



CONVEGNO FABRE
PONTI, VIADOTTI, E GALLERIE ESISTENTI:
RICERCA, INNOVAZIONE E APPLICAZIONI
LUCCA, 2-4 FEBBRAIO 2022



Monitoraggio Strutturale, caratterizzazione e tracking modale con sistemi Wireless LoRaWAN e Algoritmi automatici in Cloud

Structural monitoring, characterisation and modal tracking with LoRaWAN wireless systems and automatic Cloud Algorithms

Matteo Maccanti ^a, Paolo De Lellis ^a
^a Move Srl, Piazza Cavour 7, Milano 20121

Keywords: Sistema Monitoraggio Strutturale, Sensori wireless LoRAWAN, OMA, FDD, Cloud.

SOMMARIO

Ogni struttura nell'arco della sua vita utile ha bisogno di essere monitorata, sia per garantire un livello di sicurezza adeguato sia perché possono sopraggiungere eventi esterni - sia naturali che non - che possono disturbare il suo stato di equilibrio. In Italia il monitoraggio si rende ancor più necessario, visto che gran parte delle infrastrutture critiche sono state realizzate oltre 60 anni fa con norme costruttive e tecniche ovviamente diverse da quelle presenti oggi.

Partendo da queste esigenze, negli ultimi anni Move Solutions ha implementato un sistema di monitoraggio strutturale, statico e dinamico, costituito da una famiglia di sensori completamente wireless, operanti con tecnologia LoRAWAN, accompagnati da una apposita piattaforma Cloud sviluppata con l'obiettivo di facilitare l'analisi e la visualizzazione dei dati da parte degli operatori addetti alle attività. Uno dei punti di forza del sistema è l'ottimo livello di sincronizzazione (500 μ s) che vi è tra le acquisizioni dei sensori denominati "accelerometri SHM" grazie ai quali è possibile ottenere dei dataset adatti alla caratterizzazione modale di una struttura durante le sue condizioni di normale operatività, metodologia nota in letteratura come OMA (Operational Modal Analysis).

A partire dai dati accelerometrici, è possibile estrapolare le frequenze e le forme modali giornaliere servendosi della tecnica FDD (Frequency Domain Decomposition) che può essere facilmente automatizzata su Cloud sia perché è un algoritmo non parametrico sia perché risulta essere molto efficiente a livello computazionale rispetto ad altre tecniche OMA.

Ai fini di un monitoraggio a lungo termine è necessario individuare solo i modi propri della struttura tra tutti quelli calcolati dalla FDD; questo è reso possibile attraverso un algoritmo di Clustering multi-livello, da noi ideato, in grado di riconoscere i modi vibrazionali dai modi "spuri", i quali verranno scartati.

La fase successiva è quella di *Tracking* il cui scopo è quello di monitorare nel corso del tempo le variazioni dei modi vibrazionali precedentemente identificati: infatti utilizzando degli algoritmi di Machine Learning e Artificial Intelligence è possibile evidenziare delle anomalie nelle serie temporali riconducibili a possibili danni o deterioramenti della struttura.

Tutto questo può essere di grande supporto ai professionisti del settore che possono sia monitorare lo stato di salute della struttura sia aggiornare, sulla base dei dati sperimentali, il modello FEM e BIM giornalmente per tenere sotto controllo uno o più scenari di danno.

L'impiego di un sistema di monitoraggio wireless e completamente automatizzato su Cloud può dare una grande spinta nella semplificazione della gestione di tutte le infrastrutture, abbattendo i costi e digitalizzando i processi.

ABSTRACT

Every structure needs to be monitored throughout its useful life, both to ensure an adequate level of safety and due to external events - both natural and not – that can disturb its state of equilibrium. In Italy, monitoring is even more necessary since most of the critical infrastructures were built more than 60 years ago with construction standards and techniques that are obviously different from those present today.

Moving from these demands, in recent years, Move Solutions has implemented a structural monitoring system, static and dynamic, consisting of a family of completely wireless sensors, operating with LoRaWAN technology, accompanied by a special Cloud platform developed with the aim of facilitating the analysis and visualization of data by the operators in charge of the activities.

One of the strengths of the system is the excellent level of synchronisation (500 μ s) between the acquisitions of the sensors known as "SHM accelerometers", thanks to which it is possible to obtain datasets suitable for the modal characterisation of a structure during its normal operating conditions, a methodology known in the literature as OMA (Operational Modal Analysis).

