



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 5

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. 5	
Diffusione documento	Privato	
Titolo del documento	Procedura di qualifica di sistemi di monitoraggio	
Obiettivo Realizzativo	OR5	
Coordinatore OR	CNR ITC (socio di STRESS scarl)	
Stato del documento		
Verificato (Coordinatore OR)	31/10/2022	Prof. Ing. Antonio Occhiuzzi
Approvato (Coordinatore Progetto)	31/10/2022	Prof. Ing. Edoardo Cosenza

PREMESSA

Il presente documento costituisce il prodotto atteso dell'OR 5.

L' OR 5 si prefigge di definire una procedura di qualificazione del sistema di monitoraggio che ne assicuri l'affidabilità e la ripetibilità. A tal fine, tale procedura deve prendere in considerazione tre distinti livelli: (i) i singoli componenti del sistema; (ii) i protocolli di monitoraggio, intesi come le procedure di elaborazione dei dati di monitoraggio; (iii) l'operatività complessiva in casi applicativi in condizioni realistiche.

Nel seguito, si riportano i risultati ottenuti mediante le attività svolte dai partner di OR:

- CNR ITC (responsabile, socio di STRESS Scarl),
- STRESS Scarl,
- Università di Napoli "Federico II",
- Università di Bologna.

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.....	5
2	I SISTEMI SHM	6
2.1	Definizioni generali	6
2.2	Progetto di un sistema SHM.....	10
2.3	Sensori	15
2.3.1	Sensori di vibrazione.....	19
2.3.2	Sensori di deformazione.....	36
2.3.3	Sensori di temperatura	45
2.4	Sistemi di acquisizione dati	45
2.5	Sistemi di trasmissione	51
2.5.1	Trasmissione convenzionale e innovativa.....	52
2.5.2	Reti di trasmissione wireless.....	59
2.5.3	Sistemi SHM smart (IoT).....	68
2.5.4	Protocolli di comunicazione a breve e lungo raggio per il monitoraggio strutturale.....	70
2.5.5	Protocolli Short-Range.....	72
2.5.6	Protocolli Long-Range	103
2.5.7	Qualificazione del protocollo di comunicazione LoRa per piattaforme di monitoraggio strutturale	126
2.5.8	Algoritmo di classificazione dei segnali LoRa	142
2.6	Sistema di gestione e storage dei dati.....	165
2.6.1	Basi di dati	165
2.6.2	La digitalizzazione per la gestione dei dati di monitoraggio in ambiente BIM.....	185

2.7	Elaborazione dei dati e diagnosi strutturale.....	201
2.7.1	Tecniche di elaborazione per il calcolo del drift di piano.....	202
2.7.2	Strategie di elaborazione dati per sistemi SHM wireless.....	222
2.7.3	Statistical Pattern Recognition e monitoraggio.....	226
2.7.4	Procedure di identificazione dinamica automatica	242
2.7.5	I metodi di identificazione del danno.....	250
2.7.6	Influenza delle variabili ambientali ed operative sugli indici di danno	258
3	SCENARIO.....	266
3.1	Scopo	266
3.2	Struttura	267
3.3	Azioni	269
3.4	Condizioni ambientali e operative.....	271
3.5	Vincoli operativi.....	272
4	QUALIFICAZIONE DI SISTEMI DI MONITORAGGIO STRUTTURALE PER L'INGEGNERIA CIVILE	273
4.1	Motivazioni e finalità.....	273
4.2	Il quadro normativo europeo per la qualificazione dei prodotti da costruzione.....	275
4.2.1	Discussione	279
4.3	Procedura di qualificazione “scenario-based” di un sistema di monitoraggio strutturale per l'ingegneria civile	280
4.4	Applicazione ad un caso studio elementare.....	286
5	IMPATTO ATTESO.....	289
6	CONCLUSIONI.....	289
7	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	291

1 DESCRIZIONE DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO E DELLE ATTIVITÀ

Le attività condotte dal gruppo di lavoro nell'ambito dell'OR5 hanno avuto come scopo principale la definizione di una procedura di qualificazione di sistemi di monitoraggio finalizzata ad ottenere una valutazione della rispondenza del sistema stesso rispetto ad uno scenario operativo di riferimento. A tal fine, le attività hanno previsto, innanzitutto, uno studio dettagliato dei sistemi di monitoraggio per opere civili, con riferimento alle loro componenti e procedure, mirato a identificare e caratterizzare le proprietà specifiche da considerare in ambito di qualificazione. Successivamente, è stata condotta un'analisi approfondita degli scenari di monitoraggio tipici dell'ambito civile, andando a caratterizzarne i parametri salienti rispetto a vari aspetti fino a definire le variabili del monitoraggio fondamentali. Infine, si è formulata e proposta una procedura di qualificazione “scenario-based” per la valutazione della rispondenza di un sistema di monitoraggio rispetto ad uno scenario predefinito.

La presente relazione è organizzata come segue. Nel capitolo 2 si descrivono e discutono nel dettaglio le caratteristiche specifiche dei sistemi di monitoraggio per opere civili, dai criteri di progettazione, alle componenti hardware (sensori, acquisizione dati, trasmissione, storage) e le procedure di elaborazione/diagnosi. Il capitolo 3, riporta la descrizione e la discussione dei parametri fondamentali che determinano il cosiddetto scenario di monitoraggio (scopo, struttura, azioni, condizioni ambientali, vincoli operativi). Il capitolo 4 illustra la procedura di qualificazione che consente la valutazione della rispondenza della strategia di monitoraggio rispetto ad uno scenario di monitoraggio di riferimento. Infine, nei capitoli 5 e 6 si delineano, rispettivamente, le possibili ricadute applicative della procedura di qualificazione proposta e alcune considerazioni conclusive in merito alle attività svolte e ai possibili sviluppi futuri della ricerca, anche in considerazione delle potenzialità e dei limiti che la caratterizzano.

2 I SISTEMI SHM

2.1 Definizioni generali

Il *monitoraggio strutturale* (SHM) delle opere civili è da intendersi come l'insieme delle attività di misura delle grandezze fisiche di riferimento, attraverso una rete di strumenti e di un sistema di acquisizione/registrazione automatica, e dell'attività di interpretazione delle misure basata su un complesso di procedure aventi lo scopo di permettere l'identificazione dei fenomeni in atto, quindi la valutazione delle condizioni di sicurezza presenti e delle loro tendenze evolutive. Esso consente il rilevamento dell'evoluzione nel tempo del comportamento di un sistema strutturale, inteso come sistema fisico oggetto di interesse, attraverso misure strumentali acquisite mediante sensori al fine di determinarne la condizione. Il comportamento di un sistema strutturale rispetto alle azioni ad esso applicate è determinato in termini di risposta. La risposta in un certo istante, o stato, può essere descritta mediante la misura di un insieme di grandezze, generalmente di tipo cinematico (spostamenti, velocità, ecc.) e di tipo dinamico (sforzi), dette *variabili di stato* che sono misurate in punti significativi della costruzione che sulla base di un modello fissato sono in grado di descriverne configurazione e stato di sollecitazione [1]. L'obiettivo del SHM consiste nel rilevamento dello stato di una struttura durante la costruzione e/o in esercizio attraverso misure strumentali di varia natura e basate su diversi principi fisici, allo scopo di studiarne l'evolversi nel tempo, identificando e quantificando le fenomenologie che, coinvolgendo le azioni o le resistenze dei materiali strutturali, governano i processi del degrado e dell'obsolescenza. Con il monitoraggio strutturale si usano sensori per comprendere lo stato di condizione di una struttura. In termini astratti possiamo dire che monitorare significa dedurre in maniera logica lo stato di un sistema (la nostra struttura), sulla base di osservazioni (le misure strumentali), avendo fatto determinate ipotesi sul possibile stato della struttura (conoscenza pregressa o a priori) e sulla relazione fra stato e osservazioni (modello).

Le attività di monitoraggio in fase di esercizio consentono di conoscere le condizioni in cui si trova una struttura e pertanto sono fondamentali al fine della gestione della struttura, consentendo di intraprendere interventi razionali e tempestivi (a seguito, ad esempio, eventi eccezionali o degrado). In seguito all'attivazione di un processo di monitoraggio, infatti, è possibile programmare in maniera razionale l'ispezione/manutenzione con un criterio di priorità, allocare risorse economiche in maniera ottimale concentrandole sugli elementi che presentano maggiori criticità, ambire ad un'estensione della vita residua di opere rilevanti, accrescere ad aggiornare la conoscenza del comportamento di strutture.

Alla base del processo di controllo ci sono un sistema di raccolta e gestione dati derivanti da una rete di sensori installati sulla struttura, un insieme di procedure di elaborazione dei dati che consentono la valutazione delle condizioni e, infine, delle procedure decisionali. Il processo di monitoraggio, inoltre, coinvolge una serie di attori che possono essere individuati principalmente in: committente, progettista strutturale (che ne definisce gli obiettivi sulla base dei risultati di un'analisi iniziale), progettista del sistema di monitoraggio (il quale, sulla base degli obiettivi esegue un progetto preliminare del sistema rispetto ad esempio a numero e collocazione di sensori, architettura del sistema di acquisizione/trasmissione dati, etc.), progettista esecutivo (che definisce le specifiche di acquisizione e installazione del sistema), fornitore/installatore, gestore del sistema (che cura l'analisi e l'interpretazione dei dati). Un sistema di monitoraggio strutturale si compone di una rete di strumenti per la misura delle grandezze fisiche di riferimento, di un sistema di acquisizione e registrazione automatica delle misure e di un complesso di procedure aventi lo scopo di permettere la validazione e l'interpretazione delle misure.

Un sistema SHM può essere definito come la combinazione di due sistemi: (i) un sistema di sensori e altre strumentazioni ed (ii) un sistema di tool di elaborazione, analisi e gestione, avente lo scopo di valutare la performance (in termini di requisiti di operabilità, sicurezza e durabilità) della struttura oggetto di monitoraggio soggetta ad azioni ordinarie, intense ed estreme, ed ottenere la diagnosi e la prognosi strutturale [2]. La strategia di monitoraggio può essere, invece, definita come l'insieme delle tecniche e dei metodi per arrivare alla caratterizzazione dello stato di salute della struttura attraverso misure strumentali. La definizione della strategia presuppone la scelta delle grandezze fisiche da misurare e dei modelli con cui esse sono processate per identificare i parametri di monitoraggio con un certo livello di accuratezza.

Quando si parla di strategia di monitoraggio, un parametro di fondamentale importanza è il fattore tempo, in quanto esso influenza in maniera sostanziale la complessità e, quindi, i costi del processo di monitoraggio. Rispetto al tempo è possibile distinguere due differenti strategie SHM

- *Monitoraggio temporaneo periodico*: può essere indicato per controllare l'evoluzione di stati strutturali individuati rispetto ad un modello previsionale oppure per fenomeni di tipo stagionale. In questo caso, si possono prevedere campagne di misure discontinue nel tempo, secondo programmi di ispezione messi in opera con una periodicità adeguata ai meccanismi di degrado oggetto di monitoraggio, e sensori installati sulla struttura non in modo permanente. La campagna sperimentale viene messa in opera periodicamente sulle strutture, ad esempio almeno una volta all'anno, alla chiusura di un ciclo termico stagionale completo.

- *Monitoraggio di tipo occasionale, o di breve durata:* può consentire di ottimizzare le risorse quando a seguito di ispezioni si conosce l'esistenza e l'estensione di fenomeni di degrado in atto oppure in caso di eventi accidentali localizzati.
- *Monitoraggio di tipo continuo e permanente nel tempo:* un monitoraggio strumentale continuo nel tempo basato su catene di misura permanentemente installate sulla struttura, mira all'accertamento tempestivo dell'integrità strutturale e alla raccolta di dati rappresentativi dell'evoluzione della risposta strutturale rispetto alle condizioni di esercizio e rispetto alla eventuale insorgenza di processi di degrado o eventi di tipo accidentale. In virtù del suo carattere permanente, il sistema di monitoraggio richiede un adeguato progetto esecutivo, anche con la valutazione degli aspetti relativi all'installazione, alla manutenzione e alla corretta gestione del sistema stesso. Tale soluzione appare senza dubbio la più completa ed affidabile, tuttavia, non sempre essa è preferibile. Infatti, tale soluzione prevede che il sistema sia installato in modo permanente su una struttura per rimanere in funzione per l'intera vita operativa, acquisendo dati a frequenze elevate o in real-time, disponendo generalmente dispositivi notevolmente differenti tra loro per riuscire a controllare potenzialmente la condizione della struttura rispetto a varie cause/fenomeni. Inoltre, la durabilità e la manutenibilità di un sistema di monitoraggio permanente sono aspetti chiave, in quanto, alla stregua della struttura, il sistema sarà sottoposto a differenti fenomeni che potrebbero ridurne l'efficacia, pertanto, si dovrà prevedere la possibilità anche di sostituire alcuni componenti.

Con riferimento al monitoraggio di tipo continuo e permanente, è possibile identificare due differenti tipi di approcci di monitoraggio [2]:

- *Monitoraggio completo (white-box):* questo monitoraggio, preferibile per strutture complesse, prevede l'installazione di un numero significativo di sensori tale da consentire una completa caratterizzazione della risposta statica e/o dinamica dell'opera e tale da garantire la taratura di un modello numerico di riferimento. La frequenza di campionamento, per ciascuno strumento, deve essere scelta sulla base del fenomeno fisico oggetto del controllo. La diagnostica deve essere supportata da una adeguata modellazione numerica di riferimento, debitamente aggiornata ("model updating") al fine di pervenire a un modello rappresentativo della condizione della struttura all'inizio del monitoraggio, definendo così la condizione di base a cui riferire i relativi livelli di soglia, identificati rispetto a predeterminati scenari di danno. Tali scenari di danno saranno opportunamente identificati, stimati e combinati in funzione delle caratteristiche

intrinseche della struttura monitorata, nonché della geometria, schema statico e condizioni ambientali. Le soglie legate alla simulazione degli scenari di danno con entità dipendente dai livelli di sicurezza accettabili per l'opera saranno in generale integrate con analisi di identificazione di anomalie o di identificazione del danno di tipo “data-driven”, basate cioè su procedure di analisi dei dati di tipo statistico le cui soglie sono definite in modo da consentire l'individuazione di anomalie (“anomaly detection”) rispetto ad un trend di riferimento per i parametri oggetto di monitoraggio. Il monitoraggio completo può essere inteso sia come spazialmente completo che come spazialmente incompleto ma rappresentativo.

- *Monitoraggio completo (black-box)*: tale opzione è generalmente caratterizzata da una minore numerosità di strumenti installati in punti chiave lungo l'intero viadotto e/o a campione solo su quegli elementi strutturali principali a cui può riferirsi il comportamento tipico della struttura oggetto di monitoraggio (es. in un viadotto di numerose campate simili, vengono monitorate alcune campate-tipo, rappresentative delle altre per tipologia di sezioni trasversali, lunghezza e schema statico). Tale monitoraggio avviene secondo procedure di tipo prevalentemente data-driven, a seguito di una adeguata elaborazione dei dati a valle di un periodo iniziale di training. Il rilevamento delle anomalie è una fase del “data mining” che identifica dati, eventi e/o osservazioni che si discostano dal comportamento normale di un set di dati. Dati anomali possono indicare criticità di comportamento o variazioni indotte da modifiche delle condizioni al contorno (condizioni di vincolo, condizioni ambientali, azioni esterne, eventi eccezionali) o progressione di danneggiamenti (in tal caso si parla di “damage detection”). L'apprendimento automatico e tecniche di machine learning possono essere utilizzate in questi casi per automatizzare il rilevamento delle anomalie. Tale approccio di monitoraggio può essere considerato un livello di base idoneo ad ottenere almeno il primo livello di identificazione delle anomalie, consentendo allo stesso tempo di limitare l'impatto economico in termini di varietà e numerosità dei sensori.

La scelta dell'attivazione di un sistema SHM può avvenire per perseguire diversi obiettivi, tra i quali è possibile riconoscere in particolare due casi: (i) il controllo delle condizioni in cui si trova la struttura rispetto a possibili stati limiti (di esercizio o ultimi); (ii) l'individuazione e l'eventuale conseguente quantificazione di eventuali danni o processi di degrado in atto. Nel primo caso, il sistema è progettato per monitorare i valori di alcune variabili di stato significative opportunamente scelte, confrontarli con i relativi valori limite e quindi, eventualmente, intraprendere azioni opportune.

Nel secondo caso, si vuole identificare un comportamento anomalo, quindi un andamento (e non un valore) non in linea rispetto alle previsioni fatte.

La complessità di un sistema SHM presuppone un'analisi "personalizzata", cioè sviluppata caso per caso, quindi una fase di progettazione concentrata sull'obiettivo principale di ottenere il miglior impiego delle risorse economiche a disposizione. Sarà necessaria un'analisi costi/benefici approfondita *case-by-case*, in grado di tener conto, tra l'altro, dell'importanza dell'opera, delle condizioni ambientali in cui la struttura sorge, della complessità/innovatività del sistema strutturale, l'affidabilità del monitoraggio rispetto alla tipologia investigata, tra altri aspetti.

Nel seguito del capitolo 2, si fornisce una trattazione approfondita, sebbene non esaustiva, dei sistemi di monitoraggio strutturale e delle loro principali peculiarità. Il paragrafo 2.2 descrive i principi fondamentali alla base della progettazione di un sistema SHM per opere civili. I paragrafi successivi, invece, riportano una descrizione dettagliata delle componenti fondamentali che possono costituire un generico sistema SHM, e delle loro caratteristiche specifiche che determinano la performance della strategia di monitoraggio.

2.2 Progetto di un sistema SHM

Il progetto di un sistema di monitoraggio è un processo logico che presenta analogie con la comune progettazione strutturale [1]. La progettazione strutturale ha come obiettivo la stabilità della struttura con un appropriato livello di sicurezza. Il processo di progettazione strutturale comprende: definizione dei carichi di progetto; calcolo delle sollecitazioni (domanda strutturale) con il modello strutturale; scelta della soluzione tecnologica che garantisce la resistenza (capacità strutturale). Il progetto è soddisfacente se la sollecitazione è minore della resistenza. Le prestazioni del sistema strutturale sono valutate con la probabilità di collasso. La progettazione del monitoraggio ha come obiettivo la conoscenza dello stato con un appropriato livello di confidenza. Il processo di progettazione del sistema di monitoraggio comprende: definizione dell'accuratezza con cui deve essere identificato lo stato; calcolo dell'accuratezza richiesta dalle misure con un modello (che collega osservazioni a stato); scelta della soluzione tecnologica per i sensori. Il progetto è soddisfacente se l'accuratezza dei sensori è migliore dell'accuratezza richiesta. Pertanto, un approccio domanda-capacità può guidare anche il processo di progettazione di un sistema SHM. La domanda può essere espressa in termini di requisiti minimi di accuratezza dell'informazione fornita dal sistema, mentre la capacità può essere espressa in termini della sua accuratezza attesa. Il confronto tra domanda e capacità guida la scelta di tecniche e metodi per il monitoraggio (vedi flow-chart in Figura 1).

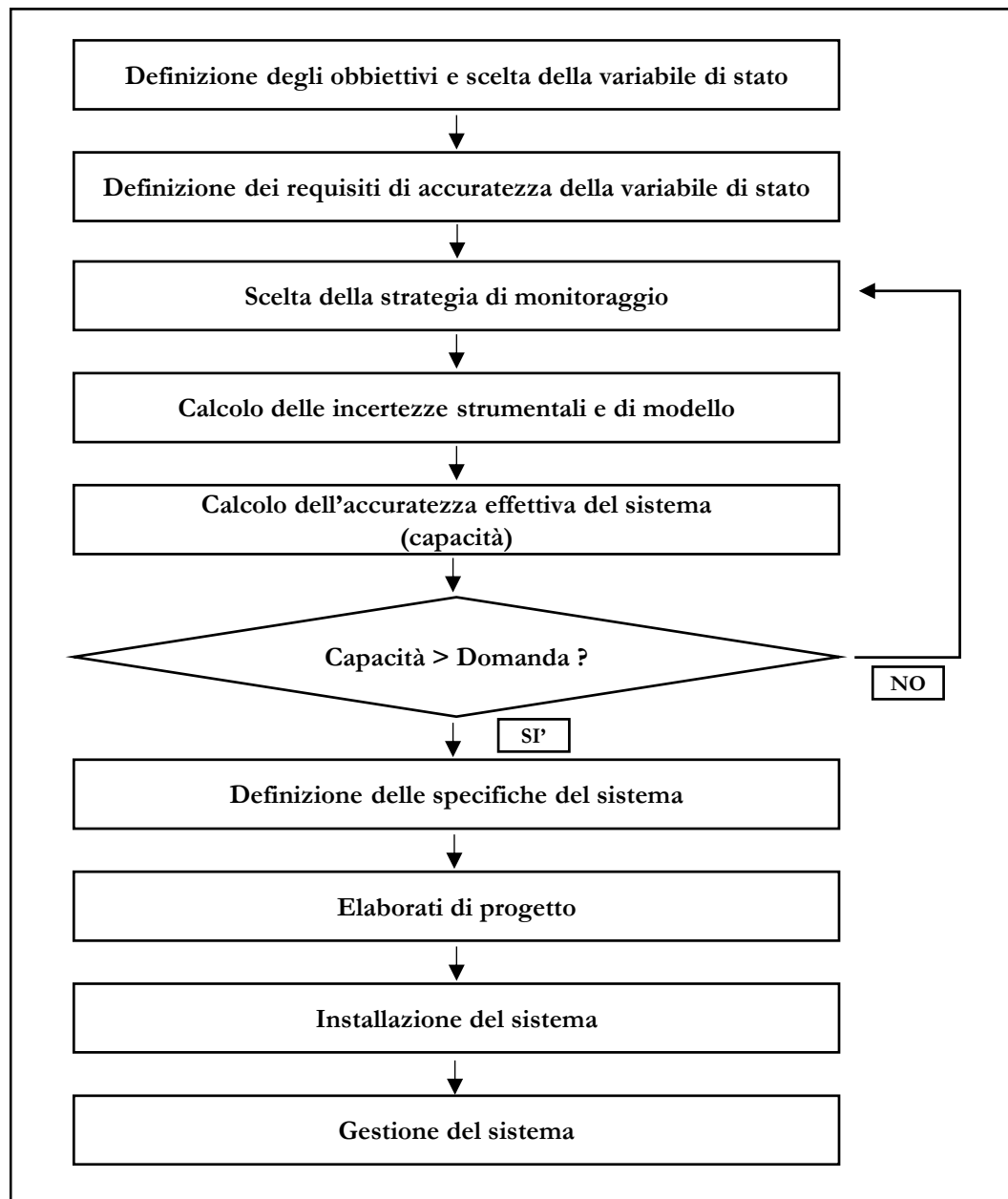


Figura 1 – Progettazione di un sistema di SHM secondo un approccio domanda-capacità [1]

In linea generale, la progettazione di un sistema SHM prevede due livelli: il progetto di massima e il progetto esecutivo. Con riferimento ad un progetto di massima di un sistema SHM, è possibile individuare una serie di attività da considerare per poter definire una soluzione idonea ad essere in seguito sviluppata a livello esecutivo. Di fondamentale importanza è, innanzitutto, definire in maniera analitica gli obiettivi generali del SHM. Troppo spesso, infatti, il committente non individua gli obiettivi in maniera specifica sia in termini di target da raggiungere che di efficacia (accuratezza) con cui gli stessi devono essere raggiunti, con ripercussioni inevitabili anche in termini economici. In

accordo allo standard UNI TR 11634 [1], le esigenze del committente devono essere opportunamente elaborate dal progettista del sistema con lo scopo di individuare target analitici adottando indici o classificazioni presenti in documenti di letteratura internazionali, quali indici di danno o di prestazione, indici di vita residua, classificazioni descrittive o binarie ([3]-[4]). Esempi di obiettivi di un sistema di monitoraggio sono:

- conoscere una caratteristica della risposta strutturale (per esempio: l'ampiezza massima di vibrazione di un solaio in esercizio; il drift di interpiano permanente dopo l'azione sismica);
- conoscere una caratteristica delle azioni sulla struttura (per esempio: l'input sismico);
- calibrare i parametri di un modello strutturale (per esempio: determinare forme modali e frequenze proprie di un edificio);
- definire lo stato di efficienza di un edificio;
- riconoscere la presenza di danno causato dall'azione sismica;
- localizzare o quantificare il danno sismico;
- stimare o aggiornare un indice della sicurezza strutturale (per esempio: la probabilità di collasso di una struttura);
- stimare o aggiornare un indice della vita residua della struttura.

Una volta definiti gli obiettivi, è necessario procedere ad un'analisi preliminare dell'opera rispetto a diversi aspetti in modo da individuare grandezze critiche da monitorare, come variabili di stato (caratteristiche di risposta della struttura o delle azioni su esse) o parametri del sistema (che definiscono il comportamento strutturale, come i parametri modali). Tali grandezze saranno i dati di input del modello interpretativo. La scelta delle grandezze da monitorare è di importanza chiave per evitare di controllare parametri ininfluenti o viceversa non misurare entità significative. Le grandezze misurate possono essere meccaniche, termodinamiche, chimiche, elettromagnetiche. A seconda dell'applicazione, una variabile di stato può essere:

- un parametro di risposta (per esempio: il valore caratteristico di una time history di accelerazione o spostamento);
- un parametro relativo ad un modello che si intende identificare (per esempio: la frequenza del primo modo di vibrare);
- un indice o indicatore di danno (per esempio la classificazione del danno dell'Eurocodice 8-3 [5], la classificazione del danno FEMA [3] o l'indice di danno di Park e Ang [4]);
- un indice di prestazione (es. la probabilità di collasso);
- un indice della vita residua.

A seconda della tipologia della variabile di stato, essa può essere espressa in forma di:

- classificazione binaria (per esempio: struttura ‘danneggiata’, ‘non danneggiata’);
- classificazione non binaria ovvero un indice che può assumere una serie discreta di valori (per esempio: danno ‘lieve’, ‘medio’, ‘grave’, ‘collasso’ [3]);
- parametro numerico (per esempio: lo spostamento di interpiano massimo o residuo, un indice di danno continuo, un parametro modale);
- funzione (per esempio: una funzione di risposta in frequenza);
- una combinazione delle forme suddette.

L’efficacia del monitoraggio strutturale dipende dall’affidabilità con cui è fornita dal sistema la variabile di stato. Pertanto, ai fini del progetto del sistema di monitoraggio è opportuno specificare con quale livello di accuratezza questa debba essere fornita. Il modo con cui è specificata l’accuratezza richiesta dipende dal tipo di variabile (classificazione, quantità numerica o funzione) e dalla forma con cui è descritta l’incertezza (deterministica o probabilistica). Tale incertezza è comprensiva di tutte le incertezze che intervengono nel processo, o modello di interpretazione, per mezzo del quale l’informazione è ottenuta a partire dalle osservazioni strumentali. Tuttavia, allo stato attuale delle conoscenze il livello di accuratezza può essere stabilito a priori solamente per alcune classi di problemi. In ogni caso, il livello di accuratezza richiesto può essere stabilito sulla base di valutazioni empiriche tenuto conto delle tecnologie disponibili. La forma in cui deve essere espressa l’incertezza associata alla variabile di stato fornita dal sistema di monitoraggio dipende dalla forma in cui viene espressa l’informazione stessa.

Il modo più semplice per descrivere l’incertezza di una classificazione è la probabilità di errata classificazione (o “misclassificazione”), definita come la frequenza relativa, normalmente espressa in percentuale, con cui il sistema identifica uno stato sbagliato. Quando la classificazione è binaria fra uno stato definibile ‘normale’ e uno stato ‘anomalo’ è bene fare ricorso alla definizione delle probabilità di falso positivo (o errore di primo tipo) e di falso negativo (o errore di secondo tipo).

L’incertezza tollerata di un singolo parametro rappresentato dal suo valore numerico può essere descritta con l’errore massimo di stima del parametro, definito come lo scarto massimo fra la stima del parametro ottenuto attraverso il monitoraggio e il suo valore esatto o valore di riferimento. L’errore massimo di stima può essere espresso in valore assoluto (es. errore massimo di stima dello spostamento di interpiano massimo = ± 2 mm) oppure, quando l’errore accettabile dipende dall’ampiezza del parametro, in termini percentuali (es. valore massimo di stima dello spostamento residuo $= \pm 5\%$). In alternativa, è possibile descrivere l’incertezza tollerata in modo probabilistico

attraverso i valori accettabili di varianza o scarto tipo del parametro. Quando lo scarto tipo dipende dall'ampiezza del parametro, può essere opportuno descrivere l'incertezza attraverso il coefficiente di variazione. Infine, l'incertezza tollerata di una funzione può essere descritta attraverso la banda di confidenza.

