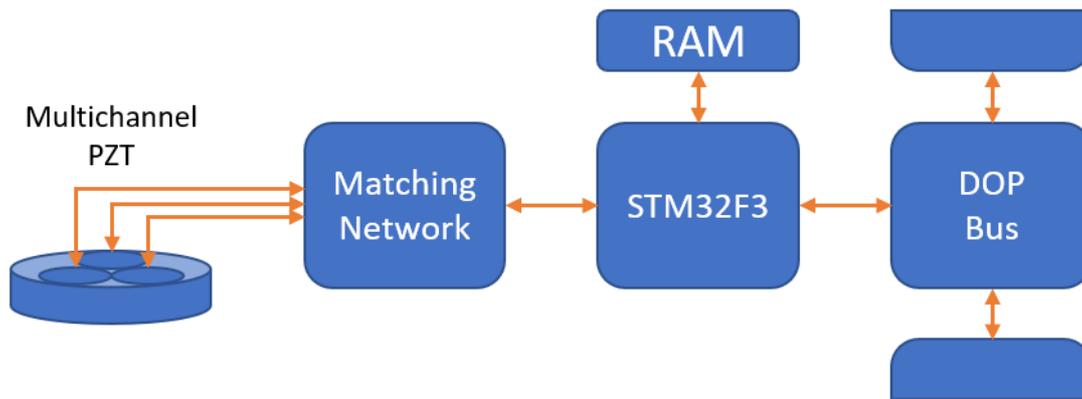


Figura 6. Digramma schematico del nodo sensore SHM-BO

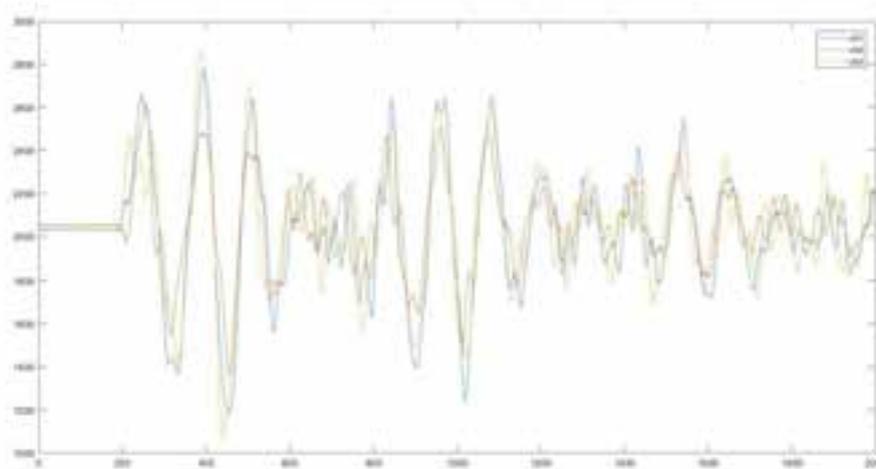


Figura 7. Segnale registrato dal nodo sensore sui 3 differenti canali a fronte di una sollecitazione Hsu-Nielsen

Le onde elastiche generate dalle sorgenti EA e propaganti sulla struttura sono registrate da un sensore piezoelettrico multicanale opportunamente progettato per l'acquisizione e la localizzazione di EA e memorizzate nella SRAM interna di 40KB. Le istruzioni del programma e i coefficienti dei filtri sono memorizzati in una memoria flash da 256 KB incorporata all'interno dell'MCU ai fini dell'elaborazione dei dati. Dopo l'elaborazione, i dati vengono memorizzati in una RAM statica seriale da 128KB con interfaccia SPI. In Figura 7: viene mostrato un esempio di segnale acquisito dal nodo sensore a fronte di una sollecitazione di tipo Hsu-Nielsen su una lastra di acciaio P355NH a breve distanza dall'elemento sensibile.

Ogni nodo sensore ha dimensioni pari a 30x23mm, consuma meno di 35mW a fronte di una tensione di alimentazione del bus DOP di 5V, e pesa meno di 4gr, rendendolo attraente per l'impiego in settori in cui le dimensioni, la potenza e la riduzione del peso sono fondamentali.

3.1 Procedura di acquisizione e localizzazione delle sorgenti EA

Il sistema di acquisizione dei dati del nodo sensore SHM-BO si basa fortemente sulle capacità di analisi ed elaborazione dei dati fornite dal microcontrollore STM32F303CC prodotto da ST Microelectronics.



Figura 8. Posizionamento dei sensori nel setup sperimentale

Il sistema richiede prima di iniziare l'acquisizione di impostare le soglie di rilevazione per ciascun canale: ogni nodo sensore è in grado di acquisire dati da 3 sensori a singolo canale o da un sensore multicanale espressamente progettato da Università di Bologna per lavorare in combinazione con il nodo sensore ed ottimizzato per la rilevazione di emissioni acustiche e rilasci locali di energia. È inoltre possibile impostare la frequenza di campionamento, la durata della acquisizione e la percentuale di segnale da memorizzare prima dell'occorrenza dell'evento.