From the accelerometric data, it is possible to extrapolate the daily frequencies and modal shapes using the FDD (Frequency Domain Decomposition) technique, which can be easily automated on the Cloud both because it is a non-parametric algorithm and because it is very efficient at the computational level compared to other OMA techniques.

For the purpose of long-term monitoring, it is necessary to identify only structure modes of vibration among all those calculated by FDD; this is made possible by a multi-level clustering algorithm, designed by us, able to recognize vibrational modes from "spurious" ones, which will be discarded.

The next phase is the Tracking phase, the purpose of which is to monitor the variations of the previously identified vibrational modes over time: in fact, by using Machine Learning and Artificial Intelligence algorithms, it is possible to highlight anomalies in the time series that can be traced back to possible damage or deterioration of the structure.

All this can be of great support to professionals who can both monitor the health of the structure and update, based on experimental data, the FEM and BIM model on a daily basis to keep under control one or more damage scenarios.

The use of a wireless and fully automated monitoring system on the Cloud can give a big boost in simplifying the management of all infrastructures, cutting costs and digitising processes.



1 INTRODUZIONE AL SISTEMA DI MONITORAGGIO LORAWAN

Move Srl è un'azienda focalizzata sull'elettronica per le telecomunicazioni. Con un brevetto e diverse pubblicazioni, Move progetta sistemi LPWANs (Low Power Wide Area Networks) con comunicazione wireless LoRaWAN.

Il core business di Move è il monitoraggio della Salute strutturale (SHM) di qualsiasi tipo di infrastruttura civile. Le soluzioni di monitoraggio wireless Move comprendono tre elementi chiave: un network di sensori wireless, un Gateway di comunicazione LoRaWAN/Cellular e una piattaforma di visualizzazione dati online. Il monitoraggio wireless svolge un ruolo inestimabile nella costruzione, manutenzione e soprattutto nella sicurezza delle infrastrutture.

Utilizzando il protocollo di comunicazione LoRaWAN, per la trasmissione dati wireless, è possibile comunicare su aree estese (oltre 10 km in situazioni ottimali). Questo protocollo di comunicazione è a bassa potenza di trasmissione e a basso consumo energetico, rendendolo perfetto per la trasmissione di dati grezzi con dispositivi che non dispongono di grandi riserve di energia. Il LoRaWAN utilizza bande di frequenza radio sub-gigahertz gratuite come 433 Mhz, 868 Mhz (Europa) e 915 Mhz (nord America).

Grazie a queste caratteristiche, la comunicazione wireless LoRaWAN risulta perfetta per i sistemi IoT- Internet of Things- dove molti dispositivi sono sparsi su vaste aree. Nella medesima area di monitoraggio possono essere installati più tipologie di sensori che comunicheranno con il medesimo Gateway.

1.1 Obiettivi del Sistema di monitoraggio

Un sistema di monitoraggio continuo e permanente deve avere due caratteristiche principali: deve essere in grado di monitorare i parametri di interesse della struttura sia statici che dinamici nel breve termine e avvisare

tempestivamente l'utente al superamento di una certa soglia di allarme. Si parla di monitoraggio in tempo reale. Altra caratteristica fondamentale è però quella di permettere un monitoraggio a lungo termine a livello statistico con studio dei trend e un'analisi modale basata sull'OMA. Tutte le strutture hanno una certa vita per cui sono state pensate, progettate e poi costruite. Durante i primi anni dopo la guerra questo concetto del limite di vita non era molto chiaro. Le strutture hanno sofferto nei passati anni e stanno soffrendo principalmente per negligenza, deterioramento e aumento del traffico sia in carico che in frequenza. Conseguenza di questi fattori è che molte strutture in Italia e non solo, esibiscono deterioramento dovuto all'invecchiamento o a manutenzione inadeguata. Nelle linee guida viene definito un indice R di affidabilità strutturale.