Definiti gli obiettivi, i parametri da monitorare (ad essi intrinsecamente correlati sulla base del modello della struttura) e l'efficacia del monitoraggio, si può procedere all'individuazione della strategia di misura più opportuna. Tale strategia comprende in particolare la definizione del layout dei sensori rispetto alla tipologia, al numero e alle posizioni, e la definizione delle modalità di acquisizione. Le varie componenti del sistema di acquisizione e quindi l'architettura del sistema di SHM sono definite solo in via preliminare nel progetto di massima, per poi essere progettato nel dettaglio in fase esecutiva. I dati in uscita dal sistema di acquisizione si presentano come sequenze temporali con frequenza scelta. Generalmente, quindi, essi devono essere opportunamente trattati per poter essere utilizzati dai modelli interpretativi mediante algoritmi specifici fissati in funzione al caso studio. I dati sulla condizione della struttura vengono quindi trasferiti al modello interpretativo opportunamente scelto e confrontati con i risultati di un modello numerico in grado di riprodurre, con una assegnata accuratezza, il comportamento della struttura, allo scopo di individuare eventuali fonti di errori e di ridurle, quindi definire procedure decisionali.

Dal punto di vista fisico, un sistema di monitoraggio può essere individuato concettualmente da una serie di componenti principali, come di seguito elencati:

- Strumenti di misurazione o “sensori”
- Sistema di alimentazione
- Sistema di acquisizione dati
- Sistema di trasferimento dati
- Sistema di elaborazione e archiviazione (storage) dei dati

Recentemente, nelle applicazioni di SHM, tale distinzione spesso non si ritrova in quanto parte delle componenti citate può coesistere nella medesima entità.

In linea generale, un sensore è un dispositivo che fornisce un output utilizzabile in risposta a una quantità specificata che viene misurata [6]. Il sensore è così chiamato in quanto capace di rilevare un segnale in ingresso, cioè una variazione in alcune caratteristiche fisiche che cambiano in risposta a qualche eccitazione, e trasformarlo in un segnale di uscita che può essere misurato e/o registrato, generalmente di tipo elettrico. Il tipo o la quantità del segnale di uscita dipende dal tipo di sensore utilizzato.

Per sistema di alimentazione si intende un apparato in grado di fornire la necessaria alimentazione a tutti i componenti il sistema di monitoraggio, che sarà di tipo autonomo e/o derivato dalla rete elettrica di linea, a seconda delle condizioni presenti sul sito di monitoraggio. Tale componente è fondamentale per il funzionamento di sensori di tipo attivo.

Il sistema di acquisizione dati svolge il compito di comunicare con il sensore (o sensori) a cui è collegato, memorizzando le informazioni da essi rilevati e trasformandole da unità elettriche a unità fisiche.

Il trasferimento delle informazioni dal punto di acquisizione al punto di utilizzo è eseguito mediante un sistema di trasferimento dati. Esso è generalmente distinto in due tipologie: sistemi cablati, in cui la trasmissione del segnale avviene via cavo (elettrico o ottico), e sistemi wireless, che sfruttano la trasmissione mediante radio-frequenza (RF).

Il sistema di elaborazione e archiviazione (storage) dei dati, svolge il compito di processare e, eventualmente, memorizzare i segnali di misurazione derivanti dal processo di acquisizione e trasferimento, utilizzando differenti tecniche e metodi, al fine di estrarre informazioni utili sul sistema monitorato. Gli algoritmi di elaborazione del segnale possono essere classificati nelle seguenti tre categorie: analisi nel dominio del tempo, analisi nel dominio della frequenza e analisi ibride tempo / frequenza.

Nel seguito, per ciascuna delle componenti di un SHM, si fornirà una descrizione dettagliata e si riporteranno le caratteristiche di maggiore rilievo ai fini della qualificazione di un sistema SHM, identificate come *caratteristiche essenziali*. Tale descrizione è stata ottenuta da un approfondito lavoro di revisione critica della letteratura inerente all'argomento, che tuttavia non è da ritenersi necessariamente esaustiva data la grande variabilità e la rapida evoluzione delle soluzioni disponibili.

2.3 Sensori

Un sensore, come anticipato nel paragrafo precedente, è un dispositivo capace di rilevare una variazione in alcune caratteristiche fisiche (segnale in ingresso) che cambiano in risposta a qualche eccitazione e di trasformarla in un segnale di uscita; pertanto, esso è spesso detto anche trasduttore. Più nello specifico, il sensore provvede a estrarre l'informazione d'interesse dalla grandezza fisica a cui è collegato e a trasferirla, sotto forma di segnale (generalmente come differenza di potenziale).

I sensori possono essere classificati, innanzitutto, in passivi o attivi. I sensori attivi richiedono un'alimentazione esterna per funzionare e sono in grado di produrre amplificazione dei segnali. Invece un sensore passivo genera un segnale di uscita in risposta a qualche stimolo esterno, in maniera quindi

diretta, andando a modificare le loro proprietà fisiche, come resistenza, capacità, induttanza, ecc. I sensori possono essere ulteriormente suddivisi in sensori analogici e digitali. I primi producono un segnale o una tensione di uscita continua nel tempo che è generalmente proporzionale alla quantità misurata, come temperatura, velocità, pressione, spostamento, deformazione ecc. Come suggerisce il nome, i sensori digitali, invece, producono segnali di uscita di tipo digitale e discreti, rappresentazione della quantità misurata. Tali segnali sono di tipo binario sotto forma di un "1" logico o uno "0" logico ("ON" o "OFF"). Ciò significa quindi che un segnale digitale produce solo valori discreti (non continui) che possono essere emessi come un singolo "bit", (trasmissione seriale) o combinando i bit per produrre un'unica uscita "byte" (trasmissione parallela). Rispetto ai segnali analogici, i segnali o le quantità digitali hanno precisioni molto elevate e possono essere entrambi misurati e “campionati” ad una velocità di clock molto elevata. La precisione del segnale digitale è proporzionale al numero di bit utilizzati per rappresentare la quantità misurata. Questa precisione può essere mantenuta poiché le quantità digitali vengono manipolate ed elaborate molto rapidamente, milioni di volte più velocemente dei segnali analogici. Nella maggior parte dei casi, i sensori analogici generalmente richiedono un'alimentazione e alcune forme di ulteriore amplificazione o filtraggio del segnale al fine di produrre un segnale elettrico adatto che possa essere misurato. Un ottimo modo per ottenere sia l'amplificazione che il filtraggio con un unico circuito è quello di utilizzare un amplificatore operazionale. Oltre al sensore vero e proprio, la misura prevede il condizionamento del segnale in uscita dal sensore che attraversa il cavo di collegamento al sistema di conversione analogico-digitale. In particolare, il segnale proveniente dal sensore arriva al sistema di condizionamento, che provvede a modificare ed ottimizzare le caratteristiche del segnale stesso e inviarlo ad un sistema di conversione che, a sua volta, trasforma la natura dell'informazione da analogica a digitale, in modo che, sotto quest'ultima forma, venga trasferita al sistema di controllo che provvede a memorizzare e/o elaborare l'informazione numerica ottenuta dal sistema precedente secondo una prefissata sequenza di operazioni. In realtà, più recentemente, si sta andando verso strumenti “con elettronica a bordo” in cui lo strumento contiene tutto in sé, talvolta anche la trasmissione al sistema di raccolta.

L'evoluzione dell'elettronica, sia analogica che digitale, ha reso disponibile sul mercato un numero sempre maggiore di dispositivi elettronici di misura a basso costo e di notevoli prestazioni. Tali strumenti trovano il loro impiego nelle più svariate applicazioni, contribuendo in maniera notevole sia alla semplificazione dei processi di misura che all'incremento dell'affidabilità e della precisione del risultato. Attualmente, esistono numerose tipologie diverse di sensori che si distinguono in funzione della grandezza da misurare e dal campo di applicazione del sistema di SHM. Tuttavia, generalmente, è possibile individuare una serie di specifiche metrologiche correlate alle proprietà dello strumento, come di seguito definiti.

- *precisione*: esprime il grado di concordanza tra valori misurali ottenuti da un certo numero di misurazioni ripetute dello stesso misurando eseguite in condizioni specificate. Essa viene generalmente espressa mediante misure di imprecisione come scarto tipo, varianza, coefficiente di variazioni [7];
- *ripetibilità*: esprime il grado di concordanza tra i risultati di successive misurazioni dello stesso misurando eseguite nelle stesse condizioni specificate [7];
- *stabilità*: esprime la capacità dello strumento di misura a mantenere le proprie caratteristiche metrologiche costanti nel tempo [7];
- *sensibilità*: si definisce come rapporto tra la variazione dell'uscita dello strumento e la corrispondente variazione del misurando [7];
- *sensibilità alle condizioni ambientali*: esprime la variazione di sensibilità di un sensore in funzione al cambiamento di una qualsiasi condizione ambientale che influisce sulla misurazione [7];
- *campo di misura*: esprime l'intervallo di misura all'interno del quale sono specificati i limiti di incertezza dello strumento [8];
- *linearità*: esprime l'abilità di uno strumento di misura di fornire un'indicazione avente una relazione lineare con una quantità definita al netto di grandezze di influenza. Di conseguenza, Quindi la non-linearità è definita come la deviazione massima delle letture di output da questa linea retta [8];
- *rapporto segnale/rumore (SNR)*: è definito come il rapporto, all'interno di un certo intervallo (banda) di frequenza, tra l'ampiezza picco-picco del segnale e il rumore in termini di RMS [9];
- *funzione di trasferimento*: è la funzione di trasferimento in cui le quantità complesse sono le trasformate di Fourier di ingresso ed uscita dello strumento [10];
- *taratura e calibrazione*: insieme di operazioni volte a stabilire la relazione tra indicazione e risultato di misura, a determinate condizioni e in accordo alle norme di riferimento [8];
- *durabilità. o vita utile*: definita come la capacità di funzionamento richiesto, in determinate condizioni d'uso e manutenzione, fino al termine della vita utile, anche in relazione alle condizioni di esercizio ed eccezionali [11];
- *manutenibilità e sostituibilità*: come la capacità di essere mantenuto. o ripristinato ad uno stato di funzionamento richiesto, in determinate condizioni d'uso e manutenzione [11];
- *grado di protezione* alla polvere e all'acqua espresso in Codice IP [12];

Tra le caratteristiche essenziali da considerare di un sensore rispetto ad un certo caso applicativo ci sono quelle legate all'installazione del sensore stesso

- *modalità di installazione*
- *dimensioni e peso;*
- *consumo elettrico;*
- *tipo di alimentazione.*

Sensori tipicamente inclusi nei moderni sistemi di monitoraggio strutturale sono sensori di vibrazione, deformazione, fessurazione, corrosione, spostamento, inclinazione, velocità del vento, umidità e temperatura. In generale, le tecniche di identificazione del danno possono essere raggruppate in due grandi categorie: i metodi locali e quelli globali. I primi mirano a identificare il danno alla scala del componente o del sub-componente strutturale. Molte delle metodologie di prova non distruttive, tra cui le indagini ultrasoniche, appartengono alla classe dei metodi locali. Tali tecniche, tuttavia, sebbene siano applicate su porzioni limitate di struttura (quelle interessate dal danno), richiedono personale addestrato per le operazioni di campo, e una preventiva conoscenza delle zone potenzialmente interessate dal danno al fine di definire una scala di priorità per le ispezioni. Ne consegue un costo associato generalmente elevato. Le metodologie globali di identificazione del danno, al contrario, si basano sull'analisi delle proprietà di vibrazione delle strutture (che sono caratteristiche globali). I sensori di vibrazione sono solitamente impiegati per monitorare il comportamento globale della struttura e, in particolare, le variazioni delle proprietà dinamiche fondamentali. I sensori di deformazione, al contrario, mirano a identificare condizioni di danno locali. Gli altri tipi di sensori (corrosione, spostamento, inclinazione) sono solitamente impiegati per caratterizzare specifiche tipologie di danno. I sensori di temperatura e umidità sono solitamente adoperati in affiancamento alle precedenti tipologie di sensori al fine di caratterizzare variazioni sistematiche della risposta strutturale dovute a fattori ambientali. Ad esempio, il periodo di una struttura può variare significativamente per effetto delle escursioni termiche giornaliere, per cui un'affidabile identificazione del danno richiede un'appropriata valutazione degli effetti dei fattori ambientali. Sensori in fibra ottica sono spesso impiegati per l'individuazione di fessure in strutture in cemento armato, mentre non esistono sensori analoghi per le strutture in acciaio, in particolare finalizzati all'identificazione del danno nelle giunzioni saldate. I sensori di corrosione non sono ancora pienamente sviluppati, sebbene alcuni prototipi siano stati applicati con successo. Attualmente, misure dirette di spostamento sono eseguite con strumenti GPS, o interferometri laser o radar. Tali sistemi di misura sono impiegati sia per misure di spostamento dinamiche sia per misurare deformazioni permanenti. I sensori di inclinazione sono spesso usati anch'essi per misurare spostamenti/deformazioni permanenti.

Nel seguito, si riporta una breve descrizione ed un'analisi critica delle principali tipologie di sensori maggiormente adoperate nel campo dell'SHM, soffermandosi in particolare su quelli di vibrazione (largamente adoperati per il cosiddetto monitoraggio globale delle strutture) e di deformazione (generalmente adoperati per misurazioni locali), a partire da un'estesa revisione della letteratura scientifica di settore. Particolare attenzione è stata destinata, più nello specifico, alla declinazione delle caratteristiche essenziali più rilevanti per ciascuna soluzione considerata.

2.3.1 Sensori di vibrazione

Nell'ambito del monitoraggio dinamico delle strutture, i sensori più utilizzati sono quelli di tipo accelerometrico. Tale tipologia di sensori consente una valutazione diretta delle forze di inerzia generate da fenomeni dinamici di bassa intensità o alta intensità (in particolare, terremoti). Gli accelerometri inizialmente furono sviluppati per misurare accelerazioni significative, comprese in un intervallo 0,1 - 4g. Negli ultimi decenni, però, le case produttrici hanno virato sempre più verso lo sviluppo di sensori dotati di caratteristiche di sensibilità sempre più elevate che, collegati a una buona unità di acquisizione, consentono di misurare anche valori di accelerazione nell'ordine dei 10^{-6} g. In generale, i sensori accelerometrici derivano dagli accelerografi, strumenti analogici che registravano su carta o su pellicola fotografica. I primi accelerografi furono sviluppati negli Stati Uniti nel 1932 da Frank Wenner. Si trattava di strumenti basati sul principio del sismometro a torsione. La prima registrazione "strong-motion" è relativa al sisma del 10 Marzo 1933 di Long Beach, California, mentre la prima in un edificio risale al 2 Ottobre 1933 nell'attico dell'Hollywood Storage Building, anch'essa in California (Figura 2).

Solo dalla metà degli anni Settanta, però, si iniziò ad integrare i sensori sismometrici con i primi sistemi ad acquisizione digitale, inizialmente a 12 bit. I primi *accelerometri digitali* erano dotati di sensori del tipo "Force Balance" (FBA), basati sull'evoluzione del pendolo meccanico. Il funzionamento si basa sul principio di mantenere ferma una massa oscillante avvolta da un campo magnetico. Ciò che viene misurato è la corrente necessaria a mantenere la massa ferma. Al contrario, gli *accelerometri piezoelettrici* furono pensati fin dall'inizio per applicazioni industriali ed eventualmente strutturali. Il primo strumento commerciale risale al 1938 ad opera di Hans J. Meier del MIT. Questa tipologia di sensore ha trovato una discreta diffusione nel mondo del monitoraggio strutturale solo a partire dagli anni Ottanta. Si basa sul principio dell'effetto piezoelettrico, ossia sulla carica generata da specifici materiali quando questi sono sottoposti a sforzi.

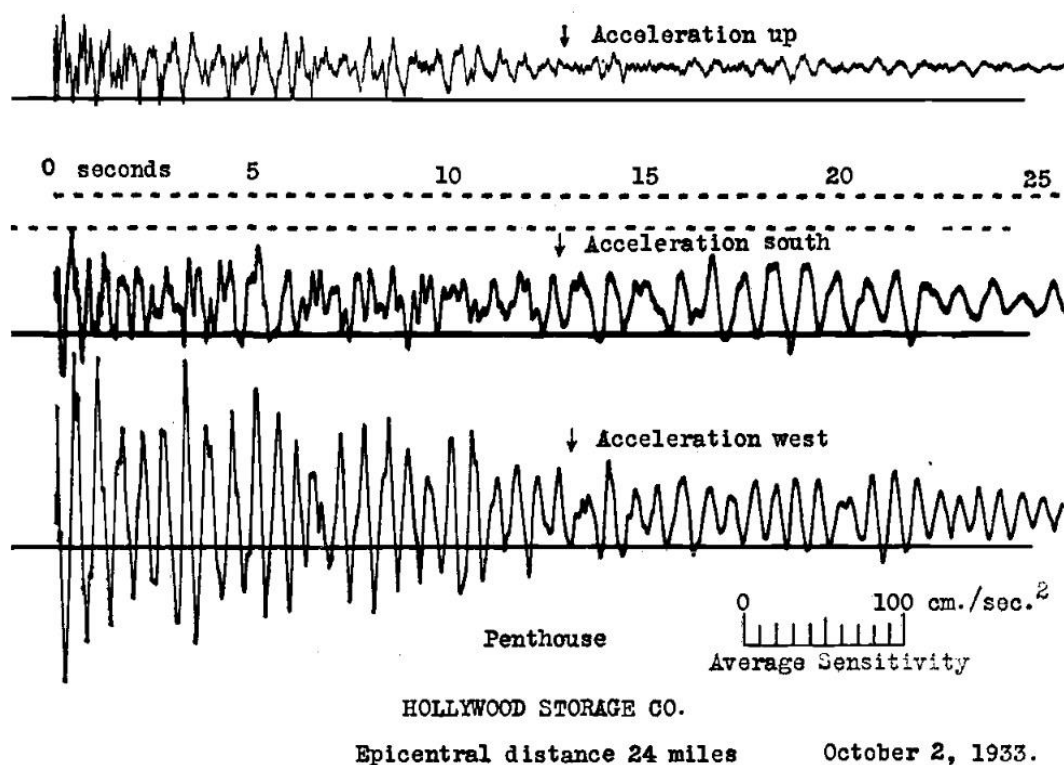


Figura 2 – Primo caso di registrazione accelerometrica su un edificio (2 Ottobre 1933, California)

Gli odierni accelerometri sono composti essenzialmente da sistema di alimentazione, sensore, convertitore analogico digitale, temporizzatore, sistemi di salvataggio e trasmissione dati, CPU. Il sensore, parte del convertitore analogico-digitale e del sistema di alimentazione funzionano in modo analogico, mentre tutto il resto è digitale. Per chiarezza è opportuno inserire alcune definizioni mutuare dal mondo dell'elettronica. Nell'odierna elettronica digitale i numeri vengono organizzati in bit. Un bit può assumere valore logico ZERO od UNO. L'elettronica digitale si basa sulla manipolazione di informazione basata sul codice binario, ossia di zeri ed uni. Esistono molte convenzioni ma in genere si considera uno ZERO se il voltaggio nel circuito è al di sotto di un certo livello mentre si considera un UNO se il voltaggio sta al di sopra di un altro livello. Unendo assieme un numero crescente di bit è possibile rappresentare numeri sempre più grandi. Nel caso, ad esempio, di un accelerometro digitale a 12 bit, che possa registrare un'accelerazione massima di 2g, si dirà che il *fondo scala* (abbreviato come FS) è di 2g e che i valori discreti di accelerazione misurabili saranno in incrementi (risoluzione) di circa 1 mg. Ad essere precisi i valori potranno variare fra -2048 e 2048, dove ovviamente 2048 rappresenta il fondo scala. Un modo alternativo per rappresentare la sensibilità di uno strumento è il decibel (dB). In elettronica esso è definito come $20 \log_{10} A/A_0$, dove il 20 deriva dal fatto che si considera la potenza spettrale che è quadratica e dove A_0 è un'ampiezza di riferimento.

Quindi un accelerometro a 12 bit avrà un intervallo dinamico di circa 66 dB. In Figura 3 è riportato in forma grafica l'equivalenza Bit - dB.

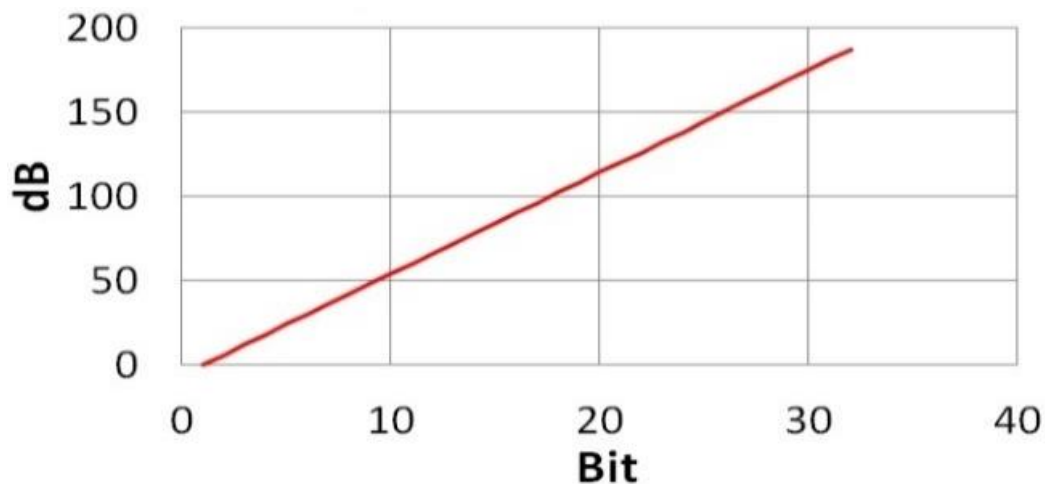


Figura 3 – Equivalenza Bit-dB

Gli accelerometri sono caratterizzati da una serie di proprietà o caratteristiche rispetto a cui valutarne l'opportunità di utilizzo rispetto ai fenomeni che saranno oggetto del monitoraggio, che vanno ad integrare le proprietà generiche precedentemente riportate.

Indipendentemente dal tipo di sensore, il segnale di tensione di uscita è proporzionale alla grandezza fisica misurata attraverso una costante (la sensibilità del sensore). La *sensibilità* è di solito definita come il guadagno del sensore (per esempio, 10 V/g), cioè il rapporto tra la variazione del valore misurato e la variazione del valore reale della grandezza considerata, ed è in qualche modo collegata al segnale più piccolo che può essere registrato. Tuttavia, il segnale rilevabile più piccolo è anche limitato dal *rumore* generato nell'elettronica del sensore stesso. Da un punto di vista generale, un alto guadagno dovrebbe essere preferito in quanto un segnale amplificato minimizza gli effetti di rumore associato alla trasmissione su cavi.

L'*intervallo dinamico* o Dynamic Range (DR) di un sensore (spesso espressa in dB) è, invece, il rapporto tra il più grande e il più piccolo segnale che il sensore può misurare. Attualmente, i migliori accelerometri hanno un range dinamico superiore a 150 dB. Tuttavia, il range dinamico della catena di misura nel suo complesso dipende anche dal range dinamico dell'acquisitore.

La *risoluzione* rappresenta la più piccola variazione della grandezza fisica misurata che determina un cambiamento rilevabile nell'output del sensore. Di solito è espressa in termini assoluti o in percentuale del fondo scala.

Il *fondo scala* indica i valori minimo e massimo della grandezza fisica che può essere misurata dal sensore. Alcuni sensori sono caratterizzati da fondo scala selezionabile dall'utente.

La *sensibilità trasversale* di un sensore quantifica la sua sensibilità al movimento perpendicolare all'asse principale.

Il *tempo di assestamento* di sensori piezoelettrici, rappresenta il tempo necessario al sensore per raggiungere un'uscita stabile quando viene fornita l'alimentazione al sensore.

Il *rumore intrinseco del sensore*, infine, gioca un ruolo fondamentale nel determinare la capacità del sensore di registrare correttamente la risposta strutturale. Infatti, se il segnale da registrare è molto piccolo, esso può essere coperto dal rumore elettronico del sensore.

Le principali tipologie di sensori accelerometrici possono essere distinte in tradizionali e moderne. Nella prima famiglia ritroviamo gli accelerometri piezoelettrici, piezoresistivi e a bilanciamento di forza (FBA), mentre nella seconda ritroviamo gli accelerometri capacitivi MEMS (Micro Electro-Mechanical System) ossia microsistemi elettromeccanici.

Ogni tipologia di sensore presenta vantaggi e limitazioni. Per esempio, i sensori piezoelettrici sono facili da installare e sono caratterizzati da una buona risposta in frequenza (banda larga), ma sono anche fragili e mostrano limiti nella misura di componenti a bassa frequenza; inoltre, il cavo coassiale tipicamente adottato per collegare i sensori con l'hardware di acquisizione dati è più incline a captare rumore dall'ambiente rispetto ai cavi adottati per gli accelerometri force balance (FBA). D'altra parte, i sensori force balance hanno un basso livello di rumore e sono in grado di misurare i segnali a frequenza molto bassa e anche la componente continua. Tuttavia, il limite superiore della banda passante è molto inferiore rispetto al limite di frequenza superiore dei sensori piezoelettrici. Inoltre, sono tipicamente presenti derive nel segnale. I cavi sono costosi e pesanti. I sensori elettromagnetici vantano basso rumore di fondo e cablaggio a buon mercato. Tuttavia, le limitate prestazioni alle basse frequenze ne limitano l'impiego in molte applicazioni di ingegneria civile [13]. Nei sensori piezoelettrici la conversione della grandezza meccanica in grandezza elettrica è ottenuta sfruttando la proprietà piezoelettrica di alcuni materiali naturali (quarzo) o artificiali (ceramici policristallini). Come conseguenza della piezoelettricità, quando viene applicata una forza al cristallo, ioni negativi e positivi si accumulano sulle superfici opposte del cristallo. La quantità di carica accumulata è

proporzionale alla forza applicata. Negli accelerometri piezoelettrici è presente una massa collegata al cristallo. Quando un'accelerazione di input è applicata alla base dell'accelerometro, la forza d'inerzia associata alla massa provoca una deformazione del cristallo. Il materiale piezoelettrico genera così una carica elettrica proporzionale alla sua deformazione [13]. Un esempio di sensore piezoelettrico è riportato in Figura 4.



Figura 4 – Esempio di sensore piezoelettrico

La carica elettrica sui cristalli può essere indotta da compressione, taglio o deformazione flessionale (Figura 5). Ciascun metodo offre vantaggi e svantaggi. Nel metodo a compressione, la massa sismica applica una forza di compressione al cristallo piezoelettrico che è montato su una base rigida. Questo metodo garantisce un'ampia banda in frequenza, ma risente di effetti termici, a causa del contatto tra il cristallo e la base del sensore. Inoltre, un'eventuale deformazione del supporto viene trasmessa al cristallo alterando le letture. Nei sensori che lavorano a taglio il cristallo è montato tra un montante centrale ed una massa esterna: maggiore è la massa collegata e maggiore è la forza di taglio applicata

al cristallo per una data accelerazione. Questi accelerometri garantiscono un'ampia banda in frequenza e non risentono di effetti termici poiché il cristallo non è a contatto con la base. I sensori progettati per lavorare a flessione producono segnali in uscita molto elevati perché il cristallo è sottoposto ad elevati livelli di stress. La curvatura del cristallo può essere il risultato della sua sola massa, ma l'aggiunta di pesi permette di aumentarne la flessione. Questo tipo di accelerometro da una banda più limitata rispetto ai precedenti ed è maggiormente sensibile a vibrazioni eccessive o urti. Questo tipo di accelerometro è in genere più adatto per basse frequenze e per applicazioni con bassa ampiezza di vibrazione.