Una volta impostati i parametri del segnale da rilevare, il nodo sensore entra in fase di monitoraggio ed acquisisce continuamente i dati da ciascun canale in modo indipendente. Se anche una sola delle soglie viene superata, il nodo sensore entra in fase di memorizzazione e registra il segnale elettrico generato dal sensore piezo a fronte della sollecitazione meccanica dovuta alla EA. Terminata la registrazione il sistema elabora internamente il segnale, mantenendo copia della traccia acustica originale per permettere all'utente ulteriori indagini. Il sistema di localizzazione si basa sulla ottimizzazione degli algoritmi proposti in [3] e permette di evidenziare l'angolo di arrivo dell'onda meccanica su un arco di 360° sulla base dei segnali acquisiti sui tre canali. Combinando l'informazione proveniente da due o più sensori e note le rispettive posizioni sulla struttura indagata, è possibile localizzare la sorgente EA tramite tecniche di triangolazione.

3.2 Confronto con la strumentazione commerciale

Il nodo sensore SHM-BO ottiene prestazioni concorrenziali se comparato alla strumentazione commerciale. Per valutare quantitativamente il rapporto di prestazioni tra le due soluzioni, è stato svolto uno studio comparativo basato su ripetute sollecitazioni Hsu-Nielsen su una lastra di acciaio di dimensioni 12x50cm e di spessore pari a 4mm; i sensori sono stati posizionati come mostrato in Figura 8. La distanza della sollecitazione è stata variata da 5 a 35cm con un passo regolare di 5cm.

Distanza	5cm	10cm	15cm	20cm	25cm	30cm	35cm
Sensore commerciale [mVpp]	128	55	73	91	54	51	61
Unibo con gel [mVpp]	233	180	129	219	223	243	329
Unibo senza gel [mVpp]	1440	823	910	790	813	831	792

Tabella 2. Confronto della sensibilità della strumentazione commerciale con il nodo Unibo

Come è possibile osservare in Tabella 2, l'ampiezza del segnale rilevato dal nodo sensore Unibo è decisamente superiore a quella rilevata dal sistema commerciale. I sensori sono stati accoppiati alla struttura per mezzo di un gel per accoppiamento acustico. È interessante osservare come questo gel sia di fatto un ostacolo alla misura del nodo sensore Unibo: ciò è dovuto alla diversa impedenza acustica dei materiali che

costituiscono l'elemento sensibile del sensore realizzato da Università di Bologna. In particolare, in assenza di gel, è possibile osservare come il nodo proposto abbia una sensibilità di circa 10 volte superiore al sistema commerciale sotto ogni condizione operativa.

3.3 Trasmissione dei dati

Il sistema di acquisizione SHM-BO può essere connesso sia ad una postazione PC (fissa o portatile) o ad un computer su singola scheda come Raspberry Pi. Questo dispositivo viene connesso alla rete di nodi sensori per mezzo del bus DOP e permette lo scambio di dati e comandi con i nodi remoti tramite la propria interfaccia WiFi. I dati collezionati in tal modo possono essere memorizzati su un database online per realizzare un sistema di monitoraggio integrato remoto. Inoltre, il log degli eventi registrati dal sistema durante la vita della struttura può fornire delle utili informazioni per la pianificazione delle operazioni di manutenzione. Per tale motivo si è scelto di utilizzare la tecnologia Cassandra (<http://cassandra.apache.org/>) come sistema di database: essa offre un supporto robusto per sistemi cluster ed è pensata per gestire grandi moli di dati. Non da ultimo, la capacità di essere altamente disponibile grazie alla sua natura distribuita impedisce fallimenti di tipo a singolo punto e garantisce una alta scalabilità.

4. Conclusioni

Entrambi i sistemi presentati mostrano come sia possibile realizzare reti di monitoraggio per attrezzature a pressione mediante tecniche basate sul metodo EA utilizzando strumentazione capace di ridurre pesi, costi ed ingombro entro limiti accettabili per l'impiego sul campo. La possibilità di impiegare sensori commerciali o specificatamente progettati garantisce una grande flessibilità di impiego, salvaguardando al tempo stesso la sensibilità del sistema e mantenendo contenuti i costi ed i tempi di applicazione.

5. Ringraziamenti

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

6. Bibliografia

- [1] Hsu N.N., F.R. Breckenridge F.R. Characterization and calibration of acoustic emission sensor. *Materials Evaluation*, 1981; 39: 60-68.
- [2] Sause M.G.R. Investigation of pencil-lead breaks as acoustic emission sources. *Journal of acoustic emission*, 2011; 29: 184-196.
- [3] Garofalo A., Testoni N., Marzani A., De Marchi L. Multiresolution wavelet analysis to estimate Lamb waves direction of arrival in passive monitoring techniques. Atti della Conferenza 2017 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS), Milan, 2017, pp. 1-6.