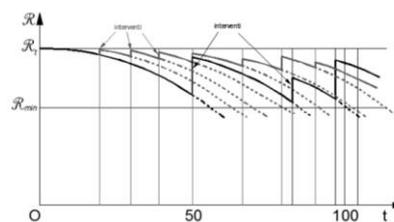


Figura 7.7.4- Evoluzione dell'indice di affidabilità e della vita utile in funzione degli interventi (Rif. Figura C.2.1 Circolare MIT 21 gennaio 2019 n. 7)

Figura 1. Evoluzione dell'indice di affidabilità e della vita utile in funzione degli interventi

Questo indice diminuisce per effetto dei fenomeni di degrado da un valore iniziale ad un valore minimo (comunque superiore al limite di collasso) che la struttura raggiunge al termine della vita di progetto con i soli interventi di manutenzione ordinaria. Gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria fanno recuperare parte dell'affidabilità persa. È facile capire che una manutenzione ordinaria e programmata di interventi più frequenti ma meno costosi consente di mantenere il valore dell'indice R a livelli prossimi a quello originario per un periodo più lungo rispetto alla strategia alternativa (manutenzione straordinaria). Il monitoraggio fa parte del processo, insieme alle indagini visive e alle analisi successive, per cui si

riesce a stabilire le condizioni attuali della struttura e vedere costantemente la loro variazione. Grazie al monitoraggio è quindi possibile ottimizzare gli interventi di manutenzione ordinari ed avere una struttura sempre ad un livello di sicurezza elevato.

1.2 Architettura del sistema

Il sistema di monitoraggio strutturale Move si fonda su tre elementi principali:

- Rete di sensori wireless LoRaWAN,
- Gateway di comunicazione,
- Piattaforma di gestione e controllo.

Il sistema di sensori wireless comunica automaticamente i dati di misurazioni tramite LoRaWAN con il gateway che a sua volta inoltra tutti i dati ricevuti tramite 4G o LTE ai servizi online.

Una volta che i sensori e il gateway sono installati in loco, il sistema è pronto per rilevare, trasmettere e archiviare i dati.

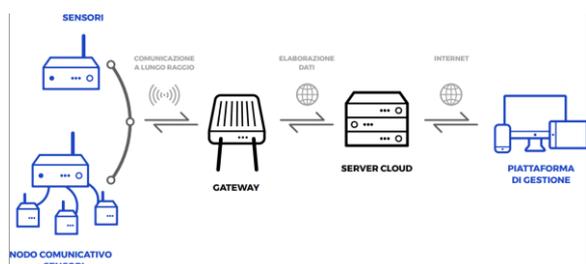


Figura 2. Schematico funzionamento sistema

I dati trasmessi sono visualizzabili sulla Piattaforma Cloud Move, che permette agli utenti di accedere in remoto ai dati trasmessi e allo stato dei dispositivi. Con la Piattaforma web l'utente può impostare diversi parametri di funzionamento di ogni sensore, come frequenze di campionamento, risoluzione e fondo scala, soglie di allarme e attivazione e molto altro. Inoltre, sono accessibili degli algoritmi realizzati ad hoc per l'analisi strutturale con i presenti sensori, in grado di combinare ed elaborare i dati e convertirli in informazioni utili a capire lo stato della struttura nel breve e nel lungo periodo, in termini puntuali e statistici.

I vantaggi nell'installazione di un intero sistema di sensori wireless sono molteplici. Il montaggio avviene semplicemente tramite viti sulla struttura che si desidera monitorare e una volta alimentato il Gateway il sistema inizierà a raccogliere dati. Il network di sensori wireless comunica automaticamente i dati di monitoraggio tramite il protocollo di comunicazione LoRaWAN, fino a migliaia di metri, con il

Gateway in loco. Il sistema è modulare, all'evolvere del progetto è possibile aggiungere, spostare rimuovere dal sistema sensori.

1.3 Tipologia di sensori

Il sistema Move si articola in una serie di sensori wireless unici con i quali è possibile rilevare e analizzare i parametri d'interesse di una struttura. È possibile osservare la dinamica - *accelerazioni, spostamenti dinamici, vibrazioni, frequenze e le forme modali* - e la statica - *inclinazioni, sprofondamenti, flessioni, apertura di fessure, sforzi, parametri ambientali e circostanti* - di ogni genere di struttura.

Move ha sviluppato sensori dinamici wireless con protocollo di comunicazione LoRaWAN unici attualmente sul mercato come Deck e Accelerometro SHM.

Il dispositivo Deck è una tecnologia proprietaria e brevettata Move.

È l'unico sensore sul mercato in grado di misurare le oscillazioni monoassiali della struttura fornendo valori di spostamento dinamico (range 0.7 - 20 Hz) con una precisione di 0.01 mm.