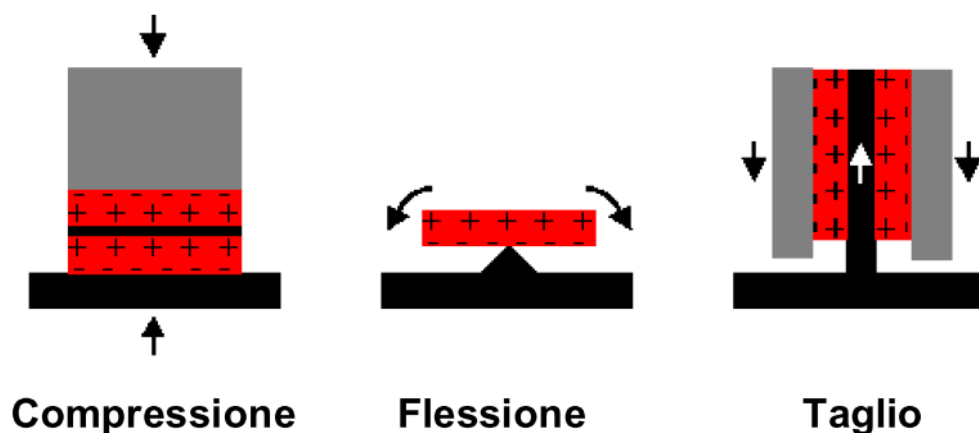


Figura 5 – Principio di funzionamento dei differenti sensori piezoelettrici

La carica raccolta dagli elettrodi sul cristallo piezoelettrico viene trasmessa ad un condizionatore di segnale, il quale converte la carica elettrica in una tensione. Il condizionatore di segnale può essere in remoto o integrato: in quest'ultimo caso si parla di Integrated Electronics Piezo-Electric (IEPE). In presenza di un condizionatore integrato, il cavo del segnale porta con sé anche l'alimentazione necessaria: di conseguenza, il segnale deve essere filtrato per rimuovere le frequenze vicine a quelle della corrente elettrica. Attualmente gli accelerometri IEPE stanno sostituendo quelli con condizionamento in remoto perché offrono un funzionamento semplificato, un costo inferiore e la risoluzione non è influenzata dal tipo e dalla lunghezza del cavo.

Da un punto di vista meccanico, un accelerometro piezoelettrico è equivalente ad un sistema a singolo grado di libertà (SDOF) caratterizzato da una massa oscillante sottoposta ad un input alla base; la molla e lo smorzamento del sistema SDOF sono rappresentati dal materiale piezoelettrico. Di conseguenza, alcune caratteristiche degli accelerometri piezoelettrici possono essere ottenute

dall'analisi della funzione di risposta in frequenza del sistema (Figura 7a). In termini di fase, un rapporto di smorzamento pari a 0.707 porta ad una funzione di fase che è sostanzialmente lineare nel range di frequenza in cui l'ampiezza della risposta in frequenza è piatta. La linearità della fase garantisce che la serie temporale non venga distorta in fase di misurazione (Figura 7b). Al contrario, deviazioni dal valore di smorzamento di 0.707 portano ad una distorsione nella risposta strutturale misurata. Tuttavia, in questi casi, il sensore può essere utilizzato in un range di frequenza fino al 20% della sua frequenza naturale senza distorsione della risposta strutturale misurata. Infatti, in tale intervallo la fase è nulla. La frequenza naturale fondamentale del sensore dipende anche da come esso è montato. Infatti, quando il fissaggio di un sensore alla struttura non è rigido, la frequenza naturale dell'accelerometro può essere inferiore al valore dichiarato dal costruttore. Di conseguenza, si ottiene una banda più ristretta [13]. In termini di ampiezza, il range di frequenza più ampio con guadagno uniforme è associato ad un coefficiente di smorzamento di 0.707. Per questo motivo, alcuni accelerometri sono progettati con smorzamento aggiunto per massimizzare la banda in frequenza. Da un punto di vista generale, indipendentemente dal rapporto di smorzamento, il fattore di guadagno è sostanzialmente uniforme per frequenze fino al 20% della frequenza naturale non smorzata del sensore.

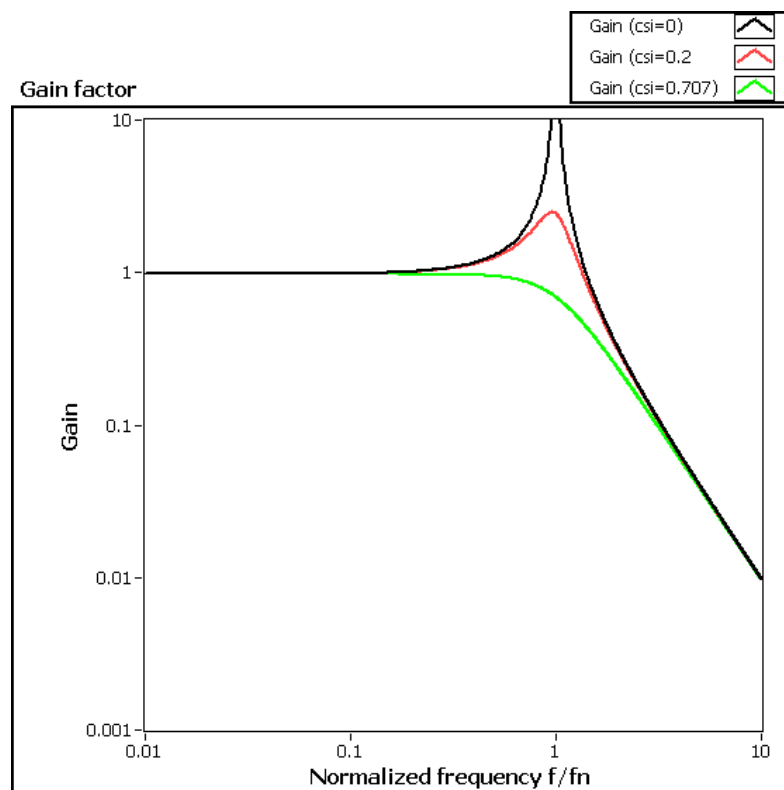


Figura 6 – Funzione di risposta in frequenza di un sensore piezoelettrico in termini di frequenza (a) e fase(b)

I sensori piezoelettrici hanno costi paragonabili agli FBA, ma sono assai più rumorosi. Essi, inoltre, sono caratterizzati da grossi problemi nella gestione dello smorzamento. Il problema principale è la difficoltà a gestire le frequenze più basse che caratterizzano ad esempio gli edifici isolati sismicamente (generalmente essi non sono impiegabili al di sotto di 0,3 Hz), limite insito nel principio di funzionamento e che conseguentemente non potrà venire, probabilmente, superato neppure in prossimi futuri sviluppi industriali. Di per contro, quello che è il loro più grande vantaggio, la possibilità di funzionare a frequenze assai elevate (svariati kHz), è inutile nel campo dell'ingegneria sismica.

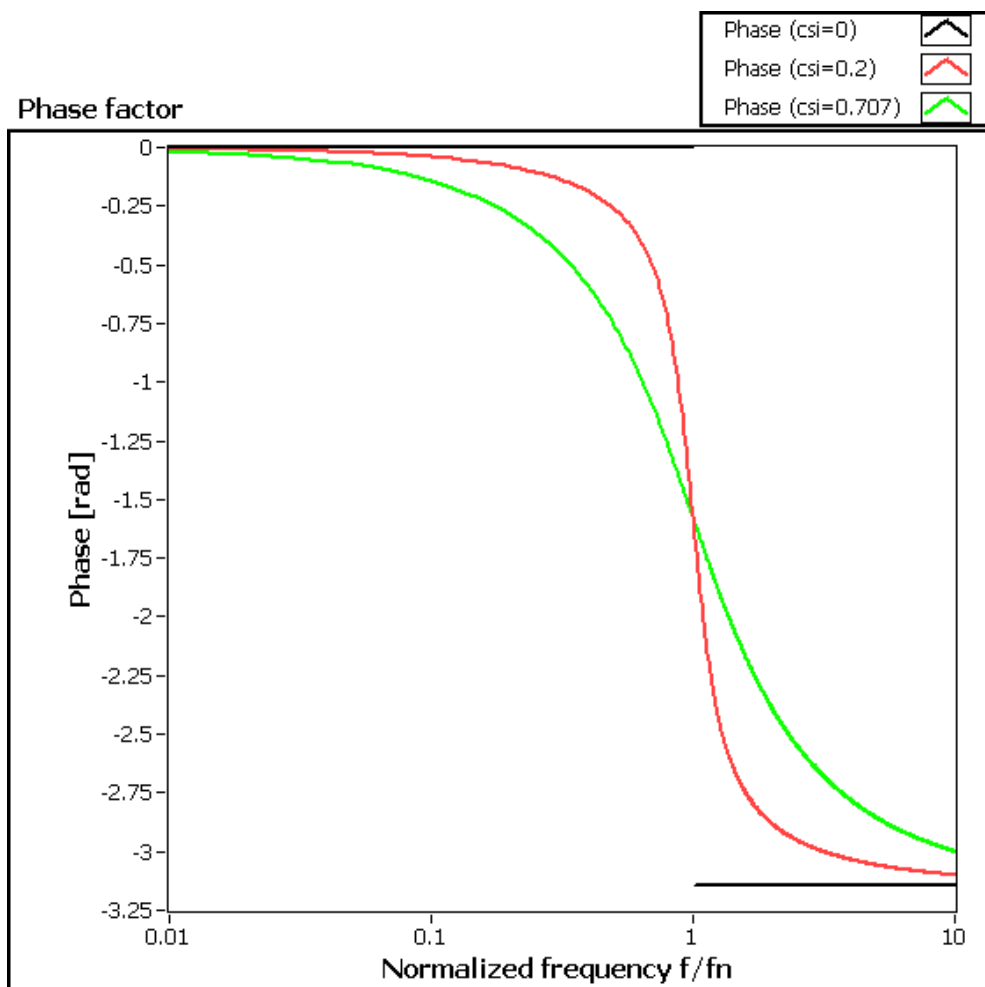


Figura 7 – Funzione di risposta in frequenza di un sensore piezoelettrico in termini di frequenza (a) e fase(b)

Gli accelerometri a bilanciamento di forza si basano su un condensatore ad armature mobili ed un sistema di controllo che crea una forza di richiamo quando avviene un piccolissimo spostamento delle piastre per effetto del movimento della base. A riposo le due piastre del condensatore in movimento

sono simmetriche alla piastra centrale fissa. L'accelerazione provoca il movimento della piastra del sensore capacitivo rispetto alla piastra centrale fissa. Questo spostamento si traduce in un segnale sbilanciato. Il circuito di retroazione compensa questo segnale di errore creando una forza di richiamo magnetico per bilanciare le piastre del condensatore e portandole nella loro posizione di equilibrio originale. La corrente che attraversa la bobina è direttamente proporzionale all'accelerazione applicata [13]. Gli accelerometri force balance sono in grado di misurare anche grandezze statiche, quindi la loro ampiezza di banda parte dalla componente continua. Il limite superiore della banda di frequenza è, invece, limitata a qualche centinaio di Hz.



Figura 8 – Esempio di accelerometro force-balance.

Attualmente gli FBA godono di un vantaggio prestazionale in termini di range dinamico. È oggi comune, infatti, trovare in commercio sensori con un range dinamico di oltre 160 dB su un intervallo di frequenze da 0.1 ad oltre 30 Hz (ossia quelle di interesse ingegneristico). Gli FBA, tuttavia, presentano frequenze di *cut-off* piuttosto basse che inducono rilevanti sfasamenti già a pochi Hz (Figura 9). Qui si rammenta che, come regola generale, sfasamenti consistenti si osservano a partire da circa due decadi al di sotto della frequenza di cut-off. Come esempio della categoria FBA, si rimanda all'illustrazione in Figura 9.

È evidente che è sempre possibile correggere la risposta strumentale ma è un procedimento complesso che richiede comunque un controllo umano e che, in ogni caso, può introdurre delle instabilità numeriche. A sfavore degli FBA gioca inoltre il costo (che anche in grandi quantità supererà sempre abbondantemente il migliaio di euro a terna per la presenza di delicate parti meccaniche), la maggiore probabilità di guasti (sempre per la presenza di parti meccaniche) e consumi abbastanza elevati.

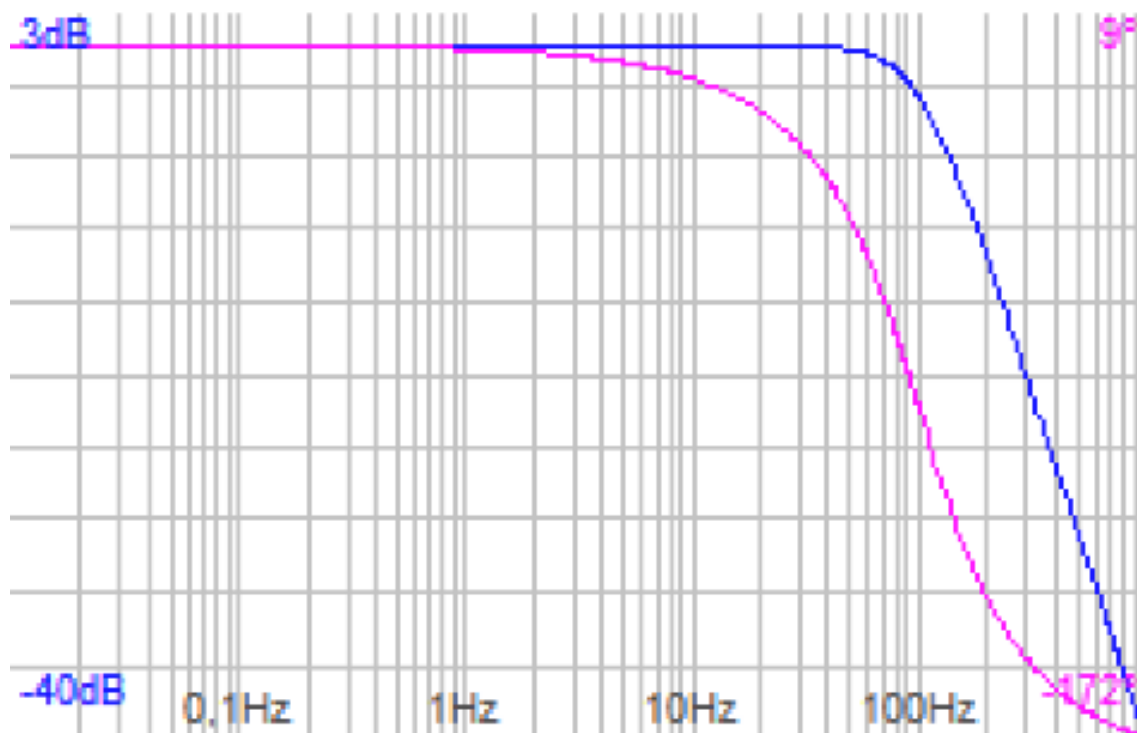


Figura 9 – Risposta in ampiezza e fase di un accelerometro FBA (figura tratta dal catalogo del produttore)

Gli accelerometri MEMS sono caratterizzati da range dinamico modesto, sebbene di difficile valutazione, ma che non supera in media i 70-90 dB. Tuttavia, essi sono nettamente più vantaggiosi

in termini di costi, affidabilità, consumi e, cosa più importante, poiché la frequenza di *cut-off* è mediamente posizionata fra i 400 e i 1000 Hz, richiedono minore o nessuno sforzo nella correzione della risposta strumentale. I parametri dei sistemi basati su MEMS dipendono da vari fattori. Sono infatti circuiti integrati minuscoli, nei quali la risposta alla sollecitazione è pressoché istantanea. Essi, tuttavia, sono alquanto rumorosi ed è necessario che il circuito che li pilota includa almeno un condensatore. È questo che induce degli sfasamenti nel segnale. La necessità di introdurre il condensatore deriva dalla necessità di ridurre il rumore termico, che è un rumore bianco la cui potenza spettrale scala come radice della frequenza massima. Più si riduce la banda passante di frequenza, maggiore sarà il range dinamico.

In Tabella 1 si riportano pregi e difetti dei sensori per le tipologie esistenti rispetto ad alcune caratteristiche essenziali di riferimento dove con xxxxx si intendono prestazioni ottimali, con un numero di x decrescente si intendono prestazioni a loro volta decrescenti e con – si intendono prestazioni insoddisfacenti.

Tabella 1 – Caratteristiche, pregi e difetti delle varie tipologie di sensori disponibili attualmente.

	FBA	Piezoelettrici	MEMS professionali	MEMS commerciali
Economicità	x	xx	xxx	xxxxx
Bassa rumorosità	xxxxx	x	xx	-
Funzionamento a basse frequenze (0.1-1 Hz)	xxxxx	x	xx	xx
Bassa distorsione di fase (< 30 Hz)	x	xxxxx	xxx	xxxx
Robustezza/affidabilità	xxx	xxx	xxx	xxx
IMPIEGHI				
> 0,025 g RMS	xxxxx	xxxxx	xxxxx	xxxxx
> 0,0025 g RMS	xxxxx	xx	xxx	x
> 0,00025 g RMS	xxxx	-	x	-

> 0,000025 g RMS

xxx

-

-

-

Diverse tipologie di sensori, infine, possono essere combinate tra loro mediante installazione sulle cosiddette “stazioni accelerometriche”, al fine di sfruttare al meglio le differenti prestazioni dei vari sensori in funzione del caso applicativo di interesse.

2.3.1.1 Caratterizzazione dei sensori MEMS

Nel presente paragrafo si riportano i risultati ottenuti mediante le attività di caratterizzazione di accelerometri capacitivi MEMS, cioè microsistemi elettromeccanici, di tipo digitale, considerando due diverse modalità: high performance e low-power. L’attività ha previsto anche test anche per valutare la sincronizzazione tra diversi nodi utilizzando un protocollo NTP. È stata, infine, realizzata una scheda prototipo e un software apposito per eseguire la sincronizzazione.

Scheda prototipo RPi4-based

Il nodo sensore sperimentale progettato () per misurazioni inerziali multinodo sincronizzate presenta le seguenti caratteristiche:

- Nodo di calcolo: Raspberry-Pi4
- Accelerometri 2xST ISM330DHCX
- Configurazione accelerometri:
 - MEMS 1 configurato in High-Performance mode @ 833Hz
 - MEMS 2 configurato in Low-Power mode @ 52Hz
- Protocollo di sincronizzazione NTP su rete locale ethernet con 1 nodo eletto come time reference
- È stata progettata una cap per RPi4 per installare i MEMS e resistori di shut per la misurazione dei consumi di corrente in tempo reale.

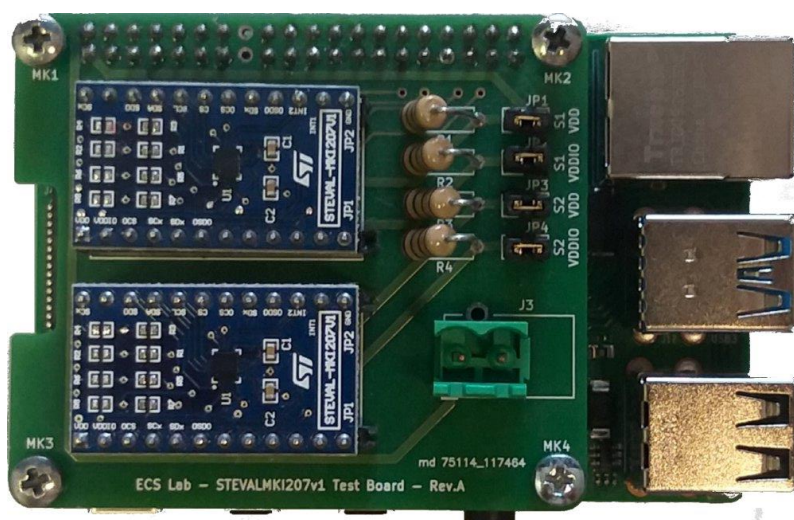


Figura 10 – Scheda prototipo RPi4-based

Valutazione del rumore

Nella tabella sotto 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 quando, a causa di un problema di risonanza 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.

Tabella 2 – Confronto tra diversi accelerometri in termini di rumore.

	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

Valutazione della sincronizzazione

La sincronizzazione è stata ottenuta con NTP su una LAN cablata e misurata in laboratorio, tramite le seguenti operazioni:

- 10 nodi configurati in High-Performance e campionamento a 833Hz collegati a una macchina MTS attraverso una piastra metallica.
- La macchina MTS (Figura 11) applica uno stimolo sinusoidale con una frequenza di 30Hz e un'ampiezza di 0.2g.
- Le tracce misurate vengono raccolte e sovra-campionate con interpolazione lineare a 100kHz.
- Il ritardo di sincronizzazione è stimato attraverso il ritardo del segnale misurato tra i nodi.

Le misurazioni del ritardo mostrano un ritardo di 0 su tracce ri-campionate a 10 kHz, che mostra un errore di sincronizzazione < 10 us. Supponiamo che l'incertezza di sincronizzazione di ~ 10 us sia sufficiente per la stima modale su una struttura del reale.



Figura 11 – Set-up per la valutazione della sincronizzazione

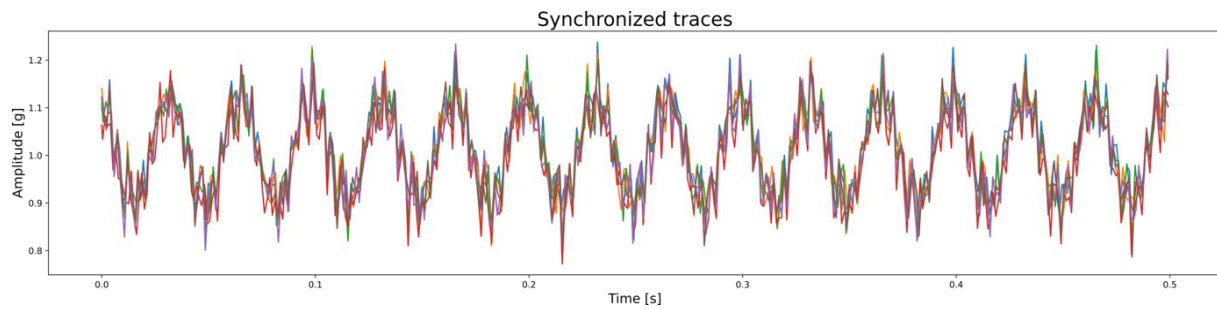


Figura 12 – Misurazioni del ritardo tra le tracce

Misura dell'accuratezza su ponte ferroviario

L'accuratezza delle misurazioni di ST MEMS è stata confrontata con dispositivi piezoelettrici per rilevare le modalità di un ponte ferroviario del mondo reale a Figline Valdarno. Una campata del ponte è strumentata con 6 nodi RPi4-ISM330DHCX, come mostrato nella Figura 13.

Le tracce raccolte sono state sincronizzate, filtrate e segmentate per estrarre i passaggi del treno in 10s. Il confronto è stato eseguito su PSD (Power Spectral Density).

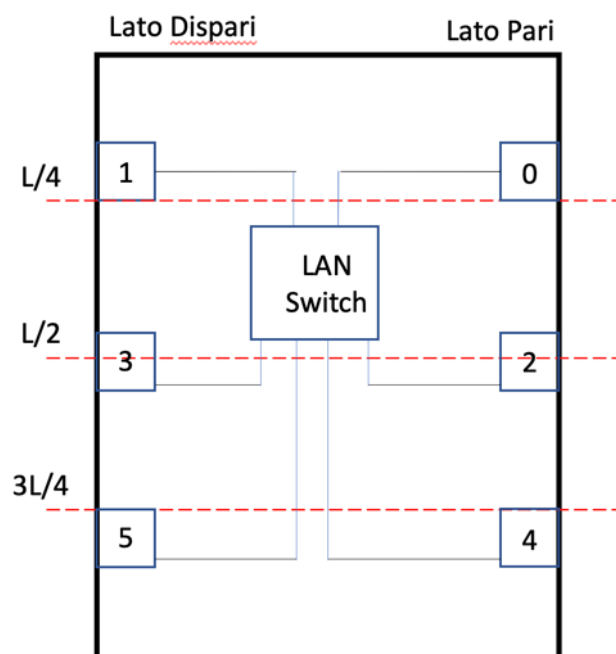


Figura 13 – Disposizione nodi

I grafici PSD (Figura 14) mostrano un'accuratezza ad alta frequenza delle misurazioni effettuate dai MEMS configurati in modalità ad alte prestazioni, rispetto a un accelerometro piezoelettrico tradizionale. Tutti i picchi sono riconosciuti; tuttavia, si notano alcune discrepanze nell'altezza dei picchi.

L'identificazione modale con MEMS configurati in modalità Low-Power (Figura 15) è più difficile a causa dell'elevato livello di rumore nelle tracce misurate.

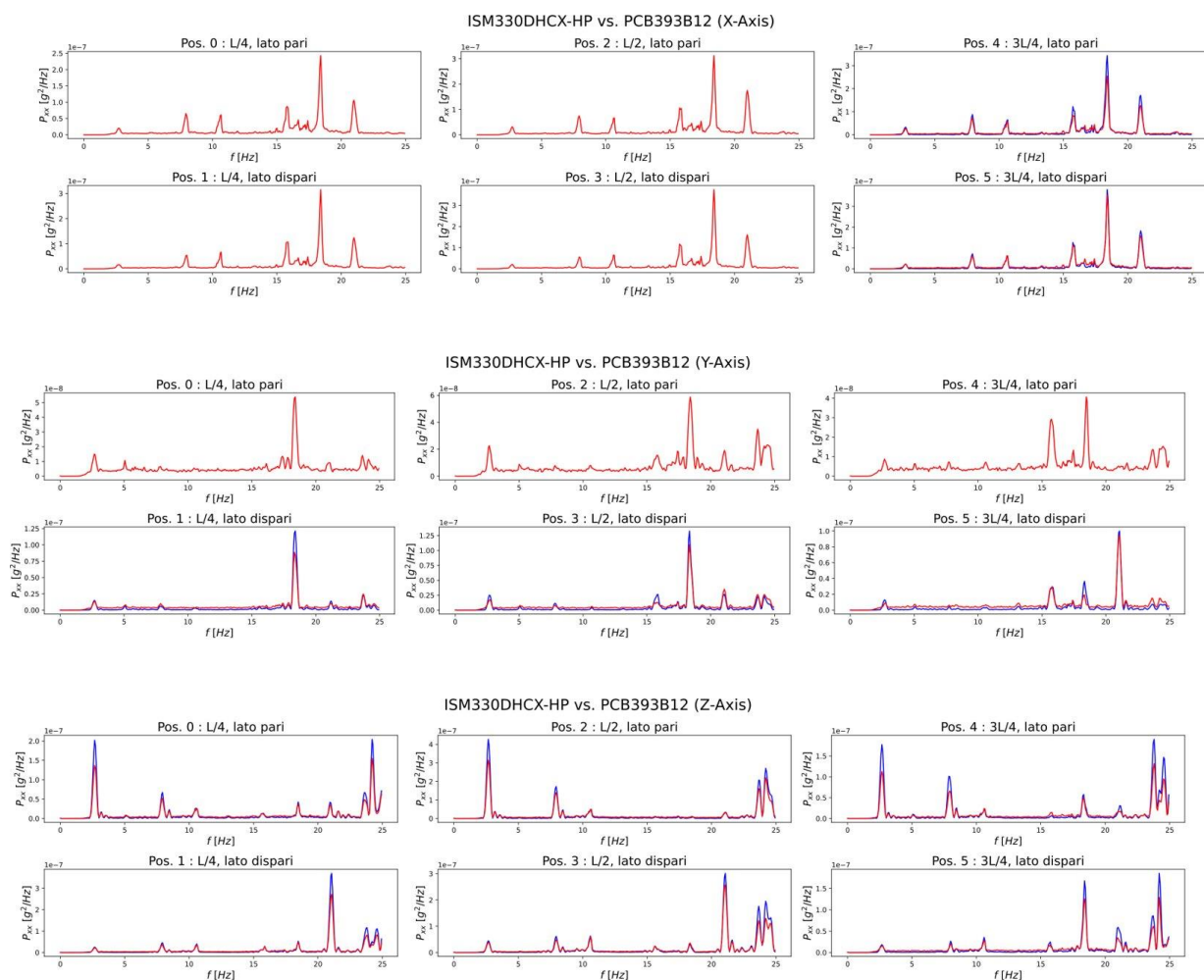


Figura 14 – Disposizione nodi

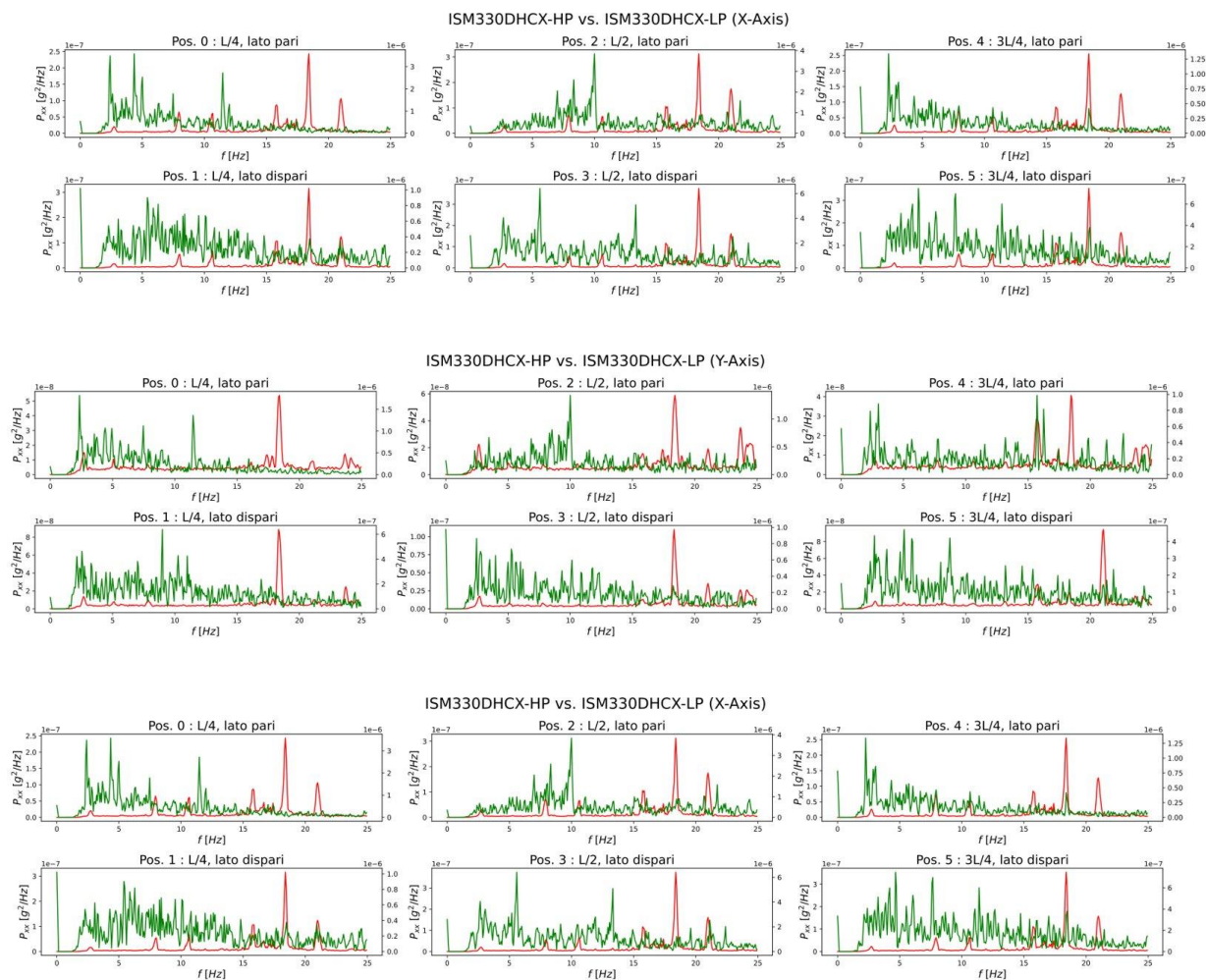


Figura 15 – Disposizione nodi

2.3.2 Sensori di deformazione

I sensori di deformazione sono trasduttori capaci di rilevare una variazione di dimensione (deformazione) in risposta a qualche eccitazione. Esistono numerose tipologie di sensori di deformazione, da quelle più tradizionali (estensimetri, trasduttori induttivi, etc.) a quelle più moderne ed innovative (fibre ottiche, capacitivi, etc.).