Il dispositivo DECK campiona a 100 Hz costantemente e, al superamento di una soglia settabile sulla piattaforma, trasmette pacchetti da 30 secondi (10 precedenti + 20 successivi al superamento). Monta a bordo anche un sensore di temperatura per le correlazioni, e grazie ai dati trasmessi si ottengono ed elaborano in piattaforma le frequenze delle vibrazioni.

Estremamente utilizzato per gli impalcati in genere e per tutte le strutture dove lo spostamento dinamico è rilevante, è estremamente utile, oltre che per rilevare gli eventi traumatici, per comprendere se e come varia la reazione allo stress delle strutture monitorate nel tempo.

L'Accelerometro SHM è un sensore wireless in grado di misurare l'accelerazione del punto d'installazione, indispensabile per ottenere le frequenze di vibrazione ed effettuare uno studio modale della struttura. Ciò che lo rende unico sul mercato è la possibilità di essere sincronizzato wireless con gli altri accelerometri, con una precisione di $\pm 500 \mu s$.

La sensibilità degli strumenti permette di effettuare questo genere di misura anche in situazioni di assenza di vibrazioni, in condizioni di semplice rumore ambientale. Monta a bordo anche un sensore di temperatura per le correlazioni con le letture accelerometriche.

2 ANALISI MODALE CON ACCELEROMETRI SHM

2.1 Caso Studio

Il sistema di monitoraggio dinamico formato da una rete di 17 sensori è stato applicato su un ponte stradale con struttura metallica. Trattasi di un ponte a singola campata con luce di 25 metri con impalcato a sezione mista acciaio calcestruzzo formato da 9 travi principali. Gli accelerometri sono stati posizionati in linea di tre sulle travi di bordo. Nella trave centrale sono stati installati invece cinque sensori come rappresentato in figura. Lo scopo del monitoraggio era quello di caratterizzare dinamicamente la struttura nelle sue frequenze e forme modali principali.

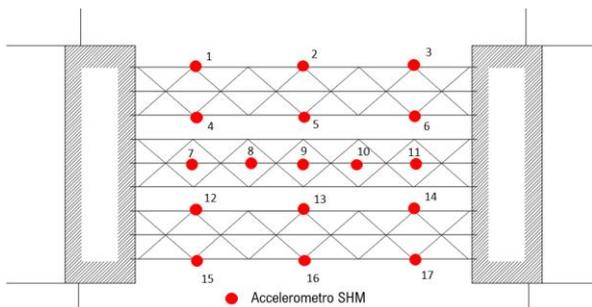


Figura 3. Pianta disposizione sensori su impalcato

2.2 Acquisizione dei dati

L'accelerometro SHM è un sensore pensato appositamente per il monitoraggio e per la caratterizzazione modale di una struttura. Una volta avvenuta l'installazione dei dispositivi, è necessario configurare da piattaforma WEB i parametri dei sensori in modo tale che essi siano sincronizzati tra di loro e che abbiano la stessa frequenza di campionamento (40,80 o 160 Hz). I sensori possono acquisire e inviare al più un evento per ora fino ad un massimo di 80 minuti al giorno; questo tempo risulta ampiamente sufficiente ai fini di una corretta individuazione dei parametri modali della struttura anche in caso di oscillazioni ambientali libere.

Finita la fase di configurazione, il sistema di monitoraggio inizia ad elaborare i dati giornalmente in maniera completamente automatica.

2.3 OMA e FDD

OMA (Operational Modal Analysis) è una delle più importanti metodologie impiegate per l'identificazione modale. Il suo più grande vantaggio è quello di poter essere utilizzata durante il funzionamento dinamico della struttura senza che sia necessario un ambiente di test controllato con determinate condizioni di carico. Questo tipo di tecnica viene anche definita *output-only modal analysis* proprio perchè viene elaborata solo sulla base della risposta del sistema a seguito di un input non controllato e non noto come per esempio le forzanti ambientali e operative della struttura (vento, traffico, microtremori e così via)[1].

L'ipotesi più importante affinché OMA porti ad una corretta identificazione modale è che la struttura venga eccitata da rumore bianco: tale condizione è sempre rispettata nel caso di oscillazioni ambientali libere o mentre può non esserlo quando la struttura viene sollecitata da forzanti particolarmente intense come per esempio il traffico pesante, il passaggio di un treno o un terremoto. In questi casi è consigliabile non utilizzare l'acquisizione interessata da tale evento.

Una delle tecniche più note nell'ambito OMA è la FDD (Frequency Domain Decomposition) [2]: è un algoritmo non parametrico che opera nel dominio della frequenza che, a partire da una decomposizione ai valori singolari (SVD) della matrice di densità spettrale di potenza (PSD), riesce a determinare le frequenze e le forme modali della struttura sotto analisi. Infatti, assumendo di avere un unico modo dominante in corrispondenza di una certa pulsazione ω_k , la risposta in frequenza $[G_{YY}(\omega)]$ della struttura può essere espressa così:

$$[G_{YY}(\omega)] = \lambda_1 \underline{u}_1 \underline{u}_1^T \omega \rightarrow \omega_k \quad (1)$$

Dove il primo autovettore singolare \underline{u}_1 e il primo autovalore singolare λ_1 corrispondono rispettivamente ad una stima della forma modale e della densità spettrale di potenza del k-esimo modo.

Nelle successive sezioni di questo articolo descriveremo il nostro sistema di monitoraggio automatico basato sull'algoritmo FDD.

2.4 Elaborazione dei dati giornaliera

L'elaborazione dei dati giornaliera avviene in modo completamente automatico su Cloud e segue questi step:

1. **Pre-processing:** prima di essere processate, le accelerazioni vengono filtrate con un filtro passa banda [0,7,30] Hz in modo da depurare il segnale da eventuali componenti rumorose non di interesse. Successivamente vengono eliminati anche tutti quegli eventi in cui vi sono dei picchi di accelerazione troppo intensi causati da forzanti molto evidenti che rischierebbero di alterare la caratterizzazione modale della struttura.

2. **Stazionarizzazione dei dati e creazione della matrice PSD:** durante un monitoraggio a lungo termine l'algoritmo viene lanciato una volta al giorno su tutte le acquisizioni ottenute dai sensori nelle ultime 24 ore. Per avvicinarci il più possibile all'ipotesi di rumore bianco in ingresso al sistema viene effettuata un'operazione di stazionarizzazione dei dati che va ad attenuare l'effetto delle forzanti leggere che non sono state scartate dal precedente controllo [3].

Successivamente si procede con il calcolo della matrice PSD degli eventi registrati attraverso il metodo di Welch con finestre di Hanning di lunghezza 2^{11} sovrapposte tra loro del 50%, applicate a FFT (Fast Fourier Transform) del segnale di lunghezza $M = 2^{15}$.

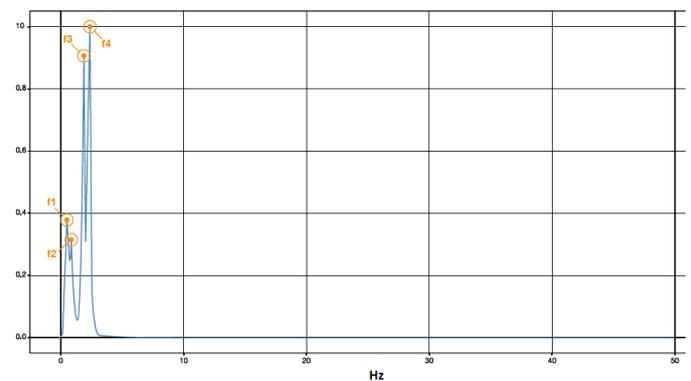
3. **SVD:** dal passo precedente si trova, per ogni frequenza, una matrice PSD quadrata ($N \times N$) dove N è il numero di sensori; a questo tensore viene applicata la decomposizione a valori singolari da cui si ottiene un prodotto di tre matrici $\underline{U} \underline{\Lambda} \underline{U}^H$ che hanno a loro volta una dipendenza dalla frequenza.

A questo punto identifico il primo autovalore $\underline{\Lambda}_1$ (vettore $1 \times M/2$) di $\underline{\Lambda}$ e il primo autovettore \underline{U}_1 (matrice $N \times M/2$) di \underline{U} che sono rispettivamente la stima giornaliera della densità spettrale di potenza equivalente della struttura e delle sue forme modali.