2.3.2.1 Estensimetri

L'estensimetro (in inglese, *strain gauge*) è il più diffuso strumento utilizzato per misurare la deformazione, intesa come la variazione di lunghezza nell'intorno di un punto, di un elemento tridimensionale. Le principali tipologie di estensimetri sono le seguenti:

- estensimetri elettrici a resistenza (estensimetri a filo metallico);
- estensimetri a semiconduttore;
- estensimetri capacitivi.

Un estensimetro elettrico a resistenza (ER) è costituito da una griglia di metallo conduttore (nichel, manganina, platino) incollata su un supporto di materiale polimerico (vedi Figura 16). Esiste una gamma di configurazioni molto vasta in funzione dello scopo dell'applicazione ma generalmente le dimensioni sono molto contenute (circa 1 cm²) e in genere il sensore viene incollato alla superficie di una struttura da monitorare. Gli ER si fondano sul principio che un conduttore sottoposto a deformazione è soggetto ad una variazione di resistenza elettrica. Noto il fattore di taratura (*gauge factor*), cioè il rapporto tra la variazione di resistenza relativa e la deformazione longitudinale, che è funzione delle caratteristiche tecnologiche e dimensionali del sensore, è possibile determinare il livello di deformazione a partire dalla variazione di resistenza misurata. I sensori ER sono fortemente influenzati dalla temperatura di esercizio che può avere un'influenza significativa sul fattore di taratura e sulla resistività della griglia, oltre che determinare un ulteriore fonte di deformabilità. Per risolvere tale problematica, si ricorre in genere a tecniche di compensazione della temperatura quali l'adozione di estensimetri autocompensati (con valori di *gauge factor* tali da compensare gli effetti della dilatazione termica del corpo a cui essi sono applicati) oppure l'utilizzo di architetture quali il ponte di Wheatstone.

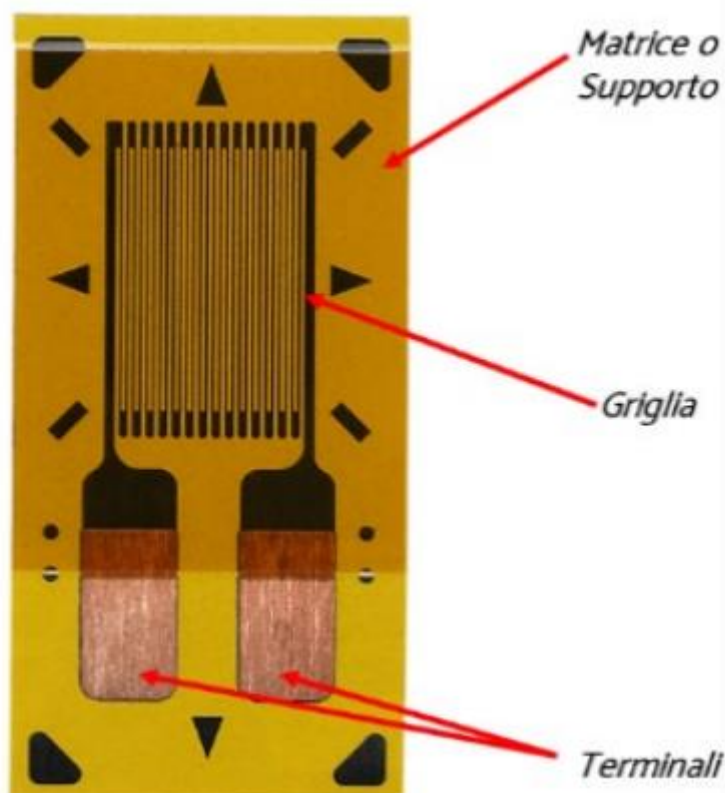


Figura 16 – Tipico schema di estensimetro elettrico a resistenza unidirezionale [14].

Gli estensimetri a semiconduttore sono simili ai precedenti ma sono costituiti tipicamente di silicio, che li rende molto più sensibili rispetto a quelli metallici. Tuttavia, essi risultano particolarmente influenzati dalle variazioni di temperatura ambientale. Infine, l'estensimetro capacitivo basa la rilevazione di deformazioni sulla variazione della distanza o della superficie attiva delle armature di un condensatore che costituisce l'elemento sensore. Negli ultimi anni tale tipologia di estensimetro è stata sempre più rimpiazzata dagli estensimetri a semiconduttore, che garantiscono una sensibilità molto più elevata.

Generalmente, gli estensimetri riescono a misurare deformazioni molto ridotte, fino a $0.025 \mu\epsilon$. La risoluzione tipica è di $1 \mu\text{m/m}$ mentre il campo di misura, cioè l'insieme dei valori di una grandezza fisica – in questo caso la deformazione – misurabili dallo strumento, è compreso tra 5000 e $50000 \mu\text{m/m}$. I valori di sensibilità espressi mediante il gauge factor sono superiori a 100 per i semiconduttori mentre per i sensori ER sono compresi tra 0.5 e 2 . Infine, gli estensimetri possono essere applicati, seguendo opportune procedure, a qualsiasi tipologia di superficie. Tuttavia, essi sono

estremamente vulnerabili alle condizioni ambientali (variazioni di temperatura) e garantiscono una scarsa durabilità se non protetti adeguatamente.

2.3.2.2 Trasduttori per emissione acustica

L'emissione acustica (Acoustic Emission, AE) può essere definita come il suono emesso in modalità di onda elastica da un solido quando sottoposto ad azioni che generano in esso deformazioni. Più in generale, la locuzione emissione acustica è usata per indicare una classe di fenomeni in cui determinate sorgenti localizzate, a causa di un rapido rilascio di energia, generano delle onde elastiche transitorie, tipicamente sviluppando fessure, all'interno di un materiale [19]. La normativa ISO 22096 [20] fornisce la seguente definizione: "The term acoustic emission is used to describe the spontaneous elastic energy released by a process in the form of transient elastic waves". Dal punto di vista teorico, l'AE è correlata al concetto di frattura, cioè quel fenomeno che può verificarsi improvvisamente senza precursori apprezzabili (comportamento perfettamente fragile), oppure al culmine di un danneggiamento progressivo, caratterizzato da un rilascio spontaneo di energia elastica durante la fessurazione del materiale (comportamento quasi - fragile). Infatti, l'evoluzione delle microfratture in un materiale sottoposto a sforzo o deformazione causa una redistribuzione delle tensioni interne, sotto forma di onde elastiche transitorie, chiamate emissioni acustiche

I primi esempi di AE si riferiscono al legno, e sono datati negli anni Trenta del secolo scorso. In particolare, nel 1934 in [21] si descrive un metodo sperimentale per individuare gli urti elastici durante la piegatura delle tavole di cedro, pini e cipressi giapponesi. Verso la metà del secolo scorso, invece, si iniziò a studiare la generazione AE in roccia [22], in relazione ai terremoti, e nei metalli per carichi ciclici crescenti [23]. Più recentemente, invece, tale metodologia di monitoraggio ha iniziato ad essere applicata anche a strutture in calcestruzzo armato [24]. Una tecnica di monitoraggio dell'emissione acustica si basa sull'acquisizione di segnali ultrasonori, di solito di frequenza tra alcune decine di kHz e qualche unità di MHz, emessi spontaneamente da un materiale sotto sforzo per effetto di fenomeni irreversibili quali danneggiamento, microfessurazione, degradazione, corrosione. A differenza però della tecnica ultrasonora classica, che misura la risposta ad un'eccitazione acustica artificiale e ripetibile, con la AE vengono valutati i segnali sonori prodotti dai difetti: ogni crescita di un difetto è un evento unico e non può essere riprodotto. Questa tecnica può consentire una diagnosi precoce di un danno strutturale incipiente mediante captazione di segnali precursori della frattura.

2.3.2.3 Sensore a fibra ottica

Generalmente un sensore a fibra ottica (*Fiber Optic Sensor*, in seguito *FOS*) è costituito da un trasmettitore di luce, un ricevitore, un sistema di fibre ottiche, un modulatore e un'unità di elaborazione del segnale. Il cuore del sistema è la fibra ottica che può essere realizzata in vetro silicio

o materiale polimerico, in grado di assolvere sia al compito di sensore che di trasportatore del segnale luminoso dalla sorgente al ricevitore. Le fibre presentano una parte interna detto core ad una esterna detta cladding (con indici di rifrazione diversi) e sono racchiuse in una guaina protettiva (coating). Quando nella struttura si registra una deformazione, le fibre ottiche installate sulla superficie o annegate all'interno della struttura stessa si espandono o contraggono. La variazione di lunghezza della fibra ottica comporta una rimodulazione del segnale luminoso che si propaga in essa (in termini di intensità, fase, polarizzazione, lunghezza d'onda o frequenza) che viene riflesso al sistema di acquisizione che lo processa. A seconda del principio di misurazione che sfruttano, i FOS possono essere suddivisi in diverse categorie, tra cui le più diffuse sono le seguenti:

- Fibra a griglia di Bragg (FBG)
- Riflettometro ottico nel dominio del tempo (OTDR)
- Sensore interferometrico Fabry–Perot in fibra ottica (FPFOS)

I sensori FBG sono del tipo discontinuo, si realizzano cioè solo in alcuni punti della fibra ottica, dove, mediante tecnica di fotoincisione, si iscrive un reticolo (lungo alcuni millimetri) in cui si alternano indici di rifrazione diversi. La fibra a griglia di Bragg si configura come una struttura risonante, cioè agisce come uno specchio selettivo delle lunghezze d'onda ed è perciò un filtro a banda stretta. Ciò significa che quando una luce proveniente da una sorgente a banda larga viene introdotta nella fibra ottica, solo quella con una larghezza spettrale molto stretta, centrata sulla lunghezza d'onda di Bragg, verrà riflessa indietro dalla griglia. La luce restante continuerà il suo percorso nella fibra ottica fino alla successiva griglia di Bragg senza subire alcuna perdita. Quando il passo del reticolo si modifica a seguito di una deformazione, o per effetto della variazione di temperatura gli indici di rifrazione cambiano e la lunghezza d'onda riflessa risulta modificata. I sensori FBG sono i più utilizzati tra i FOS per le applicazioni di SHM di opere civili perché presentano una serie di vantaggi, tra cui ridotti costi di produzione, elevata qualità del sistema di demodulazione e praticità del pacchetto tecnologico. Tali sensori possono essere incollati alla superficie di una struttura o installati internamente ad essa per ottenere un monitoraggio real-time della sua deformazione. Rispetto agli estensimetri tradizionali, i sensori FBG sono immuni da interferenze elettromagnetiche. Inoltre, è possibile connettere in serie un elevato numero di sensori per formare un sistema diffuso di monitoraggio e i vari segnali possono essere analizzati e processati separatamente. In questo caso si parla di sensori FBG quasi-distribuiti, ideali per il controllo di strutture di notevoli dimensioni come i ponti. Le letture dei sensori FBG, tuttavia, sono affette sia dalla temperatura che dalla deformazione e la separazione tra le due fonti è chiaramente cruciale. Per superare tale limite esistono diverse soluzioni ma, generalmente, si installa un sensore di temperatura vicino al sensore FBG. I sensori FBG presentano generalmente un campo di misura esteso, che può andare da 5000 $\mu\epsilon$ (0.50 %) in

accorciamento a 7500 $\mu\epsilon$ (0.75 %) in allungamento. La precisione assoluta è dell'ordine di 0.1-0.3% del fondo scala con una risoluzione pari a 0.2 $\mu\epsilon$. Il range termico di funzionamento è compreso tra -40°C +80°C.

Il riflettometro ottico nel dominio del tempo (OTDR) è un sensore di tipo continuo lungo la fibra ottica e si basa sulla retro-diffusione lineare. Mediante una tecnica ottica detta “pulse-echo”, cioè una tecnica in cui degli impulsi vengono trasmessi e ricevuti dallo stesso lato della fibra dopo essere stati riflessi dalla parte opposta, si lancia un impulso ottico all'interno della fibra per poi misurarne l'intensità riflessa in funzione del tempo. Un sensore OTDR misura variazioni di intensità (attenuazioni) su distanze nell'ordine delle decine di chilometri, con una risoluzione spaziale nell'ordine del metro. Con tale sensore si può verificare la continuità del segnale luminoso, la presenza di eventuali difetti o rotture, e si può misurare la lunghezza della fibra. Una delle più diffuse tipologie di sensore OTDR in ambito SHM è quello basato sullo scattering di Brillouin (BOTDR). Lo scattering di Brillouin è affetto da temperatura e deformazione della fibra in termini di spettro di frequenze. Pertanto, a partire dallo shift di frequenza della luce retro-diffusa di Brillouin è possibile risalire alla deformazione della fibra, quindi della struttura a cui quest'ultima è vincolata.

Un sensore interferometrico Fabry–Perot in fibra ottica (FPFOS) è tipicamente costituito da fibre di input/output rivestite e da fibre di riflessione (senza rivestimento), tenute insieme tra loro mediante un apposito adesivo. Tra le due fibre si realizza un tubo cavo, cioè una cavità di aria (detta cavità di Fabry-Perot), come illustrato in Figura 17. Con riferimento alla Figura 17, il segnale riflesso R_1 è legato ad eventuali perturbazioni quali deformazioni o variazioni di temperature, mentre il segnale riflesso R_2 dipende dalla lunghezza del cavo. Essendo nota la lunghezza del cavo iniziale, elaborando l'interferenza tra R_1 e R_2 , è possibile ricavare la variazione di lunghezza della cavità, e quindi la deformazione del cavo e della struttura a cui esso è collegato.

Come detto, sensori FOS sono ampiamente adoperati in diversi campi del SHM quando si ha l'obiettivo di monitorare numerosi punti di strutture di elevate dimensioni per ricostruire dei profili quasi continui di misurazioni. Classici esempi di applicazioni di FOS sono:

- la misura del livello di deformazioni di grandi strutture come ponti, dighe, edifici, gallerie;
- l'individuazione e il controllo di fessurazioni;
- la rilevazione di profili di temperatura.

.

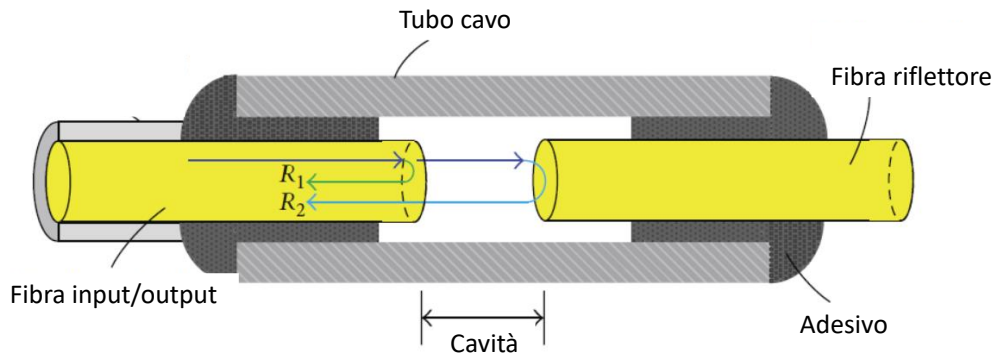


Figura 17 – Schema di funzionamento di un FPFOS [25].

Le caratteristiche essenziali più rilevanti per un sistema basato sui FOS sono specificate nel seguito:

- *risoluzione spaziale (d)* è il più piccolo tratto di fibra nel quale un sensibile cambiamento della grandezza misurata può essere rilevato. Ciascun valore è corrispondente ad una media su un tratto di fibra di lunghezza d . In un certo senso, dunque, il sistema rappresenta il multiplexing di L/d sensori in un array lineare, dove L è la lunghezza totale della fibra sotto esame (in metri);
- *sensibilità* è definita come la variazione di potenza ottica, al ricevitore, prodotta da una variazione unitaria della grandezza misurata per unità di lunghezza della fibra (in $W \text{ field}^{-1} \text{ m}^{-1}$);
- *larghezza di banda della misura (B)* è la larghezza di banda per la quale le variazioni della grandezza in esame si possono misurare lungo tutta la lunghezza della fibra L (Hz);
- *larghezza di banda del sistema (W)* è la larghezza di banda che il ricevitore deve avere per analizzare il sistema. Ovviamente, dev'essere tale da permettergli di rispondere al passaggio dell'impulso ottico su un tratto di fibra di lunghezza pari alla risoluzione spaziale d (Hz);
- *range dinamico (DR)* è il rapporto tra il valore massimo e quello minimo della grandezza che permette di essere misurato con l'accuratezza richiesta (dB).
- *accuratezza della misura* è l'accuratezza con cui la potenza in uscita al ricevitore può essere misurata a dispetto dei livelli di rumore del sistema (%).
- *proprietà della fibra*: le specifiche del sistema devono includere una dichiarazione della fibra in utilizzo, in modo tale da permettere modifiche, se necessario, e facilitare la comprensione delle indicazioni di anomalie e guasti. Tali proprietà includono:

- lo *spettro dell'attenuazione* (l'attenuazione in funzione della lunghezza d'onda nel punto di lavoro);
- lo *spettro della dispersione* (l'indice di rifrazione in funzione della lunghezza d'onda nel punto di lavoro);
- il *tipo di propagazione modale*, mono-modale o multi-modale (in questo caso, il numero di modi);
- le *proprietà geometriche* (il diametro del nucleo, il diametro del mantello, il profilo dell'indice di rifrazione, la lunghezza d'onda di taglio per essere in regime mono-modale e se si tratta di una fibra normale o 'hi-bi');
- le *proprietà del mantello* (tipo di mantello primario, tipo di mantello secondario, resistenza alla rottura, massima temperatura d'esercizio, etc).

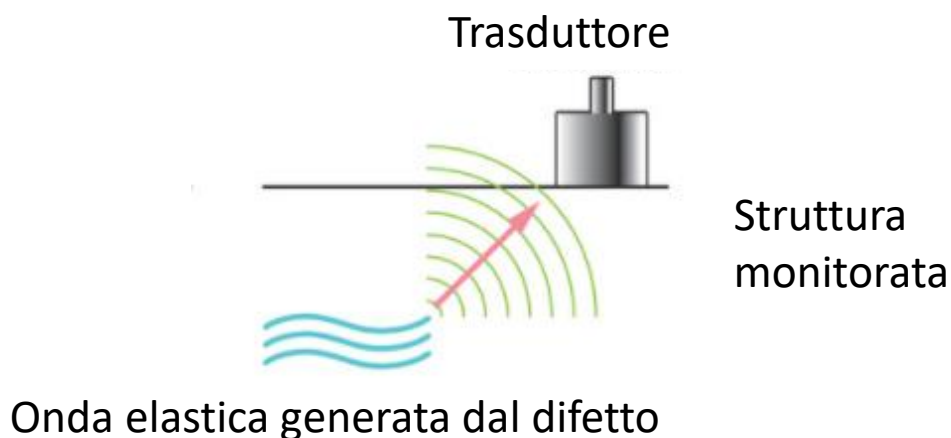


Figura 18 – Schema di funzionamento del metodo di monitoraggio AE.

I sensori adoperati per la lettura del segnale sono dei trasduttori per segnali ad ultrasuoni. I sensori più utilizzati sono quelli piezoelettrici (PZT, piombo-zirconato di titanio): essi sono robusti e più sensibili rispetto ad altri tipi di sensori. La sensibilità di un sensore piezoelettrico può raggiungere valori al di sopra dei 1000 V/ μm . I sensori comunemente utilizzati possono essere suddivisi in due categorie:

- a banda larga;
- risonanti.

I trasduttori a banda larga presentano una risposta in frequenza piatta, sono sensibili allo stesso modo a tutte le frequenze per cui trattano tutti i segnali in maniera uguale. Ciò determina una gamma di frequenze più ampia ma una sensibilità inferiore. Da queste considerazioni ne consegue che se il segnale è “piccolo” non viene percepito. I sensori risonanti, invece, sono più sensibili a determinate frequenze, che dipendono dalla frequenza di risonanza dei cristalli presenti all’interno. Un tipico sensore AE trasforma vibrazioni elastiche, vale a dire onde di stress, di ampiezza da 9 a 10 mm in segnali elettrici di ampiezza da 6 a 10 V.

Il range di frequenza in cui operano i trasduttori per AE è 10 Hz – 500 Hz, mentre la corretta operatività è garantita all’interno di intervalli di temperatura tra 0°C e 60°C. I sensori AE, inoltre, sono generalmente caratterizzati da una buona durabilità potendo contare sul rivestimento esterno molto resistente agli agenti esterni.

2.3.2.4 Sensori di pressione capacitivi

Un sensore di pressione è costituito da un elemento di rilevazione della pressione (membrana) che determina la pressione reale applicata al sensore (utilizzando principi di funzionamento diversi) e da alcuni componenti che convertono tali informazioni in un segnale in uscita. Esistono diversi tipi di sensori di pressione in funzione del principio di funzionamento alla base [26] che possono essere distinti in:

- *sensore di pressione assoluta*, che misura la differenza tra la pressione applicata alla membrana e la pressione del vuoto assoluto;
- *sensore di pressione differenziale*, che misura la differenza tra due pressioni, una applicata e l’altra variabile in funzione dell’ambiente di misura;
- *sensore di pressione relativo*, che misura la differenza tra la pressione applicata e quella atmosferica;
- *sensore di pressione chiuso*, che misura la differenza tra la pressione applicata e un altro valore di riferimento della pressione che si determina all’interno di una camera chiusa dalla membrana.

Tipicamente i sensori adoperati in ambito strutturale sono del tipo chiuso. Rispetto alla tecnologia sfruttata nella misurazione è possibile distinguere tre categorie di sensori di pressione:

- *sensore piezoelettrico*;
- *sensore piezoresistivo*;
- *sensore capacitivo*.

Un sensore di pressione piezoelettrico è caratterizzato dalla presenza di un cristallo piezoelettrico che si carica quando soggetto ad una variazione di pressione, producendo una tensione ai terminali. Il legame tra pressione applicata e variazione del potenziale elettrico è lineare nel campo di misura del sensore. I campi di misura garantiti dai sensori piezoelettrici sono generalmente molto elevati (da pochi N a centinaia di kN), tuttavia essi sono affetti dal problema della deviazione della lettura quando sottoposti a valori di pressione su lunghi periodi.

I sensori di pressione piezoresistivi sono costituiti da un diaframma (ceramico) con estensimetri integrati per rilevare le deformazioni risultanti dalla pressione applicata: la pressione applicata genera una deformazione nella membrana che viene tradotta dagli estensimetri in variazione di resistenza. Dato che il materiale ceramico è perfettamente elastico, è possibile ricavare la tensione a partire dalla deformazione in maniera diretta. La configurazione tipica di questi estensimetri è un circuito a ponte di Wheatstone che consente una buona amplificazione del segnale e una ripetibilità superiore. I sensori di pressione piezoresistivi sono in genere caratterizzati da un campo di misura limitato, in quanto non possono superare determinati limiti di pressione, ma garantiscono in genere sufficiente sensibilità.

I sensori di pressione capacitivi funzionano secondo il principio di un condensatore a piastre parallele ideale. Una piastra è il sensore stesso mentre l'altra è l'oggetto di misurazione contrapposto (target). Quando l'elemento target subisce delle sollecitazioni (pressioni) e quindi delle deformazioni, la capacità elettrica del condensatore varia e tale variazione viene letta dal sensore. Come noto, l'equazione che governa il problema è la seguente:

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

in cui ε è la permittività, A è l'area della piastra, d è la distanza tra le due piastre del condensatore. Questi sensori sono caratterizzati da elevata sensibilità e precisione, tuttavia essi risultano molto sensibili alle vibrazioni che generano rumore nelle misurazioni. I sensori capacitivi sono ampiamente adoperati in ambito industriale per diversi scopi, mentre trovano scarso impiego nel settore del monitoraggio strutturale, dove si è in una fase piuttosto prototipale. Tuttavia, molto recentemente, sono stati sviluppati alcuni studi focalizzati allo sviluppo di soluzioni di misura basate sull'utilizzo di sensori di pressione capacitivi i cui risultati però hanno dimostrato la necessità di ulteriori approfondimenti [27].

2.3.3 Sensori di temperatura

I sensori di temperatura sono generalmente adoperati nell'ambito dell'ingegneria civile all'interno di sistemi di monitoraggio al fine di rispondere all'esigenza di monitorare le condizioni ambientali relative in particolare alle variazioni di temperatura durante il periodo di studio.

In commercio esistono diverse tipologie di sensori di temperatura in base al principio di funzionamento. Tra quelli maggiormente adoperati per il monitoraggio strutturale troviamo i termistori, le termocoppie e i dispositivi di temperatura resistivi. Nel termistore, la variazione di temperatura modifica la resistenza del loro materiale, mentre nelle termocoppie il cambiamento di temperatura induce la tensione tra i fili di metalli diversi. I dispositivi di temperatura resistivi o RTD (Resistance Temperature Detector) sfruttano la variazione della resistività di alcuni materiali al variare della temperatura.