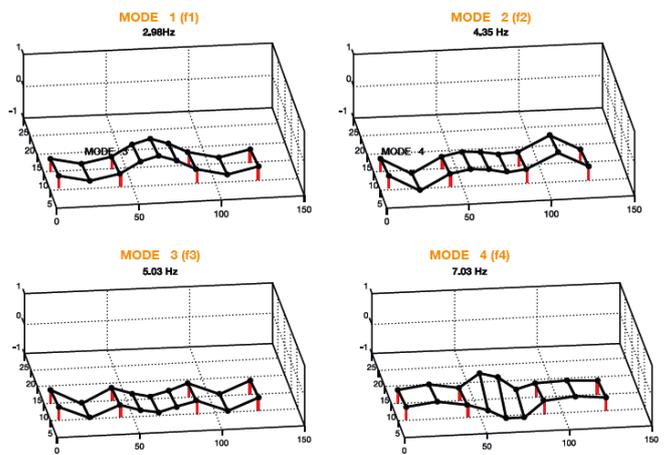
4. **Identificazione dei Picchi:** una volta calcolata la densità spettrale di potenza equivalente della struttura viene fatta una ricerca automatica dei picchi di maggiore intensità per andare a individuare le frequenze modali giornaliere.

Al k -esimo valore in frequenza vado ad associare il k -esimo vettore modale della matrice \underline{U}_1 ottenendo quindi una coppia frequenza-forma modale.

Riportiamo in Figura 4 un esempio di un possibile risultato ottenuto dall'elaborazione giornaliera dei dati con il procedimento sopra descritto.



(a)



(b)

Figura 4. Esempio di un possibile risultato ottenuto dall'elaborazione giornaliera dei dati: (a) Frequenze modali estrapolate dalla densità spettrale di potenza equivalente (b) Forme modali associate alle frequenze modali identificate.

2.5 Identificazione dei Modi strutturali e inizializzazione delle tracce

Dal momento in cui l'elaborazione giornaliera dei dati è eseguita in modo completamente

automatico non è detto che tutte le frequenze e le forme trovate dalla FDD corrispondano a dei modi vibrazionali propri della struttura: infatti vi possono essere vari fenomeni sia nella fase di acquisizione delle accelerazioni sia in quella di processing che possono portare alla comparsa di alcuni modi spuri.

In ottica di un monitoraggio a lungo termine dobbiamo però essere sicuri che le informazioni modali attenzionate siano solo quelle di interesse. Per questo motivo Move Solutions ha ideato un algoritmo di Clustering multi-livello in grado di riconoscere solo i modi vibrazionali tra tutte le coppie frequenza-forma trovate. Una volta evidenziati i modi propri della struttura si vanno ad inizializzare delle tracce (si utilizza questo termine per evidenziare l'evoluzione temporale dei modi strutturali durante il periodo di monitoraggio): quest'ultime saranno di supporto per individuare eventuali danni e anomalie strutturali che si possono presentare nel corso del tempo.

Il Clustering multi-livello viene lanciato dopo 14 giorni dall'inizio del monitoraggio, esso presenta dei parametri di configurazione che permettono di modificare leggermente il suo funzionamento e lo rendono estremamente adattivo a qualsiasi tipo di struttura.

In Figura 5 e 6 mostriamo rispettivamente i cluster nel dominio frequenziale e nel dominio delle forme modali identificati dall'algoritmo sopra citato, applicato al caso di studio menzionato nella sezione 2.1. Per semplificare la rappresentazione e per apprezzare meglio la dispersione all'interno di ciascun cluster, le forme modali sono state riportate in un grafico monodimensionale (nella fase di inizializzazione sono stati utilizzati 16 sensori anziché 17 perché uno di questi aveva avuto un malfunzionamento, in seguito risolto, durante questo periodo).

I dati delle tracce identificate sono invece riportati in Tabella 1.

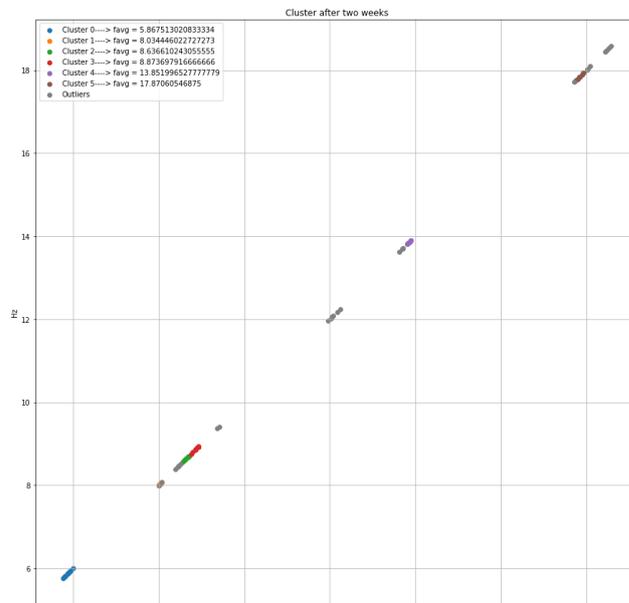
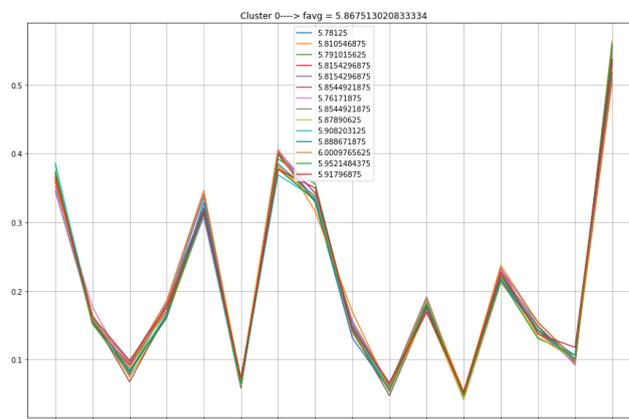
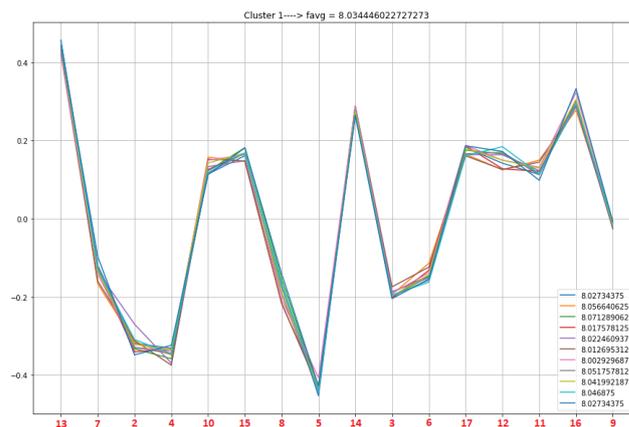


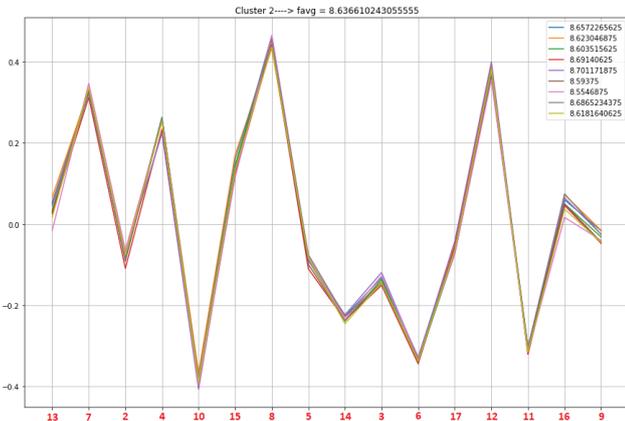
Figura 5. Cluster individuati nel dominio frequenziale.