Termocoppie e RTD hanno sostanzialmente sostituito i termistori in quanto più prestanti in termini di risoluzione e range di misura. Una tipologia che si sta diffondendo particolarmente negli ultimi anni in ambito SHM è costituita dai termometri a resistenza di platino (PT). Le termo-resistenze PT100 (comunemente chiamate “sonde PT100”) sono caratterizzate da elevate sensibilità, precisione e affidabilità e possono essere applicate in tutti quei campi applicativi nei quali la temperatura massima di lavoro sia $\leq 650^{\circ}\text{C}$ (1200°F). Tra le caratteristiche specifiche più rilevanti rispetto a cui valutare le prestazioni di tali strumenti, è bene considerare, tra gli altri: range di misura, risoluzione, grado di protezione (IP).

2.4 Sistemi di acquisizione dati

I sistemi di acquisizione dati eseguono la conversione dei segnali analogici, provenienti dai sensori, in segnali digitali, che possono essere memorizzati in un supporto digitale e analizzati dal software. Il sistema di acquisizione deve, in generale, essere in grado di interfacciarsi con diversi tipi di sensori. Sebbene i sensori non siano, in linea di principio, in grado di misurare il danno, la cui identificazione richiede generalmente un certo grado di elaborazione dei dati acquisiti, l'integrazione di differenti tipologie di sensori su una stessa struttura consente l'individuazione di diversi tipi di danni. Analogamente a quanto accade per altri sistemi, quali aeroplani, automobili o apparecchiature meccaniche, il danno può manifestarsi in differenti punti della struttura e secondo differenti modalità quali, ad esempio, cambiamenti nella struttura locale del materiale, o nelle connessioni tra gli elementi strutturali, oppure ancora all'interfaccia tra differenti materiali e/o componenti strutturali. Nel caso delle infrastrutture civili un'ulteriore complicazione è rappresentata dall'elevata incertezza che caratterizza le proprietà meccaniche e il comportamento dei materiali in opera. Anche quando le

strutture sono realizzate con materiali caratterizzati da moderate incertezze in campo elastico lineare, come nel caso delle strutture in acciaio, i carichi associati ad eventi estremi possono portare i materiali in campo non lineare con conseguenti maggiori incertezze nella caratterizzazione del loro comportamento. Qualunque sia la struttura monitorata, in generale occorre impiegare diversi tipi di sensori al fine di implementare una strategia di identificazione del danno completa.

La progettazione di un sistema di acquisizione è sviluppata sulla base di diversi parametri quali:

- il numero e la posizione dei punti di misura;
- le dimensioni dell'opera da monitorare;
- costi di installazione e gestione.

Una grande varietà di sistemi di acquisizione dati è disponibile sul mercato. Essi risultano piuttosto variegati dal punto di vista delle caratteristiche, configurazioni e prezzi. La scelta è resa ancora più difficile quando il budget a disposizione non è l'unico vincolo. Altri fattori che influenzano la scelta sono la portabilità, l'esperienza dell'analista e il grado di compatibilità con hardware e software. Una distinzione di massima può essere fatta tra soluzioni dedicate offerte da fornitori specializzati e soluzioni personalizzabili basate su hardware programmabile. La prima classe di apparecchiature è generalmente caratterizzata da una curva di apprendimento ripida; conoscenze di base sull'acquisizione ed elaborazione del segnale e un tempo ragionevolmente limitato per prendere confidenza con il sistema sono sufficienti per effettuare le prime misure. Tuttavia, questi sistemi sono accompagnati da software proprietario per la configurazione ed il controllo del processo di misurazione e tipicamente soffrono di limitata versatilità. D'altra parte, le soluzioni basate su hardware programmabile richiedono più tempo, maggiore conoscenza teorica e maggiori sforzi da parte dell'utente prima di poter iniziare le misure. Infatti, l'utente ha il compito di selezionare i componenti hardware appropriati e di sviluppare il software di acquisizione dati. I principali vantaggi di queste soluzioni sono il prezzo inferiore e la maggiore versatilità. In entrambi i casi, l'analisi delle principali caratteristiche dei convertitori analogico-digitale (ADC) è utile al fine di selezionare correttamente, tra diverse soluzioni, il sistema che meglio si adatta alle esigenze dell'utente.

Indipendentemente dalla tipologia prescelta e dalla sua relativa complessità, è possibile affermare che un ADC è un dispositivo che converte il segnale continuo proveniente dai sensori in una sequenza di numeri digitali, che rappresentano l'ampiezza del segnale stesso, pronta per essere trasmessa attraverso i collegamenti cablati o wireless (sistema di trasmissione). La conversione si basa sulla discretizzazione del tempo (campionamento) e dall'ampiezza del segnale (quantizzazione). La quantizzazione introduce necessariamente una piccola quantità di errore, dato che l'ampiezza continua del segnale è approssimata da un numero finito di valori discreti. Tuttavia, l'errore di quantizzazione

è generalmente trascurabile rispetto, ad esempio, al rumore di misura. Esso può diventare significativo solo in caso di scarsa risoluzione.

Il sistema di acquisizione è, insieme a quello dei sensori, la componente più rilevante del sistema SHM in quanto la qualità delle successive elaborazioni e quindi delle varie analisi dipendono direttamente dalla qualità dei dati raccolti. In linea generale, i sistemi di acquisizione sono costituiti da tre componenti primarie, organizzate differentemente in funzione della tipologia considerata:

- 1) hardware di acquisizione dei dati, che generalmente consiste di una serie di componenti elettroniche che raccolgono, condizionano, convertono e trasmettono i segnali provenienti dai sensori ad un computer come dati digitali. Nella maggior parte dei casi, questi componenti includono:
 - a. Condizionatore del segnale
 - b. Convertitore analogico-digitale (ADC)
 - c. Circuito di controllo
 - d. Memoria
 - e. Interfaccia di comunicazione
 - f. Alimentazione
- 2) periferiche di acquisizione dati, che includono cavi, blocchi terminali, connettori, e tutto ciò che consente di connettere fisicamente i sensori all'hardware di acquisizione e di proteggere le componenti hardware dall'esposizione;
- 3) software di acquisizione dei dati, generalmente di tipo driven oppure applicazione.

Per quanto riguarda le modalità di acquisizione, è possibile generalmente distinguere tra tre soluzioni: acquisizione continua, acquisizione programmata e acquisizione “event-based” (o triggered). Nel primo caso, il sistema di acquisizione dati acquisisce i segnali dei sensori in maniera continua per un certo periodo di tempo predefinito. Nel secondo caso, i segnali vengono raccolti e registrati a intervalli di tempo regolari (ad esempio, il segnale derivante da un sensore di temperatura può essere registrato su base oraria ogni giorno). Infine, l'acquisizione event-based prevede che i segnali provenienti dai sensori siano registrati solo durante il verificarsi di un certo evento di interesse predefinito dall'utilizzatore del sistema. Tale evento può essere definito sia in maniera deterministica che probabilistica e tipici casi possono essere, ad esempio, il passaggio di un certo mezzo con peso superiore ad un certo valore sulla travata di un ponte, un terremoto, etc. Chiaramente, tale distinzione netta spesso non è presente nei casi reali di SHM dove sovente si ritrovano soluzioni ibride.

Come per i sensori, anche per i sistemi di acquisizione è possibile, a prescindere dalla tipologia di strumento, definire una serie di caratteristiche essenziali che influenzano essenzialmente le performance del sistema di SHM, come di seguito riportate.

- *Risoluzione* di un ADC: può essere definita come la più piccola variazione del segnale che può essere rilevata. Quest'ultima è correlata ad una variazione del Least Significant Bit (LSB). Il numero di bit di un ADC è talvolta indicato anche come risoluzione.
- *Livello di rumore*: è correlato al numero di bit occupati dal rumore quando l'ingresso è zero. Solo gli ultimi due bit in genere sono danneggiati dal rumore con digitalizzatori di buona qualità a 24-bit.
- *Range dinamico*: è definito come il rapporto tra il più grande e il più piccolo valore che un ADC può acquisire senza una significativa distorsione. Di solito è espresso in dB. Tenendo conto che i bit più bassi contengono spesso solo rumore, il range dinamico viene anche definito come il rapporto tra la più grande tensione di ingresso e il livello di rumore del digitalizzatore. Tale numero può essere dipendente dalla frequenza di campionamento. Gli acquisitori di buona qualità attualmente hanno un range dinamico superiore a 100 dB.
- *Frequenza di campionamento*: indica il numero di campioni acquisiti in un secondo. La frequenza massima di campionamento dell'ADC definisce la massima frequenza che può essere osservata.
- *Precisione assoluta*: è una misura di tutte le fonti di errore. Essa è definita come la differenza tra la tensione di ingresso e la tensione che rappresenta l'uscita. Idealmente, questo errore dovrebbe essere $\pm \text{LSB} / 2$ (Least Significant Bit). Si noti che si parla solo dell'errore di quantizzazione, cioè l'errore dovuto esclusivamente ai passaggi di digitalizzazione.
- *Tempo di conversione*, cioè il tempo minimo richiesto per una conversione completa, è definito solo per convertitori basati su un'architettura *sample-and-hold* (S&H) che mantiene il valore analogico costante per il tempo necessario al convertitore o ad altri circuiti successivi per compiere delle operazioni sul segnale. Tuttavia, l'architettura *sigma-delta* è attualmente preferita per ADC a 24-bit per via delle superiori prestazioni. Senza descrivere in dettaglio i convertitori sigma-delta, vale la pena notare che le loro elevate prestazioni sono sostanzialmente legate ad un campionamento del segnale di ingresso ad una frequenza molto superiore rispetto alla frequenza di campionamento desiderata. I campioni passano poi attraverso un filtro che espande i dati a 24 bit, rimuove

le componenti del segnale a frequenze superiori a quella di Nyquist associata alla frequenza di campionamento desiderata, e ricampiona digitalmente i dati.

- *Offset*: rappresenta il livello DC dell'uscita quando l'ingresso è zero. L'offset è sempre presente, a causa dell'ADC o dei dispositivi collegati, ma spesso può essere minimizzato [13].
- *Cross talk*: fenomeno per cui se più canali convergono nello stesso digitalizzatore, il segnale di un canale può essere osservato in un altro canale. La quantità di *cross talk* è espressa in dB. Con digitalizzatori di buona qualità a 24-bit si hanno almeno 120 dB di smorzamento. Digitalizzatori multicanale economici, invece, di solito usano un singolo ADC e un multiplexer analogico, che collega diversi ingressi sequenzialmente all'ingresso dell'ADC. Questo limita le prestazioni in termini di cross talk.

I requisiti prestazionali del sistema di acquisizione sono identificati nel progetto di massima dopo aver definito obiettivi, campo di applicazione, analisi preliminare della struttura e layout dei sensori. La definizione del sistema di acquisizione è fortemente collegata all'identificazione del sistema di trasferimento dei dati (*architettura di sistema*). Ulteriori caratteristiche essenziali che determinano le prestazioni attese dal sistema sono le seguenti [7]:

- *numero di canali e tipo di sensori collegabili;*
- *massima frequenza di campionamento;*
- *possibilità di acquisizione continua, programmata, a comando manuale, automatica su trigger o pre-trigger;*
- *presenza di una elettronica di pre-analisi dei segnali (per esempio: applicazione di filtri);*
- *dimensione basi dati;*
- *consumo elettrico;*
- *alimentazione;*
- *grado di protezione alla polvere e all'acqua espressa in IP Code;*
- *dimensioni.*

Una volta descritti in maniera generica i sistemi di acquisizione, indipendentemente dalla specifica tecnologia e dalla tipologia di sensore associato, risulta interessante fornire un'analisi più dettagliata relativamente al caso specifico dei sistemi AE, il cui principio di funzionamento e i cui sensori sono stati descritti nel paragrafo 2.3.2.2. Nel corso degli ultimi anni sono stati sviluppati diversi sistemi di acquisizione adoperati per le applicazioni di monitoraggio AE. I principali sistemi sono i seguenti [28]:

- Atel[®]
- USAM[®]

Il sistema di acquisizione Atel[®] lavora con trasduttori impostati su una frequenza di tipo banda larga, cioè tra 100 kHz e 400 kHz, e consiste in (Figura 17):

- un amplificatore;
- un filtro Passa Banda;
- un misuratore di soglia;
- un contatore di oscillazioni;
- un registratore.

Il livello di soglia (threshold) è impostato a 100 μ V ed è amplificato a 100 mV, con un guadagno di 60 dB, mentre il limite del conteggio di oscillazioni è fissato a 255 ogni 120 secondi. La metodologia di analisi usata con questa apparecchiatura è la “Ring-Down Counting”. Questa tecnica, però, considera anche altre procedure: per esempio, è possibile considerare tutte le oscillazioni prodotte da un singolo segnale di emissione acustica come un unico evento e quindi sostituire il “Ring_Down Counting” con il “Counting of Events”. L'apparecchiatura Atel[®] non permette la localizzazione della sorgente di emissione acustica.

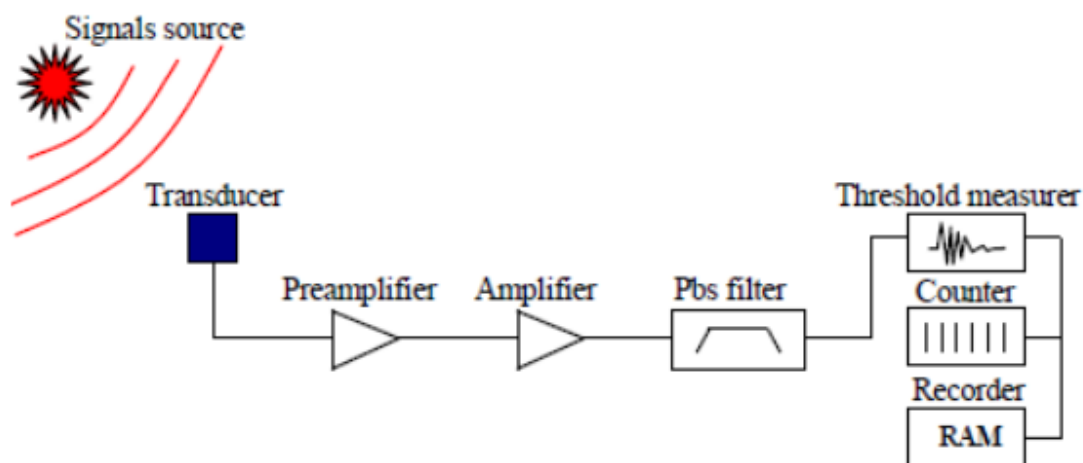


Figura 19 – Schema di funzionamento di un sistema Atel[®]

Il sistema USAM[®] presenta trasduttori impostati su una frequenza tipo banda larga tra 50 kHz e 800 kHz e consiste in:

- 6 sensori preamplificati, ognuno dei quali è collegato ad un'unità che registra i segnali. Tali unità possono lavorare indipendentemente oppure possono essere sincronizzate tra di loro;
- 1 unità centrale per la fase di sincronizzazione;
- 1 misuratore di soglia.

A partire dai segnali, è possibile eseguire una elaborazione volta a determinare il grado di danneggiamento della struttura e localizzare le microfessure.

2.5 Sistemi di trasmissione

La rete di trasmissione delle informazioni svolge un ruolo primario nella comunicazione tra sensori, dai sensori al database locale e da questo al sistema centrale di immagazzinamento, interrogazione ed interpretazione dei dati. In linea più generale, sensori e sistema centrale sono fisicamente connessi attraverso una catena di acquisizione composta da:

- sistema di comunicazione analogico (che connette il sensore al convertitore analogico/digitale);
- convertitore analogico/digitale
- sistema di comunicazione digitale (che connette convertitore e collettore)
- collettore o *sink*, a cui convergono tutti i segnali digitali della rete di monitoraggio.

In base alla distribuzione nello spazio delle suddette componenti, è possibile identificare tre diverse configurazioni del sistema di trasferimento dati:

- *sistema centralizzato*: la conversione analogico/digitale avviene in un unico dispositivo a cui sono collegati, tipicamente tramite cablaggi analogici, tutti sensori;
- *rete di sensori digitali*: la conversione analogico/digitale avviene in ciascun sensore e tipicamente sensore (sensore digitale);
- *sistema misto*: la conversione avviene in corrispondenza di un certo numero di dispositivi distribuiti sulla struttura, a ciascuno dei quali fanno capo più sensori analogici.

2.5.1 Trasmissione convenzionale e innovativa

Nelle reti di sensori digitali, maggiormente diffuse, è possibile distinguere tra *sistemi cablati* (o *wired*), in cui la trasmissione dei dati avviene mediante cavi di tipo elettrico o ottico, e *sistemi wireless*, che sfruttano la radio-frequenza (RF). Nel primo caso il sistema di trasmissione è considerato di tipo convenzionale mentre nel secondo caso si parla di sistema di trasmissione innovativo (Figura 20).

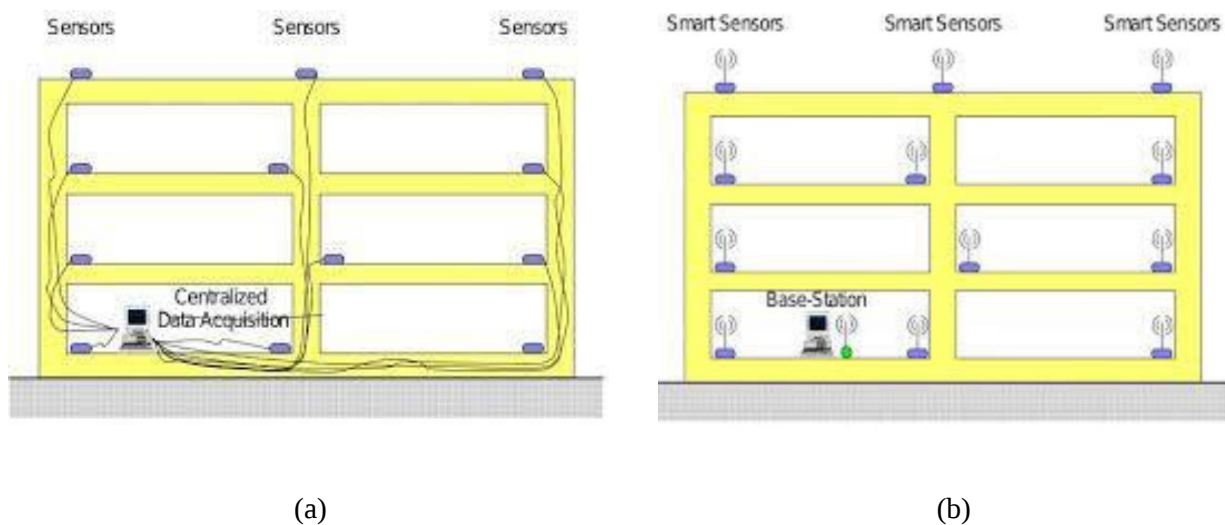


Figura 20 – Sistemi “wired” (a) vs sistemi “wireless” (b)

Il vantaggio principale dei sistemi cablati rispetto alle reti di sensori wireless è la sincronizzazione temporale dei canali. Il campionamento simultaneo, infatti, garantisce la coerenza di fase tra tutti i canali di misura, evitando errori nel calcolo dei cross-spettri e delle funzioni di cross-correlazione. Infatti, la sincronizzazione temporale nelle reti di sensori wireless richiede soluzioni specifiche, mentre rappresenta un compito ordinario quando si usano sistemi di sensori cablati. Nelle reti di sensori wireless, ogni nodo ha un ADC proprio. Di conseguenza, la sincronizzazione temporale dei diversi ADC richiede una base esterna per fornire un riferimento temporale. Una possibile soluzione per la sincronizzazione di ADC distribuiti è rappresentata dal GPS. Ogni volta che è disponibile un segnale GPS, si possono adottare reti di sensori wireless.

Per i sistemi di trasferimento cablati, anche la scelta del tipo di cavo e la connessione con i terminali influenzano la qualità delle misure. Le norme CEI EN 50290-1-1 [15] e CEI EN 50290-1-2 [16]

forniscono tutti i requisiti comuni relativi ai cavi per sistemi di comunicazione e di controllo. I tipi di cavi che trasportano segnali analogici dai sensori al sistema di acquisizione dati sono:

- cavi coassiali;
- cavi costituiti da una singola coppia schermata;
- cavi costituiti da più coppie intrecciate con schermo comune;
- cavi costituiti da più coppie intrecciate e singolarmente schermate.

I cavi coassiali (tipicamente utilizzati per accelerometri piezoelettrici) sono molto economici ma sono i più vulnerabili al rumore elettrico; i cavi costituiti da più coppie intrecciate e singolarmente schermate (solitamente utilizzati per accelerometri force balance) sono pesanti e costosi ma sono i meno inclini a raccogliere il rumore dall'ambiente circostante.

Il collegamento dei fili ai terminali rappresenta un altro aspetto critico, sebbene spesso scarsamente considerato, poiché una connessione scadente favorisce l'introduzione di rumore elettrico. Anche quando vengono evitati fenomeni di ground loop (anelli di massa), c'è sempre una certa quantità di rumore introdotto dall'ambiente circostante. Ad ogni modo, alcune regole pratiche possono aiutare a ridurre al minimo questi effetti. Ad esempio, i cavi ed i sistemi di acquisizione dati devono essere collocati il più lontano possibile da fonti di rumore elettromagnetico. Inoltre, devono essere evitati cavi penzolanti. I cavi devono essere bloccati alla struttura onde evitare effetti triboelettrici. Va precisato, comunque, che anche durante l'elaborazione dei dati, possono essere adottate altre tecniche di riduzione del rumore al fine di migliorare ulteriormente la qualità dei risultati ottenuti.

Nell'ultimo decennio si è assistito a grandi sforzi nello sviluppo di reti di sensori wireless per il monitoraggio strutturale. La prima piattaforma di sensori wireless disponibili in commercio è stata originariamente sviluppata presso l'Università di California a Berkeley nel 1999. Da allora questa tecnologia ha conosciuto un rapido sviluppo e un crescente interesse da parte della comunità tecnico-scientifica. Il successo commerciale è dovuto principalmente al basso costo e alla possibilità di combinare diversi sensori nello stesso nodo wireless. I notevoli progressi delle comunicazioni wireless, uniti a una certa capacità di immagazzinamento locale dei dati e a crescenti capacità computazionali locali, rendono possibile l'analisi e l'interrogazione dei dati anche al livello locale delle singole unità, riducendo in tal modo i requisiti in termini di capacità di trasmissione. La Tabella 3 distingue i sensori adatti all'integrazione in reti wireless e quelli che, al momento, non possono prescindere da connessioni cablate per via del loro consumo elevato. Ovviamente, i sensori nella colonna di destra della Tabella 3 possono essere anche impiegati in modalità cablata.

I cosiddetti “sensori wireless” sono da intendersi, in realtà, come nodi autonomi di acquisizione dati a cui vengono collegati i sensori tradizionali (ad esempio, accelerometri, strain gauges, LVDT, inclinometri, etc.). Uno dei maggiori vantaggi connessi all’implementazione di soluzioni wireless risiede proprio nella disponibilità di risorse di calcolo integrate col sensore. Tali risorse consentono, tra l’altro, la possibilità di svolgere compiti di interrogazione, il che rende i sensori wireless particolarmente attrattivi per il monitoraggio strutturale. D’altra parte, però, la disponibilità di risorse di calcolo integrate rende i sensori wireless dei sistemi piuttosto complessi, le cui elevate prestazioni dipendono dall’integrazione ottimale di due componenti primarie: la prima componente, di tipo hardware, è l’unità sensoriale wireless, mentre la seconda componente è di tipo software e consente, tra l’altro, il collegamento agli altri nodi della rete al fine di ottimizzare la collaborazione tra le varie unità. Le risorse di calcolo, quindi, possono essere sfruttate per molteplici scopi che vanno dalla trasmissione dati, all’interrogazione, all’elaborazione, all’immagazzinamento.

In Tabella 5 e Tabella 4, si è cercato di riassumere i principali vantaggi/svantaggi delle due tecnologie (wired e wireless), al fine di fornire utili riferimenti rispetto alla qualificazione di possibili soluzioni di monitoraggio. Dalla comparazione tra le due tecnologie sembrerebbe che la sola scelta possibile per fruire pienamente dei vantaggi di entrambe e per compensare i loro svantaggi è quella di realizzare un’architettura ibrida. Infatti, recentemente sono stati introdotti anche sistemi combinati wired/wireless al fine di semplificare l’integrazione di sensori a basso consumo e sensori a elevato consumo.

Tabella 3 – Sensori adoperabili esclusivamente con trasmissione convenzionale (cablati) e sensori idonei all’integrazione in reti wireless.

Sensori wired (cablati)	Sensori wireless
Sensori in fibra ottica Interferometri laser Interferometri radar	Accelerometri Strain gages GPS Sensori inclinometrici Sensori di temperatura Sensori di umidità Sensori di corrosione Anemometri

Le prestazioni del sistema di trasferimento dei dati, e più in generale la definizione dell’architettura di sistema, possono essere identificate in funzioni di caratteristiche essenziali generiche, cioè valide per tutte le tipologie di soluzioni (sia wireless che wired), tra cui le principali sono elencate nel seguito [7].

- *Affidabilità*: è correlata al livello di perdita di dati e alla criticità dell'applicazione; alcuni modi di comunicazione digitali (in particolare wireless) sono soggetti a perdita di dati.
- *Robustezza del sistema*: un'interruzione di una connessione analogica pregiudica la trasmissione del segnale; prevede una ridondanza di sistema consentono di prevenire tale problematica.
- *Facilità di montaggio*: è legata alla complessità delle operazioni di montaggio e quindi al grado di specializzazione del personale coinvolto.
- *Velocità di trasmissione*: i sistemi wireless richiedono tempi di trasmissione maggiori per una sufficiente affidabilità della comunicazione.
- *Distanza di trasmissione*: è intrinsecamente correlata al problema del rumore per cablaggi analogici, per i quali quest'ultimo aumenta con la distanza coperta; le connessioni digitali, invece, sono meno soggette a rumore; tuttavia, tali soluzioni tecnologiche presentano altri limiti che ne riducono le distanze coperte; infine, i cablaggi in fibra ottica sono soggette a bassi rumori anche per grandi distanze sebbene i nodi rappresentino elevate criticità.
- *Scalabilità ed espandibilità*: sono legate alla facilità nell'estendere (o ridurre) il sistema di comunicazione, con altri nodi.
- *Ingombro*: spazio richiesto per il sistema di comunicazione.
- *Disponibilità di alimentazione elettrica*
- *Costi*: somma dei costi dei dispositivi, dell'installazione e della manutenzione.

Negli ultimi anni, è sempre maggiore l'interesse verso sistemi di monitoraggio ibridi di tipo smart, in cui cioè i dati vengono trasferiti sfruttando in parte (o completamente) la rete e possono essere archiviati in cloud (esempio in Figura 21). Tuttavia, tale soluzione, allo stato attuale, presenta una serie di limitazioni che ne riducono l'applicabilità nel campo del monitoraggio strutturale di opere di ingegneria civile. Per le reti di comunicazioni wireless o ibride di tipo smart è fondamentale considerare ulteriori caratteristiche essenziali.

- *Qualità del Servizio (QoS)*: la rete deve prevedere la possibilità di gestire e/o garantire la qualità del servizio in dipendenza del tipo di applicazione. In particolare, devono essere monitorati ritardo e perdita dei pacchetti così come latenza e affidabilità
- *Throughput*: il throughput identifica la quantità di dati trasferita nell'unità di tempo; questo dipende da diversi fattori e in particolare, nel caso di trasmissioni wireless, dal numero di utenti/dispositivi che condividono il canale

- **Latenza:** per le applicazioni di controllo e automazione è fondamentale minimizzare il tempo trascorso fra la generazione di un comando (definito evento) e la sua attuazione (ovvero la risposta del sistema all'evento stesso)

I dispositivi di comunicazione sono scelti in base al modo (cablato o wireless) e al protocollo di comunicazione. Per i sistemi di comunicazione cablati, esistono una serie di protocolli di comunicazione, disponibili commercialmente, tra cui per esempio: CAN (Controller area Network) [17], Profibus o EtherCAT [18]. Allo stesso modo, i protocolli di trasmissione wireless più diffusi sono IEEE 802.15.4 (WSN), IEEE 802.11 (Wi-fi), IEEE 802.15.1 (Bluetooth), RFID, protocolli di telefonia mobile (GSM, GPRS, UMTS).