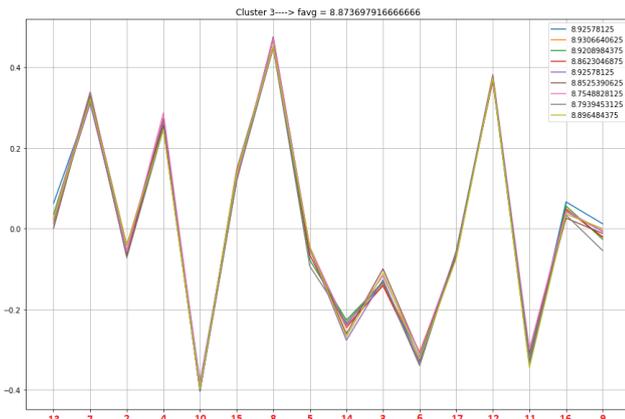
(a) Cluster 0



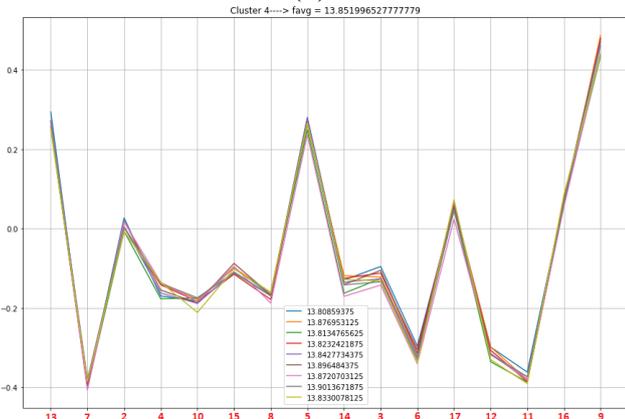
(b) Cluster 1



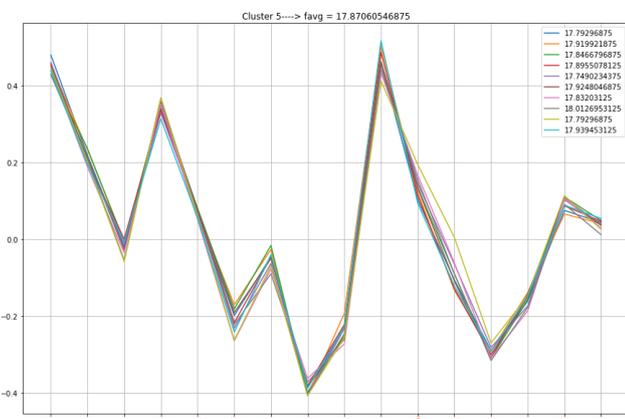
(c) Cluster 2



(d) Cluster 3



(e) Cluster 4



(f) Cluster 5

Figura 6. Cluster individuati nel dominio delle forme modali: (a) Cluster 0 (b) Cluster 1 (c) Cluster 2 (d) Cluster 3 (e) Cluster 4 (f) Cluster 5.

Tabella 1. Informazioni frequenziali delle tracce durante le prime due settimane.

Tracce	f_{avg} [Hz]	σ_f
0	5.8675	0.0667
1	8.0344	0.0198
2	8.6366	0.0474
3	8.8736	0.0599
4	13.8519	0.0334
5	17.8706	0.0644

2.6 Tracking dei Modi strutturali

Dopo aver identificato quali sono i modi vibrazionali da monitorare inizia la fase del *Tracking*: giornalmente i dati vengono elaborati come descritto nella sezione 2.3 e associati ad una delle tracce o al gruppo degli outliers. L'associazione avviene solo se vengono soddisfatte alcune condizioni legate a delle soglie adattive: quest'ultime sono variabili nel tempo e, grazie a questa peculiarità, facilitano l'individuazione di eventuali trend o cambiamenti anomali nelle serie temporali.

In Figura 7 mostriamo il *Tracking* ottenuto dopo poco più di un mese dall'inizio del monitoraggio mentre in Tabella 2 sono state riassunte le informazioni delle tracce in figura.



Figura 7. Tracce nel primo mese di monitoraggio.

Tabella 2. Informazioni frequenziali delle tracce durante il primo mese.

Tracce	f_{avg} [Hz]	σ_f
0	5.8634	0.0572
1	8.0537	0.0356
2	8.6310	0.0613
3	8.8556	0.0680
4	13.8953	0.0640
5	17.9177	0.0873

3 CONCLUSIONI

3.1 *Risultati e Sviluppi Futuri*

I risultati mostrati in questo articolo sono stati interamente validati attraverso i principali software commerciali utilizzati per l'analisi strutturale. Una volta identificati i modi vibrazionali e avviato il tracking, lo scopo del nostro sistema è quello di essere di supporto agli operatori addetti al monitoraggio per facilitarli nell'individuazione di eventuali danni o deterioramenti della struttura. L'impiego di algoritmi di Machine Learning e Artificial Intelligence permettono di evidenziare delle variazioni sospette nel tempo delle frequenze, delle forme e dei loro indici statistici.

Inoltre il funzionamento di questi algoritmi risulta essere ancora più efficace dopo aver depurato i parametri modali della struttura dagli effetti ambientali come temperatura, umidità e traffico.

REFERENCES

- [1] Rainieri C., Fabbrocino G., Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures.
- [2] Brincker R., Zhang L., 2001. Modal Identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Mat Struct* 10:441-445.
- [3] Sunjoong K., Ho-Kyung K., 2017, Damping Identification of Bridges Under Nonstationary Ambient Vibration.
- [4] Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.