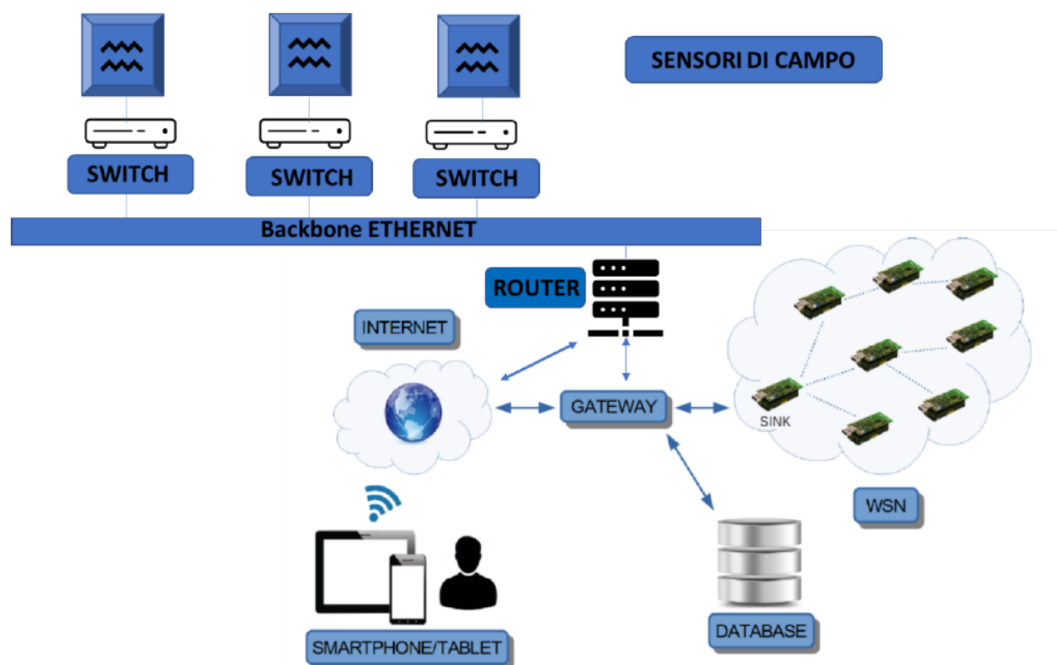


Figura 21 – Schema di un'architettura ibrida di un sistema SHM.

Tabella 4 – Criticità delle due tecnologie a confronto (Wired vs Wireless).

Tecnologia Wired	Tecnologia Wireless
<i>Mobilità</i> devices non possono essere spostati in maniera semplice. Una modifica della posizione comporta un'estensione del cavo o la definizione di un nuovo cablaggio.	<i>Sicurezza dei dati</i> Sebbene esistano molti meccanismi per rendere i networks e lo scambio dati sicuri, in una rete wireless le informazioni viaggiano mediante segnali elettromagnetici. Di conseguenza, sono più soggette ad intercettazioni e ad eventuali decrittazioni.
<i>Espansione</i> L'estensione della copertura del network non è immediata e può richiedere anche l'inserimento di ulteriori connessioni fisiche	<i>Interferenze</i> Le reti wireless possono essere soggette a interferenze provenienti dall'esterno (per es. le microonde viaggiano nella stessa banda utilizzata dalle reti wireless LAN). Questi disturbi possono peggiorare la qualità e l'affidabilità delle comunicazioni.
<i>Costi</i> Le connessioni tramite cavi sono generalmente più costose rispetto alle reti wireless, poiché ai costi dei singoli devices vanno aggiunti quelli dei cavi e della manodopera. Inoltre, in caso di danneggiamenti, le sostituzioni sono complesse e richiedono tempo.	<i>Copertura</i> L'area di pertinenza di un network wireless può subire delle riduzioni a causa di ostacoli o all'impropria posizione dei devices. Questa limitazione può causare una perdita di informazioni o comandi tra i devices e il gateway.
<i>Complessità.</i> L'installazione richiede l'intervento di personale specializzato.	<i>Velocità</i> La velocità di trasmissione dei dati è inferiore se comparata a quella delle reti wired (ad es. l'Ethernet).
<i>Potenza</i> Nella maggior parte delle situazioni, le reti wired necessitano di essere collegate a una fonte di energia per poter funzionare e nel caso di una perdita di tensione, il network potrebbe non essere in grado di funzionare mediante il supporto di una batteria (al contrario di una rete wireless)	

Tabella 5 – Potenzialità delle due tecnologie a confronto (Wired vs Wireless).

Tecnologia Wired	Tecnologia Wireless
<i>Sincronizzazione</i> Il campionamento simultaneo è intrinseco in questa soluzione e garantisce la coerenza di fase tra tutti i canali di misura, evitando errori nell'elaborazione del segnale.	<i>Mobilità</i> L'assenza dei cavi permette sia di modificare la posizione fisica dei dispositivi senza perdere la connessione sia di muovere i devices tra reti differenti senza eccessive difficoltà.
<i>Sicurezza fisica</i> Grazie al collegamento fisico dei cavi, le manomissioni dall'esterno sono estremamente difficili e rare.	<i>Flessibilità</i> La creazione di network wireless è estremamente semplice e intuitiva. Questa caratteristica permette di agganciare nuovi sensori in modo relativamente immediato.
<i>Distanza</i> Le trasmissioni possono avvenire a distanze molto più elevate rispetto a quelle dei più comuni protocolli wireless (come il Wi-Fi). Inoltre, la trasmissione non è in alcun modo compromessa dalla presenza di interferenze e ostacoli.	<i>Scalabilità</i> Le reti wireless possono essere scalate sia verso l'alto che verso il basso (cioè ampliate o ridotte) in maniera molto semplice e a bassissimo (o nullo) costo. Infatti, l'inserimento di nuovi sensori e attuatori, in periodi successivi alla creazione del network originale, è molto intuitivo. Il numero massimo di devices supportati dalla specifica rete è l'unico vincolo che deve essere rispettato quando si progetta un'espansione del network.
<i>Semplicità</i> La connessione del dispositivo al network è semplice e immediata poiché è necessario unicamente connettere il device al cavo predisposto.	<i>Flessibilità</i> La creazione di network wireless è estremamente semplice e intuitiva. Questa caratteristica permette di agganciare nuovi sensori in modo relativamente immediato.
<i>Affidabilità</i> La trasmissione attraverso i cavi è solida e costante nel tempo. Generalmente molto limitati gli effetti di interferenze esterne.	<i>Economicità</i> La realizzazione di una rete wireless è molto semplice e nella maggior parte dei casi non richiede l'intervento di personale specializzato. Di conseguenza, i costi si limitano a quelli relativi ai soli dispositivi fisici
<i>Velocità</i> La velocità di trasmissione teorica dell'Ethernet può raggiungere i 100 Gbps, contro l'1,3 Gbps del Wi-Fi.	

2.5.2 Reti di trasmissione wireless

La netta distinzione sin qui applicata, tra sensore, sistema di acquisizione e sistema di trasmissione, per i sistemi SHM basati su una rete di sensori wireless (Wireless Sensor Network – WSN) trova scarso riscontro. In un siffatto sistema di monitoraggio, infatti, ciascuna unità di rilevamento wireless sarà responsabile di tre compiti: (i) raccolta di dati di risposta strutturale, (ii) interrogazione locale dei dati di misurazione raccolti, e (iii) comunicazione (senza fili) dei dati di risposta o dei risultati dell'analisi mediante una rete (senza fili) che comprende altre unità di rilevamento wireless o elaborazione (si veda ad esempio lo schema di Figura 22).

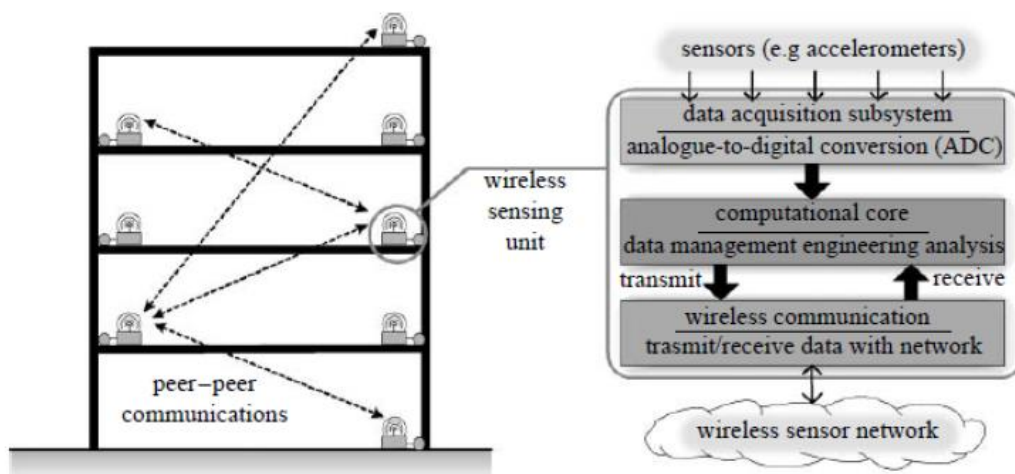


Figura 22 – Schema di esempio di architettura wireless per un edificio.

La performance di un sistema SHM di tipo WSN sarà intrinsecamente correlata alle caratteristiche di questi ultimi. Si consideri, in particolare, il caso di un sistema di monitoraggio wireless a servizio di un'infrastruttura stradale, quale quella riportata a titolo di esempio in Figura 23. Una tipica rete di sensori wireless per il monitoraggio di infrastrutture civili, come i viadotti, si basa sull'installazione di un gran numero di sensori in posizione chiave sulla struttura da monitorare. Il server locale invia il comando di attivazione ai sensori wireless, abilita la rete, e imposta i parametri di monitoraggio; l'intera rete di sensori viene sincronizzata; infine, i vari sensori cominciano ad acquisire i dati e a trasmetterli, grezzi o elaborati, al server locale che provvede alla loro gestione e trasmissione al sistema di supporto decisionale (DSS) remoto. Dal punto di vista hardware, dunque, il sistema si compone dei nodi wireless che integrano i sensori, e del server locale che coordina la rete. I nodi

sono, dunque, responsabili della misura della risposta strutturale e dell'esecuzione di operazioni interne alla rete. Il server locale, invece, gestisce la rete a un livello superiore, coordinando i vari nodi e eseguendo operazioni di ricezione/trasmmissione dati. Dal punto di vista software, è possibile identificare differenti componenti: quella che gestisce le operazioni di rete, quella che effettua l'acquisizione dati, quella responsabile dell'elaborazione dati, quella deputata alla gestione dei consumi, etc. Come già osservato in precedenza, l'acquisizione dati richiede strategie per la sincronizzazione temporale dei sensori; tale componente è anche responsabile dell'impostazione dei parametri di acquisizione (ad esempio, la frequenza di campionamento).

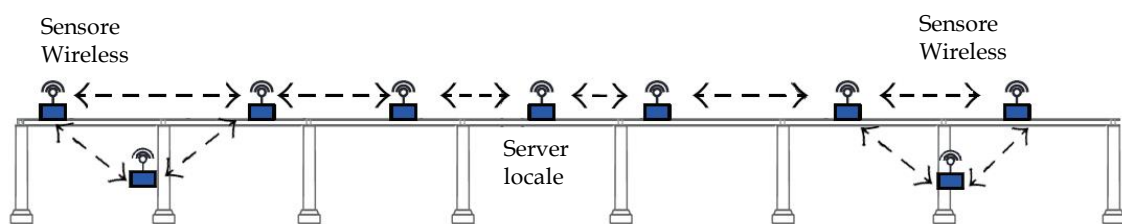


Figura 23 – Schema di esempio di un sistema WSN per il monitoraggio di un viadotto.

Come detto, i sensori wireless per le loro caratteristiche differiscono dai sensori tradizionali (cablati, in quanto si tratta di nodi autonomi di acquisizione che integrano al loro interno il trasduttore, un microprocessore, e sistemi di comunicazione wireless. La disponibilità di risorse di calcolo integrate nel nodo consente non solo l'interrogazione del sensore ed elaborazioni dei segnali acquisiti ma anche l'auto-diagnosi e l'auto-calibrazione del sensore. In definitiva, un sensore wireless si compone generalmente di quattro sottosistemi funzionali: l'interfaccia sensoriale, l'elemento computazionale centrale, il trasmettitore wireless e la sorgente di alimentazione. L'interfaccia sensoriale include un elemento di interfacciamento a cui il sensore viene collegato e un convertitore analogico-digitale. Il nucleo computazionale centrale consiste generalmente in un microcontrollore per le operazioni di calcolo, una RAM per l'immagazzinamento temporaneo dei dati acquisiti e/o elaborati, e una memoria flash col sistema operativo e i software di elaborazione dati. Il trasmettitore wireless è solitamente costituito da un modem a radiofrequenza e da un'antenna per lo scambio di informazioni con gli altri sensori della rete e la trasmissione dati al server locale. La sorgente di alimentazione è solitamente rappresentata da batterie. Infatti, i sensori wireless sono tipicamente alimentati a batteria, la cui capacità, nonostante lo sviluppo delle batterie al litio, è ancora piuttosto limitata, almeno rispetto ai requisiti del monitoraggio strutturale. Una volta che la batteria si è esaurita, la sua sostituzione può rappresentare un compito spesso tedioso, o peggio che può rivelarsi costoso o

addirittura impossibile nel caso peggiore. Pertanto, la gestione dei consumi è una delle principali problematiche da affrontare nello sviluppo di una rete di sensori wireless a grande scala per le applicazioni di monitoraggio strutturale. Al fine di gestire al meglio i consumi e prolungare la vita della rete di sensori wireless, è possibile adottare differenti strategie. La prima e più semplice si basa sull'impiego di soluzioni hardware a basso consumo. La seconda prevede l'implementazione di strategie per l'impiego efficiente dell'energia di alimentazione. La terza strategia, infine, si basa sull'approvvigionamento energetico diretto dei sensori da fonti disponibili in locale. In tal senso, l'impiego di sensori basati sulla tecnologia MEMS consente di minimizzare i consumi. La riduzione dei consumi, tuttavia, implica anche una riduzione delle prestazioni. Ne consegue che non è possibile ridurre i consumi illimitatamente ma va sempre ricercato un appropriato compromesso tra consumi e prestazioni. Il semplice impiego di sensori a basso consumo, dunque, non è sufficiente a garantire una durata di funzionamento sufficiente a soddisfare i requisiti del monitoraggio strutturale.

L'efficientamento dei consumi, in ogni caso, consente di prolungare la durata di funzionamento delle reti di sensori wireless. Sono tre i metodi generalmente adottati per migliorare l'efficienza dei consumi energetici: modalità dormiente, ottimizzazione della rete, e compressione dati. In modalità dormiente i sensori non sono operativi; solo il trasmettitore radio è attivo in attesa di un segnale per l'attivazione del sensore e l'esecuzione delle misure. Questa strategia consente di ridurre significativamente i consumi ma non è idonea alle applicazioni di monitoraggio in continuo. L'ottimizzazione della rete si basa sulla ricerca della posizione ottimale dei sensori e dell'instradamento ottimale dei pacchetti al fine di minimizzare i consumi. La compressione dati, infine, riduce i volumi di dati trasmessi e le distanze di trasmissione mediante l'implementazione di strategie di elaborazione dati interne alla rete, in modo da prolungare la durata di funzionamento della rete di sensori wireless.

Sebbene l'implementazione di strategie di riduzione dei consumi energetici sia fondamentale per l'applicazione su larga scala delle reti di sensori wireless per il monitoraggio strutturale, la durata limitata delle batterie resta comunque un problema. Al fine di evitare la loro periodica sostituzione, sono allo studio innovative tecniche di approvvigionamento energetico in locale da parte dei sensori. Tali strategie sfruttano l'energia disponibile nell'intorno dei sensori (energia eolica, energia solare, vibrazioni) convertendola in energia elettrica per l'alimentazione dei sensori stessi.

A causa dei ritardi nella trasmissione dati o di errori del clock interno dei sensori, i dati raccolti da differenti sensori wireless all'interno di una rete possono essere inizialmente non sincronizzati. L'errore di sincronizzazione, tuttavia, può compromettere l'accuratezza delle procedure di identificazione del danno. Un errore relativamente piccolo nella sincronizzazione (dell'ordine di 30

μs) può determinare un significativo errore nella stima delle forme modali dei modi superiori, che sono quelli più sensibili al danno locale [30]. L'effetto dell'errore di sincronizzazione, spesso, è per certi versi comparabile a quelle del rumore di misura. Nel tempo sono state dunque sviluppati differenti protocolli di sincronizzazione ([31], [32]).

Un aspetto di fondamentale rilievo quando si parla di sistemi WSN è rappresentato dall'organizzazione topologica (o *architettura*) del sistema stesso. Infatti, l'esecuzione di operazioni quali acquisizione, trasmissione ed elaborazione dati, nonché propagazione dei comandi attraverso i nodi della rete di un sistema di monitoraggio wireless dipende dalla topologia della rete. Quest'ultima definisce l'instradamento delle informazioni sulla rete e abilita differenti modalità di cooperazione tra i nodi. In generale, le reti di sensori wireless possono essere classificate come reti *single-hop* o reti *multi-hop* a seconda della topologia della rete.

Un esempio di rete single-hop è schematicamente illustrato in Figura 24. La rete single-hop è anche denominata topologia a stella.

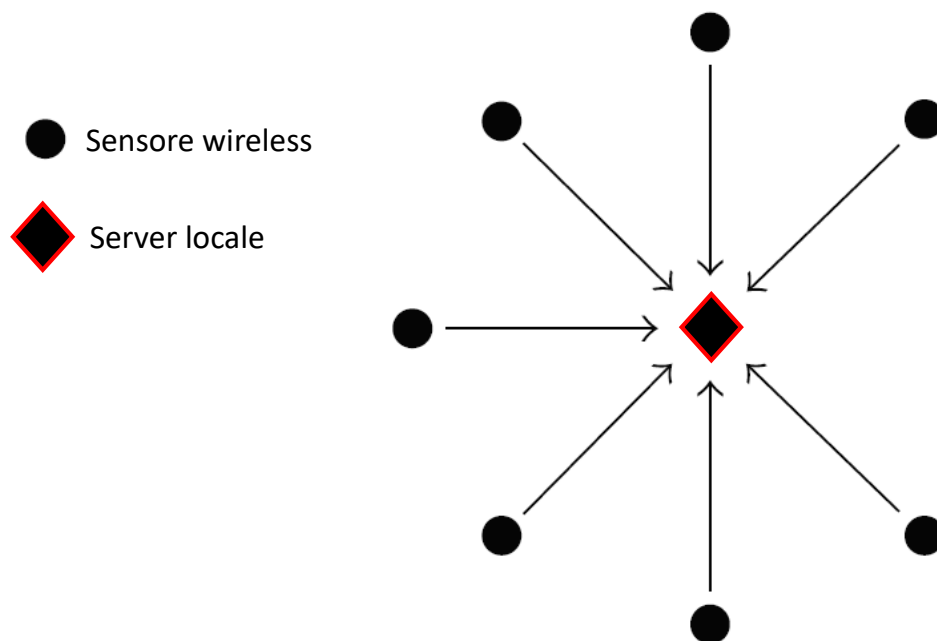


Figura 24 – Esempio di rete single-hop

Il server locale è collocato al centro della rete e i nodi sono collocati attorno ad esso. I dati sono trasmessi direttamente al server da ciascun nodo. Questa topologia di rete è molto semplice e robusta: un malfunzionamento di un nodo non influenza l'operatività del resto della rete. Tuttavia, una rete single-hop ha generalmente una velocità limitata dalle capacità del gateway e del server di elaborare i pacchetti provenienti dai vari nodi. Inoltre, le reti single-hop presentano un'ulteriore limitazione legata alla distanza di trasmissione, per cui i nodi non possono coprire grandi distanze a meno che non sia disponibile una grossa sorgente di alimentazione. La dimensione attesa di un segmento di rete con collegamento wireless è vincolata dalla tipologia di protocollo di trasmissione che si sceglie, una dimensione tipica ad esempio per i sistemi WiFi è compresa tra i 25 e 35 km. Per questi motivi le reti single-hop trovano limitata applicazione nel monitoraggio strutturale a servizio di infrastrutture stradali.

Le reti multi-hop, al contrario, rappresentano un'interessante alternativa per le applicazioni di monitoraggio strutturale in quanto operano eseguendo una comunicazione multi-hop da nodo a nodo, e dai nodi al server. La comunicazione multi-hop consente la trasmissione diretta di dati e comandi tra due nodi della rete a distanza compatibile con la portata della trasmissione radio. La comunicazione multi-hop è sicuramente più complessa rispetto a quella single-hop poiché ogni nodo deve identificare la soluzione più efficiente per l'instradamento dei pacchetti al server, coordinandosi con gli altri nodi per la trasmissione e la ricezione dei pacchetti di dati. Occorre, inoltre, garantire una riconfigurazione dinamica dell'instradamento dei pacchetti allorché un nodo della rete smette di funzionare correttamente e, dunque, non opera più come intermediario. D'altro canto, soluzioni multi-hop si rivelano particolarmente idonee a coprire le esigenze di monitoraggio su grandi distanze, come nel caso delle grandi infrastrutture civili.

Le reti multi-hop possono essere ulteriormente classificate in quattro categorie: reti a mesh (Figura 25a), reti multi-hop lineari (Figura 25b), reti ad albero (Figura 25c), reti multi-hop casuali (Figura 25d).

Una rete di tipo a mesh è caratterizzata dall'assenza del server: ciascun nodo può, quindi, temporaneamente agire da server in funzione delle necessità dell'elaborazione e della trasmissione dati. Una rete di questo tipo consente, con lo sviluppo di un apposito software, una completa autodiagnosi, ma l'instradamento dei pacchetti è piuttosto complesso per cui le reti a mesh trovano rara applicazione nell'ambito del monitoraggio strutturale.

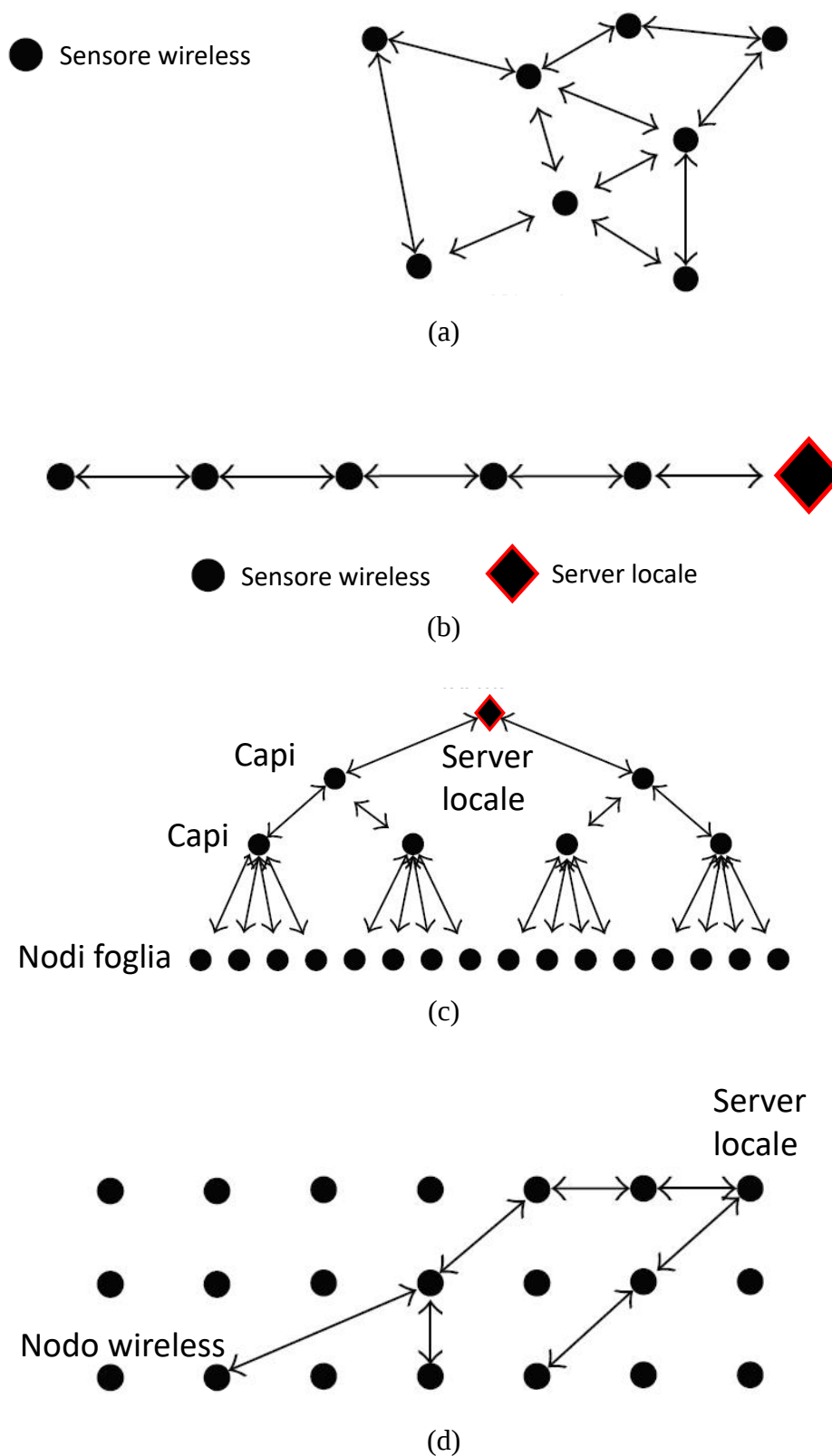


Figura 25 – Reti multihop: a mesh (a), multi-hop lineari (b), ad albero (c), multi-hop casuali (d)

Le reti multi-hop lineari presentano una catena lineare di trasmissione, cioè i dati sono trasmessi da un nodo all'altro linearmente. Tutti i sensori nella rete formano così un'unica linea di trasmissione dati e, nello specifico, i nodi intermedi svolgono tre funzioni: acquisizione dati, ricezione dati, trasmissione dati. Il successo della trasmissione dati, tuttavia, dipende dall'efficienza di ciascun nodo nella rete: in caso di malfunzionamento di uno dei nodi, l'efficienza della trasmissione può essere compromessa.

Nelle reti ad albero le unità wireless al livello più basso sono denominate nodi foglia e sono organizzate in diverse comunità. Per ciascuna comunità, c'è un sensore capo che è responsabile dell'organizzazione e dell'elaborazione dei dati, nonché della comunicazione degli stessi all'interno della comunità. Le comunità di sensori capo costituiscono un livello superiore di comunità, a sua volta dotato di sensori capo, finché, all'ultimo livello, il sensore capo comunica direttamente con il server locale. I pacchetti di dati sono instradati dai livelli più bassi ai livelli superiori fino a raggiungere il server. Queste reti richiedono maggiori performance del sistema in termini di alimentazione e capacità computazionali, ma in certi casi possono essere idonee alle applicazioni di monitoraggio strutturale.

In una rete multi-hop casuale i pacchetti di dati sono trasmessi in maniera random fino a giungere al server. La disponibilità di diverse soluzioni per la trasmissione dati rende queste reti particolarmente robuste e flessibili. Esse, pertanto, risultano particolarmente indicate per le applicazioni di monitoraggio strutturale a servizio di infrastrutture stradali. Teoricamente, una rete di questo tipo può essere scalata fino a coprire un'area infinita. L'unica problematica applicativa delle reti multi-hop casuali è legata all'elevato consumo energetico dei nodi più vicini al server, attraverso i quali passano le maggiori quantità di dati.

Attualmente, i protocolli di comunicazione wireless possono essere suddivisi approssimativamente in breve e lungo raggio. I protocolli a corto raggio coprono distanze fino a 1 km senza ostacoli (Bluetooth LE, ZigBee, Wi-Fi, WirelessHart). I protocolli a lungo raggio sono invece in grado di coprire lunghe distanze, fino a 15 km in alcuni casi, e sono pertanto più adeguati alle esigenze del monitoraggio delle opere civili. I protocolli a lungo raggio sono suddivisi in spettro senza licenza (SigFox, LoRa) e concesso in licenza (GSM, 3G, 4G, LTE-M, NB-IoT, 5G). SigFox, LoRa e NB-IoT sono caratterizzati da bassa potenza e sono quindi definiti protocolli LPWAN (LowPower Wireless AreaNetwork). Nei sistemi LPWAN, il basso consumo energetico si ottiene garantendo che la comunicazione possa essere avviata solo dal dispositivo finale (sensore o nodo) e non dal server. Gli LPWAN sono ideali per applicazioni che coinvolgono sensori a bassa potenza che inviano piccole quantità di dati su lunghe distanze.

Si stima che i dispositivi connessi superano i 50 miliardi in tutto il mondo, pertanto il traffico dei dati è dell'ordine di 1021 byte. Lo sforzo di tutti gli operatori è quello di sviluppare soluzioni di connessione di rete nel rispetto della sicurezza e della privacy. Sono così sviluppati adeguati standard tecnologici attraverso le cosiddette organizzazioni ufficiali di standardizzazione (SDO – Standard Developing Organizations). Nella tabella di seguito sono illustrati i principali organismi di standardizzazione ed i loro domini di attività, dividendo nei due macro-ambiti architetturali dei “layer fisico/networking” e “services/application”.

Tabella 6 –SDO ufficiali in ambito di tecnologie di connessione di rete.

Official Standard Organization	Web Site	Standard	
		Device - Network Layer	Service - Application Layer
CEN - Comitato Europeo di Normazione	www.cen.eu	●	●
CENELEC - European Committee for Electrotechnical Standardization	www.cenelec.eu	●	
ETSI - European Telecommunications Standards Institute	www.etsi.org	●	●
IEEE - Institute of Electric and Electronic Engineer	www.ieee.org	●	●
IEC - International Electrotechnical Commission	www.iec.org	●	●
IETF - The Internet Engineering Task Force	www.ietf.org	●	●
ISO - International Organization for Standardization	www.iso.org	●	●
ITU-T - International Telecommunication United Nation	www.itu.org	●	●
oneM2M	www.onem2m.org	●	

Per tutto quanto detto, con riferimento all'esempio dell'infrastruttura di trasporto monitorata mediante sistema WSN (si veda Figura 23), le principali prestazioni richieste al sistema di monitoraggio possono essere sintetizzate come riportate nel seguito.

- *Risoluzione / Sensibilità elevata*: la risposta strutturale alle vibrazioni ambientali e/o generate dal traffico veicolare è solitamente caratterizzata da ampiezza ridotta; i sensori devono essere in grado di acquisire correttamente tale risposta, per cui devono essere caratterizzati da elevata sensibilità e risoluzione; inoltre, devono essere progettati in maniera da minimizzare il rumore di fondo del sensore. Solitamente, la risoluzione massima dei sensori wireless è circa 1 mg per gli accelerometri e circa 1 µε per i sensori di deformazione.

- *Frequenza elevata*: poiché molte tecniche di identificazione del danno sono basate sull'analisi della risposta dinamica delle strutture, tecniche di sovra-campionamento sono spesso adottate per migliorare il rapporto segnale-rumore riducendo l'energia relativa del rumore; ne consegue la necessità di disporre di frequenze di campionamento generalmente elevate.
- *Velocità elevata*: la tecnologia basata su reti di sensori wireless permette l'installazione di un gran numero di sensori, al fine di migliorare le performance complessive del sistema di monitoraggio strutturale; in presenza di frequenze di campionamento elevate e di centinaia o migliaia di sensori, si genera un enorme volume di dati da trasmettere in un tempo limitato al server centrale.
- *Affidabilità elevata*: gli effetti del rumore, interferenze elettromagnetiche, perdite di pacchetti sono problemi comunemente riscontrati nelle applicazioni di monitoraggio strutturale basate su sensori wireless; ne consegue la necessità di sviluppare sistemi di comunicazione e trasmissione dati efficienti e affidabili, riducendo al minimo la perdita di dati e/o informazioni sulla rete: infatti, tali perdite di dati hanno come effetto ultimo quello di incrementare il rumore, impedendo un'analisi affidabile dei dati misurati e, di conseguenza, un'efficace valutazione automatica delle condizioni della struttura [29].
- *Lunga durata*: il monitoraggio delle infrastrutture stradali è un compito che, generalmente, non si esaurisce in un breve arco di tempo; al contrario, il sistema di monitoraggio deve assicurare, comunemente, una vita utile paragonabile a quella dell'infrastruttura monitorata. Il sistema, dunque, deve rimanere attivo e operativo per alcuni decenni, acquisendo dati in continuo e consentendone l'interrogazione. Attualmente, i sensori wireless sono alimentati da batterie con capacità limitata, per cui l'implementazione di efficienti strategie di gestione dei consumi è fondamentale per realizzare un efficace programma di monitoraggio strutturale.
- *Sincronizzazione temporale*: ciascun sensore wireless della rete è dotato di un proprio clock che, almeno inizialmente, non è sincronizzato con quello degli altri nodi; l'errore di sincronizzazione, tuttavia, ha un effetto finale sulle misure comparabile o addirittura superiore a quello del rumore di fondo del sensore: è necessario, pertanto, garantire un'efficace sincronizzazione tra i vari nodi della rete.
- *Acquisizione di grandezze fisiche eterogenee*: le infrastrutture stradali sono sistemi generalmente complicati, per la cui completa comprensione è necessario monitorare molteplici parametri e grandezze fisiche, tra cui accelerazioni, spostamenti, deformazioni, fessurazioni, temperatura, umidità, etc. Ovviamente ciò comporta la necessità di acquisire

segnali eterogenei, di cui spesso alcuni di tipo statico e altri di tipo dinamico, alcuni di tipo assoluto e altri di tipo relativo. Una rete di sensori wireless per il monitoraggio di infrastrutture stradali, pertanto, deve essere sufficientemente flessibile da consentire l'acquisizione di differenti tipi di segnali.

- *Trasmissione su lunga distanza:* la lunghezza complessiva di un'infrastruttura stradale, anche in ambito urbano, solitamente eccede le capacità di trasmissione del singolo nodo della rete. Pertanto, sebbene i sistemi di comunicazione single-hop siano generalmente molto semplici da implementare, essi non sono solitamente adeguati a soddisfare le necessità del monitoraggio strutturale. Al contrario, i sistemi di comunicazione wireless multi-hop presentano caratteristiche che li rendono idonei alle applicazioni di monitoraggio strutturale in area urbana.
- *Posizione dei sensori:* la posizione dei sensori è solitamente dettata dalle esigenze di valutazione delle condizioni strutturali per cui, una volta installati, le loro posizioni non possono essere modificate per esigenze legate, ad esempio, alla trasmissione dati. La distanza tra i nodi della rete deve, pertanto, essere oggetto di attenta valutazione in sede di progettazione del sistema di monitoraggio.

In definitiva, le reti di sensori wireless rappresentano senza dubbio una valida soluzione scalabile e di lungo periodo per il monitoraggio strutturale opere civili, quali le infrastrutture stradali. I principali vantaggi sono connessi alla semplicità di installazione e all'efficiente gestione dei dati a costi decisamente inferiori rispetto alle soluzioni cablate. Tuttavia, la tecnologia basata sulle reti di sensori wireless non può essere considerata ancora del tutto matura e occorre tener conto dei suoi limiti, primi fra tutti quelli legati all'alimentazione, all'affidabilità della trasmissione dati e alla banda limitata. Un'attenta progettazione, comunque, riesce spesso, se non ad ovviare, quantomeno a limitare gli inconvenienti legati ai suddetti limiti delle reti di sensori wireless.

2.5.3 Sistemi SHM smart (IoT)

Nello scenario evolutivo dei sistemi di monitoraggio sta emergendo lo sviluppo di sistemi di monitoraggio intelligenti (smart) basati su paradigma Internet of Things (IoT), i quali consentono, potenzialmente, di integrare in tempo reale le informazioni ambientali, antropiche e strutturali adoperabili da software di data analysis. In generale, il paradigma IoT prevede di dotare gli oggetti attivi in un qualunque sistema di comunicazione, e quindi di monitoraggio, di intelligenza autonoma attraverso la quale possono percepire, monitorare, reagire all'ambiente e comunicare in modo autonomo le informazioni che elaborano e raccolgono ad altri oggetti smart o a servizi integrati o distribuiti in cloud. I sensori IoT sono caratterizzati, alla stregua dei sensori wireless, da basso costo,

semplicità di installazione, assenza di cablaggio, garanzia di trasmissione dati, semplice riconfigurabilità e scalabilità dei sistemi. Il paradigma IoT si fonda sulla disponibilità di un'ampia gamma di materiali, infrastrutture di rete, protocolli di comunicazione, servizi Internet e tecnologie informatiche [33].

Per quanto concerne l'architettura di un sistema SHM di tipo IoT, è possibile individuare generalmente i seguenti componenti:

- Sensori IoT
- Gateway e/o concentratori
- Controller del sistema

I sensori IoT sono dispositivi intelligenti, generalmente denominati “client”, che rilevano le grandezze misurate e trasmettono/ricevono dati ed informazioni al/dal gateway e/o concentratore.

Il gateway è un dispositivo di rete che ha lo scopo di veicolare i pacchetti di dati provenienti dal campo, rilevati dai sensori IoT anche di diverso tipo, e trasmetterli all'esterno della rete locale.

Il concentratore o HUB è un dispositivo di rete che ha lo scopo di veicolare i pacchetti di dati provenienti dal campo, rilevati dai sensori IoT dello stesso tipo, e trasmetterli all'esterno della rete locale.

Il controller del sistema è un dispositivo che ha la capacità di raccogliere, immagazzinare e gestire i dati provenienti da ogni Gateway. Tale dispositivo deve, infine, integrarsi con i sistemi di gestione dei dati.

I collegamenti tra sensori IoT e Gateway e/o concentratore, possono essere di diverso tipo ed avere una differente topologia di rete: a stella oppure a mesh.

- La topologia di rete a stella è tipica delle reti LP-WAN (con tecnologia LoRaWan) in cui tutti i sensori IoT (Client) sono connessi ad un nodo centrale (Gateway). Generalmente, in questa soluzione non è consentita la comunicazione diretta tra due sensori.
- La topologia di rete a mesh, tipica delle reti basate su protocollo di comunicazione a standard IEEE 802.15.4, prevede che ogni sensore nodo (Client), oltre che essere collegato direttamente al Gateway, può comunicare anche con altri nodi.

Una rappresentazione schematica di un sistema SHM di tipo smart è riportata in Figura 26.

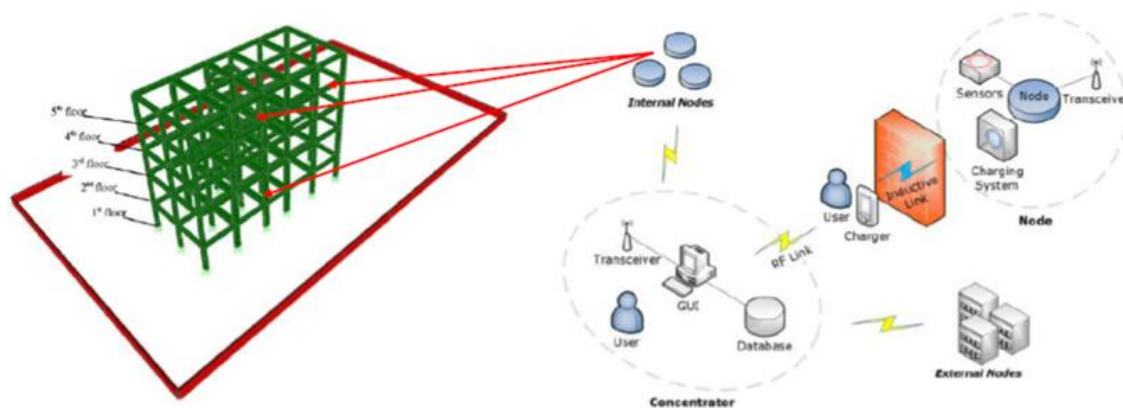


Figura 26 – Esempio di sistema SHM basato su paradigma IoT

2.5.4 Protocolli di comunicazione a breve e lungo raggio per il monitoraggio strutturale

A causa dell'ampia varietà di usi e della diversità delle funzionalità richieste per soddisfare un'applicazione, le tecnologie Internet of Things (IoT) stanno avanzando a un ritmo sostenuto per soddisfare questa domanda, cercando nel contempo di soddisfare il time-to-market di queste applicazioni. Le caratteristiche richieste dalle applicazioni, quali area di copertura, scalabilità, velocità di trasmissione dei dati e applicabilità, si riferiscono ai progetti di protocolli di livello fisico e MAC (Medium Access Control). Questo documento presenta uno studio approfondito dei protocolli di livello MAC (Medium Access Control) utilizzati nell'IoT con una descrizione dettagliata di tali protocolli raggruppati (per copertura a breve e lunga distanza). Per i protocolli di copertura a corto raggio, vengono considerati: Identificazione di radiofrequenza (RFID), Near Field Communication (NFC), Bluetooth IEEE 802.15.1, Bluetooth Low Energy, IEEE 802.15.4, Wireless Highway Addressable Remote Transducer Protocol (Wireless-HART), Z-Wave, Weightless e IEEE 802.11 a / b / g / n / ah. Per il gruppo a lungo raggio vengono studiati i protocolli Narrow Band IoT (NB-IoT), Long Term Evolution (LTE) CAT-0, LTE CAT-M, LTE CAT N, Long Range Protocol (LoRa) e SigFox. Viene eseguito uno studio comparativo per ciascun gruppo di protocolli al fine di fornire approfondimenti e uno studio di riferimento per le applicazioni IoT, considerando le loro caratteristiche, limitazioni e comportamento ai fini del monitoraggio strutturale. Per l'applicazione specifica è stata scelta una soluzione di comunicazione basata su LoRaWAN, e di conseguenza è stato definito, implementato e caratterizzato un metodo di misura per la verifica della qualità della trasmissione mediante approccio crosslayer. Inoltre, per la caratterizzazione del sistema di

comunicazione è stato definito, implementato e validato un metodo per la classificazione dei parametri di comunicazione.

La maggior parte delle funzionalità della tecnologia Internet of Things (IoT) sono definite dai protocolli utilizzati per progettare la tecnologia per applicazioni specifiche. Funzionalità come topologia di rete, consumo energetico, efficienza di potenza di trasmissione e ritardi sono questioni importanti nella definizione o nella scelta dell'uso di una certa tecnologia per una soluzione specifica. Oltre alle caratteristiche del livello di controllo di accesso medio (MAC), le sue funzioni principali possono essere citate come delimitazione dei vincoli dei frame, sincronizzazione dei frame, gestione di indirizzi di origine e di destinazione, rilevamento degli errori di trasmissione del supporto fisico e prevenzione delle collisioni. Tecniche di accesso medio, velocità dati, modalità di comunicazione tra dispositivi, gamma di trasmissione, consumo di energia e altri sono tutti esempi di caratteristiche derivate dallo sviluppo e dalla distribuzione di ciascun protocollo. Pertanto, lo studio dei protocolli di livello MAC può mostrare come progettare una soluzione tecnologica adatta per un'applicazione. In base alle proprie esigenze, le applicazioni IoT potrebbero richiedere l'adattamento dei protocolli di rete esistenti in modo che possano soddisfare i requisiti delle applicazioni IoT. Potrebbe essere necessario adattare, evolvere o sviluppare protocolli per soddisfare le applicazioni IoT che richiedono caratteristiche prestazionali diverse come tecniche di trasmissione a basso consumo, affidabili e robuste. In base alle esigenze, è possibile classificare e indicare i principali protocolli di livello MAC adatti a soddisfare una caratteristica di servizio. Le definizioni già esistenti come Wireless Body Area Networks (WBAN), Wireless Personal Area Networks (WPAN), Wireless Personal Area Networks (LR-WPAN) e Wireless Local Area Networks (WLAN) possono essere classificate come protocolli a breve distanza previsti con portata massima di 1 km. Mentre i protocolli WAN (Wide Area Networks) e le reti Wide Area Network (LP -WAN) a bassa potenza possono essere utilizzati come riferimenti per la classificazione a lungo raggio a causa di intervalli di oltre 1 km. I protocolli WAN sono comunemente progettati per contenuti utente e media. Alcune delle loro evoluzioni come Long Term Evolution (LTE) CAT-M hanno miglioramenti per supportare alcuni requisiti IoT come un minor consumo energetico. I protocolli LP-WAN sono arrivati a lungo raggio con un basso consumo energetico ma una velocità dati sufficiente per soddisfare i requisiti dei servizi IoT. Lo scopo di questo documento è di presentare uno studio approfondito dei protocolli di livello MAC a breve e lunga distanza utilizzati dalle soluzioni IoT, affrontando le caratteristiche del livello MAC che definiscono il comportamento e l'applicabilità di ciascun protocollo. Questo approccio pone confronti a livello MAC in diversi aspetti, tra cui copertura della distanza, velocità dei dati di trasmissione, efficienza di trasmissione, meccanismi di comunicazione, tecniche di controllo del livello MAC e PHY (fisico), sia in termini di utilizzo delle risorse che di efficienza dell'elaborazione dei pacchetti tra le altre

prestazioni metriche. Questo studio fornisce anche input per ottenere parametri di riferimento e di confronto nella progettazione o nella scelta di una tecnologia per servire meglio una determinata applicazione, con specifiche caratteristiche. Pertanto, nel dettaglio, nel seguito si riporta (i) una revisione approfondita dello stato dell'arte e classificazione dei protocolli di livello IoT MAC a breve e lunga distanza; (ii) uno studio comparativo dei protocolli considerando le loro specifiche e caratteristiche.

2.5.5 Protocolli Short-Range

I protocolli MAC (Medium Access Control) di copertura a corto raggio sono definiti dall'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) come Wireless Personal Area Networks (WPAN), che è la rete stabilita tra gli elementi che circondano il corpo umano. Le tecnologie di comunicazione WPAN differiscono dalle altre tecnologie di rete wireless convenzionali. Queste reti richiedono una facile connettività per raggiungere dispositivi personali indossabili o portatili. Inoltre, WPAN richiede efficienza energetica, dimensioni ridotte, basso costo e forse soprattutto dispositivi facili da usare. Le tecnologie a breve distanza come la Near Field Communication (NFC) e l'identificazione a radiofrequenza (RFID) sono tecnologie che si adattano a questo contesto di studio grazie al loro utilizzo con meccanismi differenziati per gli strati fisico e di collegamento. Pertanto, le loro caratteristiche sono meno critiche rispetto allo standard IEEE 802.15.6, dedicato alle reti wireless di area corporea (WBAN). Tali reti hanno scenari e prerequisiti diversi che sono molto diversi da quelli supportati dalle reti di cose. Le reti di sensori corporei hanno requisiti molto critici rispetto alle reti delle “cose” come i WBAN. Queste caratteristiche di rete dovrebbero raggiungere una latenza massima di 125 ms per le applicazioni mediche, non possono superare i 250 ms per essere utilizzate in applicazioni non mediche e il loro jitter deve essere inferiore a 50 ms. Basso consumo energetico, connessione automatica e disconnessione di nuovi elementi nella rete, tipologie miste, bassi costi generali e altre caratteristiche sono esempi di parametri critici elevati nei WBAN. Esistono tecnologie che utilizzano metodi differenziati per trattare i loro livelli PHY e MAC come reti mobili di evoluzione a lungo termine (LTE). Queste tecnologie offrono, tra le altre, tecniche differenziate di metodi per stabilire connessioni, controlli di comunicazione e controlli di accesso fisico. Pertanto, diventa difficile confrontare alcuni protocolli con lo standard offerto dal modello di riferimento di sistemi di interconnessione aperti (OSI). L'approccio del mezzo fisico e i metodi di creazione della connessione, i controlli di comunicazione e altri meccanismi sono dedicati a sistemi che non possono essere confrontati direttamente con l'OSI. Un'altra difficoltà nello stabilire un confronto equo con altri protocolli che seguono il modello di riferimento OSI è che questi protocolli sono, nella maggior parte delle applicazioni, dedicati alla comunicazione punto-punto o a grandi volumi di dati. Queste

caratteristiche li liberano dalla necessità di metodi di elaborazione delle connessioni più elaborati e di sistemi di controllo del trasferimento dei dati.

2.5.5.1 Radio Frequency Identification (RFID)

L'identificazione a radiofrequenza (RFID) si riferisce a un insieme di tecnologie volte a identificare e riconoscere elementi (tag). Un sistema RFID è sostanzialmente composto da due tipi di dispositivi: i dispositivi identificati (tag) e gli identificatori o i lettori del dispositivo. I dispositivi con tag vengono attivati dalle onde RF (radio frequenza) emesse dai dispositivi di lettura e rispondono ai tag di identificazione (ID). I lettori gestiscono lo scambio di dati tra di loro. Se necessario, i lettori inviano impulsi RF interrogando i tag nell'area. I tag rispondono a questa domanda inviando i loro ID tag. Diverse classificazioni dei sistemi RFID possono essere fornite in base alla frequenza operativa, all'interfaccia radio, al raggio di comunicazione, all'autonomia dei tag (completamente passivi, semi-passivi, attivi) e sono stati ratificati diversi standard. L'evoluzione dei tag RFID UHF (Ultra High Frequencies) intelligenti con sensori integrati e miniaturizzazione dei lettori promuove questa tecnologia per ecosistemi IoT pervasivi elevati. La Figura 27 presenta un breve riepilogo delle frequenze operative, del livello di potenza di trasmissione e dei commenti sulle normative europee.

I vari dispositivi identificati dalle radiofrequenze (RFID) come braccialetti, abbigliamento, calzature e altri sono una combinazione di un piccolo microchip e un'antenna integrata in un unico involucro identificato in modo univoco e identificato elettronicamente. Quando i lettori inviano il loro impulso di radiofrequenza per l'interrogazione, i tag trasmettono le informazioni di identificazione ai dispositivi del lettore utilizzando le radiofrequenze. Questa trasmissione avviene in base alla vicinanza del tag al dispositivo di lettura, anche se non ha linea di mira (LOS). L'intervallo di trasmissione dipenderà dalla classe del dispositivo utilizzato. Le trasmissioni avvengono dalle bande a bassa frequenza (LF) a 124-135 KHz a banda ad altissima frequenza (UHF). Esistono tre classi di dispositivi RFID come segue:

- PRAT: tag attivo per lettore passivo. Il lettore è passivo e riceve dati da un tag alimentato a batteria. Il raggio di trasmissione può arrivare fino a 500 m in base ad alcune caratteristiche del sistema e alla frequenza di trasmissione utilizzata.
- ARPT: tag passivo del lettore attivo. Il lettore è attivo e i tag identificati sono passivi e alimentati dall'energia raccolta dalle onde elettromagnetiche presenti nell'aria. In generale, questa fonte di alimentazione può essere un beacon trasmesso dal lettore per alimentare i tag e riceve nuovamente la trasmissione dei dati dei tag. Questa è la classe più comunemente usata.

- ARAT: tag attivo del lettore attivo. Questa classe è in cui sia il lettore che i tag sono alimentati da fonti di alimentazione esterne, ma i tag trasmettono i loro dati solo quando richiesto dai lettori.

Frequency band	Power	Comment
6785 – 6795 kHz	42 dB μ A/m @ 10 m	ITU ISM band
13.553 – 13.567 MHz	42 dB μ A/m @ 10 m	ITU ISM band
26.957 – 27.283 MHz	42 dB μ A/m	ITU ISM band
40.660 – 40.700 MHz	10 mW ERP	ITU ISM band
138.2 – 138.45 MHz	10 mW ERP	Only available in some states
433.050 – 434.790 MHz	10 mW ERP	< 10% duty cycle (ITU ISM band)
433.050 – 434.790 MHz	1 mW ERP	Up to 100% duty cycle (ITU ISM band)
434.040 – 434.790 MHz	10 mW ERP	Up to 100% duty cycle (ITU ISM band)
863.000 – 870.000 MHz	25 mW ERP	FHSS, DSSS Modulation, 0.1% duty cycle
868.000 – 868.600 MHz	25 mW ERP	< 1% duty cycle
868.700 – 869.200 MHz	25 mW ERP	< 0.1% duty cycle
869.400 – 869.650 MHz	500 mW ERP	< 10% duty cycle
869.700 – 870.000 MHz	5 mW ERP	Up to 100% duty cycle
2400 – 2483.5 MHz	10 mW ERP	ITU ISM band
5725 – 5875 MHz	25 mW ERP	ITU ISM band
24.00 – 24.25 GHz	100 mW	ITU ISM band
61.0 – 61.5 GHz	100 mW ERP	ITU ISM band
122 – 123 GHz	100 mW ERP	ITU ISM band
244 – 246 GHz	10 mW ERP	ITU ISM band

Figura 27 – RFID standard per applicazioni a distanza corta

Esiste una certa varietà di standard per i sistemi RFID. ISO (International Organization for Standardization) / IEC (International Electrotechnical Commission) 14443 sono le entità responsabili della definizione del comportamento e delle proprietà delle smart card. Lo standard definisce la nomenclatura del "dispositivo lettore" come Proximity Coupling Device (PCD) e Tag Identified (TI) o, "l'oggetto da identificare", è definito come Proximity Integrated Circuit Card (PICC). Uno degli standard di identificazione più comunemente utilizzati in questo caso è il codice prodotto elettronico (EPC) che contiene una struttura a 96 bit in un formato dati stringa. Questa struttura è composta da

otto bit iniziali che identificano la versione del protocollo seguita da 28 bit che rappresentano l'entità organizzativa che ha prodotto tale etichetta. I seguenti 24 bit identificano il tipo o la classe dell'elemento e i restanti 36 bit sono l'identificazione seriale univoca di ciascun elemento particolare. Questi ultimi due campi sono utilizzati dai fornitori per assegnare identità ai loro dispositivi. Informazioni differenziate come Uniform Resource Locator (URL) o qualche altro modello più attuale possono anche essere usate come identificatori purché soddisfino il formato standardizzato.

2.5.5.2 Near Field Communication (NFC)

Per le comunicazioni a corto raggio, la tecnologia NFC è importante poiché la sua massiccia adozione da parte dei venditori di dispositivi mobili ne ha reso popolare l'uso, rendendolo accessibile al pubblico per applicazioni come la lettura di etichette o persino lo scambio di dati peer-to-peer. I dispositivi coinvolti si scambiano informazioni tra loro come una modalità di connessione macchina-macchina. La standardizzazione di NFC è regolata dall'Organizzazione internazionale per la standardizzazione (ISO) e dalla Commissione elettrotecnica internazionale (IEC) e dal forum NFC. Near Field Communication è una tecnologia di trasmissione a corto raggio che utilizza collegamenti di trasmissione a bassa potenza che, diversamente dal Bluetooth, non richiedono l'associazione per la trasmissione. Avvicinare un dispositivo abbastanza vicino all'altro consente la comunicazione. Questa funzione obbliga l'utente del dispositivo a gestirlo durante l'uso. Poiché la struttura del dispositivo funziona solo con il proprietario, è un modo per garantire la sicurezza dell'utilizzo della tecnologia. Il suo funzionamento è paragonabile alla tecnologia RFID perché i dispositivi NFC possono agire sia da lettore che da tag. La comunicazione viene eseguita in modalità attiva o passiva, operando nella banda 13,56 MHz. Una distanza tipica da un altro dispositivo è di circa 0,2 m ed è sensibile ai campi vicini o persino al tocco, la sua velocità di trasmissione può raggiungere i 424 Kbps.

Nella comunicazione in modalità passiva, il dispositivo attivo avvia la connessione trasmettendo un'onda portante che attiva il dispositivo passivo. Pertanto, il dispositivo passivo si serve di questo vettore per modulare e trasmettere i suoi dati. Nella modalità di comunicazione attiva, sia il dispositivo di avvio della comunicazione che il dispositivo di destinazione comunicano generando le proprie onde portanti. Questi dispositivi devono essere alimentati da fonti di alimentazione esterne. I tag e i lettori NFC possono operare in tre diverse modalità: emulazione delle carte, lettore/scrittore e peer to peer (o punto a punto). Nella modalità di emulazione della scheda NFC, in genere il dispositivo attivo legge i tipi di tag del dispositivo passivo. Entrambi possono essere dispositivi attivi o passivi. Nella modalità Peer to Peer (Point to Point) NFC standardizzata secondo ISO / IEC 18092, due nodi sono collegati tra loro da una modalità peer to peer o ad hoc per scambiare dati. Il massiccio dispiegamento di NFC si unì all'uso dell'RFID come tecnologia complementare e, di conseguenza,

stanno diventando importanti soluzioni tecnologiche per macchine a pagamento, oggetti intelligenti, dispositivi indossabili intelligenti e molti altri dispositivi. Queste tecnologie sono comunemente utilizzate in applicazioni, come il tracciamento di oggetti e persone, per offrire informazioni e servizi personalizzati come nelle applicazioni di sanità elettronica. Questo scenario porta un nuovo concetto di "cosa" o socializzazione degli oggetti. In questo concetto, il legame tra l'oggetto portato e la persona che lo porta stabilisce una proprietà e una relazione uniche. Questa relazione è in grado di influenzare le decisioni nelle interazioni con l'ambiente umano e aumentare il livello di coscienza dell'oggetto. Sul livello fisico di NFC, le velocità dei dati di comunicazione RF sono 106, 212, 424 e 848 Kbps a seconda della combinazione di tecniche di modulazione e di codice utilizzate. Gli schemi di modulazione disponibili sono ASK (Amplitude Shift Keying) che utilizza la profondità di modulazione del 10% o 100%, vengono utilizzati i livelli di non ritorno a zero (NRZ-L), Binary Phase Shift Keying (BPSK) e Manchester o Modified Miller il trasferimento dei dati. L'Organizzazione internazionale per la standardizzazione (ISO), la Commissione elettrotecnica internazionale (IEC) e la Commissione federale delle comunicazioni (FCC) regolano la potenza di trasmissione a 20 o 23 dBm in base alla regione. Il livello MAC NFC è anche responsabile della gestione della connessione, dello scambio di messaggi, delle modalità di emulazione, della trasmissione dei bit anticollisione, delle procedure di attivazione, del trasporto dei dati e altro. In Figura 28, Figura 29, Figura 30 si illustrano queste funzionalità.

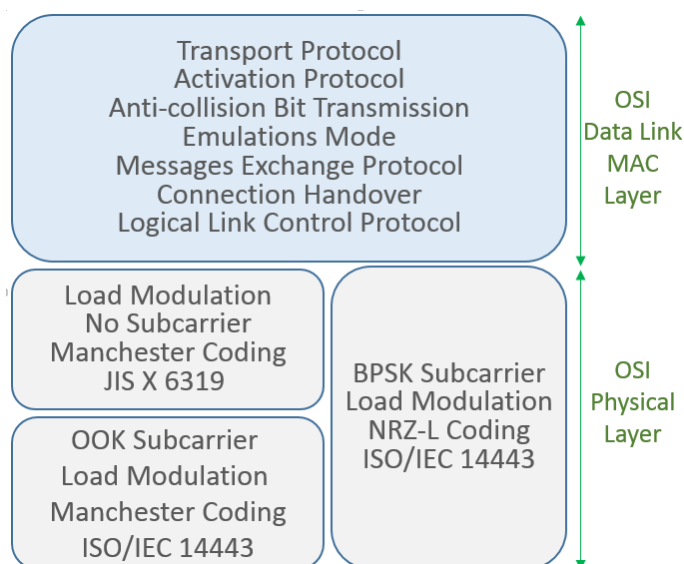


Figura 28 – Protocollo di comunicazione NFC attivo-passivo

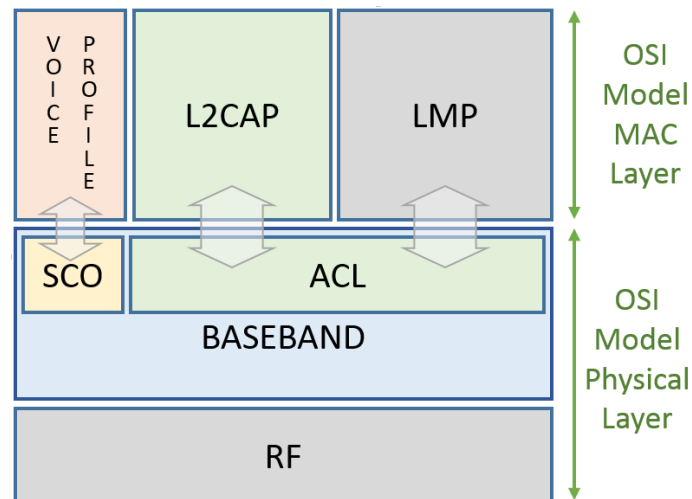


Figura 29 – Protocollo di comunicazione NFC attivo-passivo

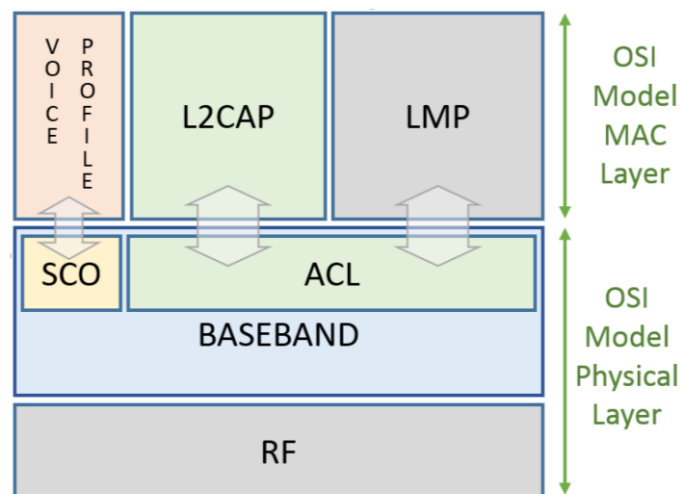


Figura 30 – Mapping del modello OSI di riferimento allo stack Bluetooth IEEE 802.15.1

2.5.5.3 Bluetooth IEEE 802.15.1

WPAN IEEE 802.15.1 chiamato anche Bluetooth Basic Rate (BR) è una specifica globale da 2,4 GHz che funziona con reti wireless a corto raggio. Copre le versioni v1.0, 1.0B con composizione vocale, silenziamento delle chiamate, ricomposizione dell'ultimo numero e una portata di 10 m come servizi principali e una v1.2 con l'hopping di frequenza adattivo aggiunto. Le versioni v2.0 + Enhanced Data Rate (EDR) e v2.1 + EDR hanno aggiunto ulteriori funzionalità come una migliore resistenza alle interferenze in radiofrequenza nonché un miglioramento della copertura interna e della portata LOS

a 100 m. Sono state aumentate anche le velocità di trasmissione elevate e i meccanismi a basso consumo energetico nelle versioni v2.0 + EDR e v2.1 + EDR. La versione v2.1 conta su una funzione di sottrazione sniff che si traduce in un minor numero di trasmissioni che accedono al supporto e quindi riducono le interferenze. L'evoluzione segue con la v3.0 che riceve un controllo avanzato della potenza per adattarsi rapidamente alla perdita di percorso mutevole delle nuove bande di frequenza di trasmissione a 5 GHz. La versione 4.0 ha aumentato l'indice di modulazione, risultando in meno energia utilizzata durante la trasmissione ma presentando comunque un certo consumo medio per completare il processo di ricezione. La versione 4.1 mostra un migliore allineamento sui tempi delle pico-reti quando la trasmissione subisce interferenze. Nella versione 4.2, la bassa energia è rafforzata dall'adozione di trasmissioni di pacchetti più lunghe. Ciò riduce la quantità di pacchetti trasmessi per la stessa dimensione di informazioni, usando una tecnica di estensione della lunghezza dei pacchetti. La versione attuale di Bluetooth v5.0 presenta alcuni miglioramenti relativi ai processi di trasmissione e ricezione. I miglioramenti di Bluetooth v5.0 includono la maschera di disponibilità degli slot, che consente l'allineamento della temporizzazione delle pico-reti con le bande LTE vicine, un aumento del guadagno di codifica, un aumento della frequenza dei simboli e un migliore algoritmo di selezione dei canali. Il livello IEEE 802.15.1 MAC è composto da Logical Link Control, il livello L2CAP (Adaptation Protocol), il livello LMP (Link Manager Protocol) e la banda Base o semplicemente il livello fisico. Il livello MAC Bluetooth gestisce i tipi di comunicazione che possono essere di comunicazione asincrona senza connessione (ACL) o orientata alla connessione sincrona (SCO). La Figura 4 mostra la relazione tra il modello Open Systems Interconnection (OSI), il modello a sette strati e lo standard IEEE 802.15.1. Il layer in banda base definito dallo standard IEEE 802.15.1 opera nella banda ISM (Industrial Scientific and Medical) a 2,4 GHz utilizzando un collegamento radio a corto raggio e un salto di frequenza rapido (FFH) ricetrasmittitore. I sottostrati Radio e Base-band definiscono il livello fisico Bluetooth. Il livello Radio fornisce i collegamenti fisici tra i dispositivi Bluetooth con 79 diverse frequenze radio (RF) canali distanziati di 1 MHz, utilizzando una tecnica di trasmissione dello spettro di diffusione a salto di frequenza (FHSS). Questa tecnica FHSS aumenta la robustezza del collegamento grazie alla sua capacità di ridurre l'interferenza dei sistemi vicini che possono operare nella stessa gamma di frequenza. A Time Division Duplex (TDD) lo schema di trasmissione è specificato per dividere il canale in intervalli di tempo di 625 μ s ciascuno, corrispondenti a una frequenza hop diversa, simulando la comunicazione full duplex nello stesso canale di trasmissione.

Il collegamento radio che raggiunge LOS fino a 100 m si ottiene utilizzando la potenza nominale in base alla sua classe di potenza e al sistema di irradiazione utilizzato. Tre classi di potenza in uscita dividono i dispositivi con protocollo Bluetooth Basis Rate. Ogni classe è caratterizzata da una potenza

massima e una potenza di uscita minima e, sulla base di questi valori, la distanza entro la quale il dispositivo può comunicare è definita in base all'elenco nella Figura 31.

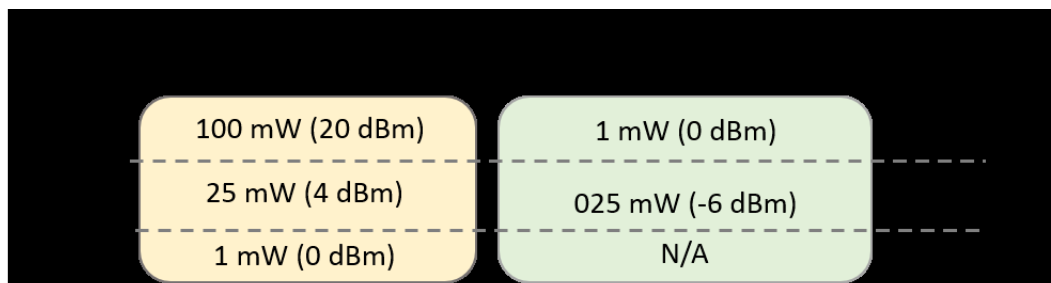


Figura 31 – Classificazione delle classi di potenza bluetooth

I ruoli principali del livello MAC Bluetooth sono quelli di impostare le connessioni fisiche tra master e slave; inviare e ricevere pacchetti lungo i canali fisici; sincronizzare i dispositivi di rete con l'orologio principale e gestire i diversi dispositivi per gli stati di risparmio energetico. In sintesi, le funzionalità della banda base sono sincronismo di clock, timer di gestione, dispositivi di indirizzamento e valutazione, gestione dei canali fisici, selezione di hop dei canali, supervisione dei collegamenti fisici, gestione dei trasporti logici, gestione dei collegamenti logici, bit di formattazione e ordinazione, elaborazione bit-stream, controllo degli errori, correzione degli errori, definizione degli schemi ARQ (Automatic Repeat Request), gestione delle operazioni del controller di collegamento, supporto per raccomandazioni audio generali, controllo del livello audio, percorsi audio, maschera di frequenza e altro. Un LMP (Link Management Protocol) è un protocollo di controllo responsabile di stabilire collegamenti a livello di banda base e fisici. Funzioni come la creazione e il rilascio di connessioni, tra le altre, sono le funzionalità di gestione dei collegamenti (LM) acquisite dall'utilizzo di LMP che gestisce un collegamento SCO (Synchronous-Oriented Connection) e un collegamento asincrono senza connessione (ACL). Un SCO è una connessione punto-punto simmetrica tra il master e uno slave specifico. Viene utilizzato per fornire traffico sensibile al ritardo, come il servizio vocale, e funziona come una connessione a commutazione di circuito tra il master e lo slave. Il collegamento ACL è un punto (master) a più punti (slave) in un dominio pico-net e funziona come una connessione a commutazione di pacchetto, che considera i dispositivi Bluetooth che supportano connessioni da punto a multi-punto. Per garantire l'integrità dei dati e garantire una consegna affidabile dei dati, ACL utilizza uno schema di richiesta di ripetizione automatica rapida. Il livello L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol) è un'astrazione basata su canale tra la banda di base e il livello

dell'applicazione di servizio. Il livello L2CAP gestisce la segmentazione e riassettaggio dei dati dell'applicazione e multiplexing e de-multiplexing di più canali su un collegamento logico condiviso. Il livello L2CAP è responsabile della gestione della regolazione delle dimensioni di unità di trasmissione massima (MTU) quando i dati del livello applicazione sono maggiori dell'MTU del livello di banda base. Il livello L2CAP può segmentare i dati dell'applicazione al fine di cogliere il massimo MTU trasmesso in base alla dimensione degli MTU ricevuti dall'applicazione. Questa funzione riduce il sovraccarico delle informazioni inviate in tal modo, migliorando l'efficienza. I dispositivi peer endpoint ricevono un Channel Identifier (CID) utilizzato per scopi di segnalazione associati ai suoi collegamenti, per la comunicazione di dati ACL e SCO tra dispositivi L2CAP. Alcuni CID sono riservati per il livello L2CAP come canale logico necessario per soddisfare gli standard Bluetooth ed è riservato a scopi di segnalazione. I canali senza connessione supportano la comunicazione "di gruppo" o multi-punto, mentre i canali orientati alla connessione sono dedicati solo alle connessioni peer-to-peer. La Figura 6 illustra la canalizzazione dei dati, i collegamenti e la struttura di trasporto.

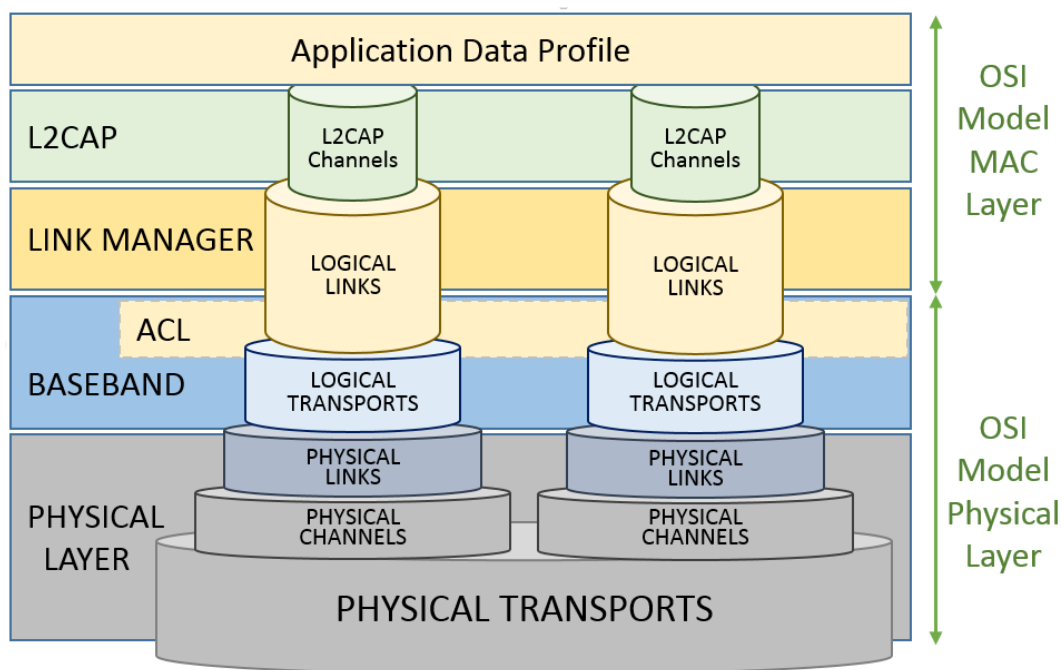


Figura 32 – Struttura bluetooth data link

Bluetooth si affida alle reti multi-accesso basate su token senza contesa come topologia logica. I dispositivi end point sono indicati come slave. Un cluster di un massimo di sette dispositivi slave può

essere collegato a un dispositivo master, al fine di avere accesso al canale, componendo una topologia cellulare pico-net. Il master è responsabile della gestione dei messaggi del processo di polling per autorizzare un dispositivo slave ad accedere al canale e a trasmetterne i dati. Queste caratteristiche aumentano la portata di oltre 100 m con un percorso LOS in un ambiente esterno che aumenta anche la sua portata dell'ambiente interno a circa 40 m. L'utilizzo dei *beacon* come meccanismi di rilevamento e la maggiore capacità dei messaggi di 255 byte migliora le prestazioni di comunicazione.

Le velocità dei dati hanno un valore teorico di 2 Mbps ma con una raccomandazione pratica di 1,6 Mbps. Una velocità di trasmissione dati pico-net può raggiungere fino a 1 Mbps, il che rappresenta la capacità del canale senza considerare il sovraccarico introdotto dalle tecniche di controllo degli accessi e dallo schema di polling adottati. Le aree di copertura delle pico-net possono essere sovrapposte formando una topologia a rete sparsa quando almeno un'unità scambia dati con più di un master. Ciò consente a uno slave di essere attivo in più di una rete pico contemporaneamente ma può essere gestito da un solo elemento master. Quando si utilizza una modalità multiplexing temporale, uno slave può comunicare con più di una pico-net ma solo in periodi di tempo diversi. Ciò è dovuto alla necessità di modificare i suoi parametri di sincronizzazione o di ascoltare canali diversi. Le dimensioni di una rete pico sono limitate a un solo master e fino a sette stazioni slave attive. Viene utilizzata anche la topologia ad hoc convenzionale.

2.5.5.4 Bluetooth Low Energy

Essendo parte dello standard Bluetooth v4.0 adottato il 30/06/2010, Bluetooth Low Energy (BLE) è anche noto come Smart Bluetooth. BLE è una variante IEEE 802.15.1 con capacità migliori e più adatte per applicazioni a bassa potenza rispetto alla classica Bluetooth Base Rate. I dispositivi che richiedono la comunicazione con entrambi gli standard Bluetooth sono necessari per implementare e supportare entrambi gli stack di protocollo a causa delle incompatibilità tra loro. Star è l'unica topologia accettata da BLE a causa della definizione standard che non consente connessioni di collegamento fisico tra dispositivi slave. Tutti i dati scambiati tra due dispositivi slave devono passare attraverso il master unico e un dispositivo slave non può essere collegato a due unità master contemporaneamente. Queste premesse definiscono la formazione di una pico-net a stella BLE. Utilizzando uno stack di protocollo simile al Bluetooth classico, le differenze tra loro iniziano sopra il livello L2CAP. Sopra il livello L2CAP vi sono una serie di funzionalità, che non sono presenti nelle classiche specifiche Bluetooth. Queste funzionalità sono Attribute Protocol (ATT), Generic Attribute Profile (GATT), Security Manager Protocol (SMP) e Generic Access Profile (GAP). La Figura 33 mostra lo stack del protocollo BLE. I due ruoli principali di BLE sono: controller e host. BLE differisce dal Bluetooth classico nello stack del controller che definisce i metodi di associazione dei

dispositivi. Uno slave può appartenere a una sola pico-net durante la vita di un'associazione ed è sincronizzato con un solo elemento master. Un'interfaccia controller host (HCI) è uno standard di comunicazione applicato tra lo slave e il controller. Nella frequenza di base Bluetooth, 79 canali vengono utilizzati con una larghezza di banda di 1 MHz per ridurre le interferenze con i canali adiacenti. In Bluetooth Low Energy, i canali sono definiti nella banda 2.400–2.4835 GHz con una banda di protezione di 2 MHz. Per ottenere la scalabilità, il dispositivo master controlla il numero di host associati ad esso regolando il valore dell'intervallo di connessione (parametro ConnInterval) tra host e controller.

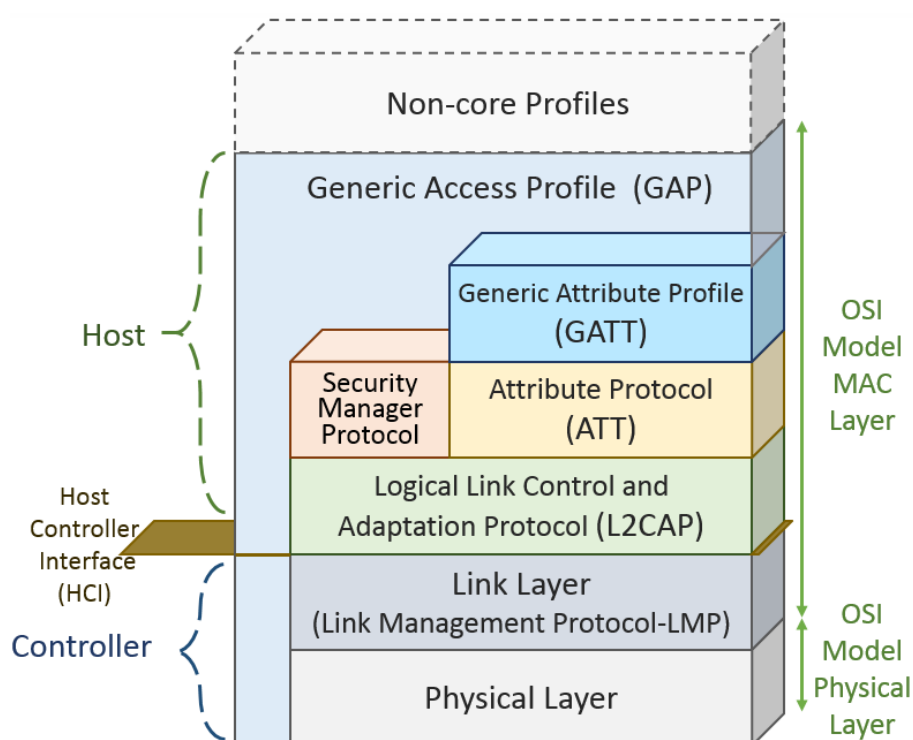


Figura 33 – Protocollo Stack BLE

Il livello di collegamento gestisce gli eventi generati dagli host, a intervalli di tempo determinati, utilizzando i canali pubblicitari. Il flusso di dati bidirezionale si ottiene con una connessione tra elementi, quando i pacchetti di *advertising* dello slave vengono ricevuti da elementi master. La gestione del risparmio energetico effettuata a livello MAC può mettere gli slave in modalità di sospensione per impostazione predefinita e riattivarli periodicamente attraverso uno schema TDMA (Time Division Multiple Access). Nel classico protocollo di base Bluetooth, questo livello viene utilizzato un meccanismo di controllo del flusso stop-wait per attendere capacità di recupero degli

errori. In BLE, L2CAP è un adattamento del classico stack di protocollo base Bluetooth ma ottimizzato e semplificato per ricevere i livelli di applicazione progettati per piattaforme a basso consumo energetico. Lo scambio di dati tra il livello applicazione e il livello collegamento viene effettuato anche da L2CAP senza l'utilizzo di tecniche di ritrasmissione o meccanismi di controllo del flusso utilizzati sul Bluetooth classico. Non utilizzando i meccanismi di ritrasmissione o controllo del flusso (presenti nel Bluetooth classico) e le funzionalità di segmentazione e riassemblaggio, il Packet Data Units (PDU) (limitate a 23 byte in BLE) ricevuto dal livello dell'applicazione viene consegnato per adattarsi alla dimensione massima del Payload L2CAP. Quando due dispositivi sono connessi in un'architettura di associazione server e client, il server deve mantenere un set di attributi. Attribute Protocol (ATT) gestisce gli attributi di questa connessione come la definizione della struttura di dati utilizzata per memorizzare le informazioni gestite dal Generic Attribute Profile (GATT) che funziona sopra ATT. GATT definisce le funzionalità client o server di una connessione e questa associazione è indipendente dai ruoli master o slave. Gli attributi del server devono essere accessibili dal client attraverso le richieste inviate, che attivano i messaggi di risposta del server. È anche possibile che un server invii a un client messaggi indesiderati come notifiche che non richiedono alcun messaggio di conferma per essere inviati dal client. È inoltre necessario un server per inviare messaggi di indicazione, che devono essere inviati dal client ai messaggi di conferma. Lo slave invia richieste di risposte e indicazioni prima della conferma delle transazioni seguendo uno schema di stop-wait. Gli slave possono scrivere i valori degli attributi sul master. Un framework definito da GATT svolge il ruolo di servizi di rilevamento utilizzando gli attributi ATT e consente lo scambio di caratteristiche tra dispositivi interconnessi. Un attributo porta un insieme di caratteristiche che include un valore e le proprietà del parametro monitorato dal dispositivo. Ad esempio, un sensore di umidità necessita di caratteristiche e attributi di umidità per descrivere questo sensore e memorizzarne le misurazioni. Pertanto, questo sensore necessita di un ulteriore attributo per specificare le unità di misura. La creazione di profili specifici con lo standard Bluetooth a bassa energia avviene nel GATT. Questo utilizza il protocollo Attribute Protocol (ATT) oltre ai protocolli stack inferiori, al fine di introdurre la suddivisione degli attributi del server conservati in servizi e funzionalità. I servizi possono contenere un set di funzionalità, che può includere un singolo valore (accessibile dal client) e altri dati numerici che descrivono tali funzionalità. Tra le assegnazioni delle specifiche del profilo GAP ci sono: diritti di ruolo del dispositivo, dispositivi e servizi di rilevamento, nonché stabilire connessioni e sicurezza. Un nuovo profilo basato sui requisiti di profilo esistenti può essere creato seguendo una gerarchia di profili. L'interoperabilità di diversi dispositivi può essere gestita attraverso i profili dell'applicazione. Il Bluetooth è progettato per offrire un'alternativa a basso costo al Wi-Fi a spese della gamma di trasmissione. La sua portata di trasmissione è notevolmente

più breve (fino a 100 m LOS) e la velocità dei dati non supera i 721,2 Kbps nella classica versione Bluetooth Basic Rate e può raggiungere i 3 Mbps con la funzione Enhanced Data Rate. BLE opera a una velocità di 1 Mbps sul suo livello fisico, mentre il suo livello di applicazione può gestire solo 236,7 Kbps. In Bluetooth Low Energy, non vi sono suddivisioni nelle classi di potenza ma sono forniti solo i valori di potenza di uscita massima e minima del trasmettitore. È possibile prevedere solo un valore approssimativo della distanza massima raggiungibile. La bassa potenza richiesta per la trasmissione è la caratteristica principale dello standard Bluetooth Low Energy e questo risultato è dovuto ai miglioramenti apportati alla versione classica. Questi miglioramenti includono una banda di frequenza ridotta e pacchetti PDU più brevi. Una valutazione energetica viene effettuata utilizzando le misurazioni di riferimento del consumo di chipset radio CC2640. Il confronto viene effettuato quando si opera su una potenza di trasmissione di 0 dBm raccogliendo le principali caratteristiche di Bluetooth e BLE. Bluetooth v5.0 non ha blocchi funzionali inclusi nel suo primo e secondo livello rispetto alle versioni v4.0, v4.1 e v4.2. Una rappresentazione della struttura di comunicazione tra i livelli e la relazione con i livelli Bluetooth di diverse versioni di Bluetooth può essere vista nella Figura 8. Trasferimenti di file da dispositivo a dispositivo, altoparlanti wireless, cuffie wireless e reti di sensori corporei sono spesso abilitati con le versioni Bluetooth. Infine, alcune caratteristiche delle tecnologie Bluetooth BR e BLE sono riassunte nella Figura 9. Questa figura consente il confronto delle loro differenze in base alle caratteristiche dei livelli PHY e MAC.

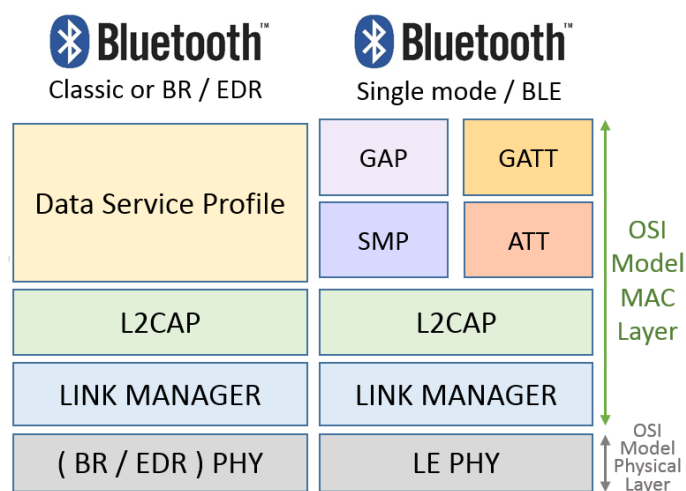


Figura 34 – Classificazione delle classi di potenza Bluetooth

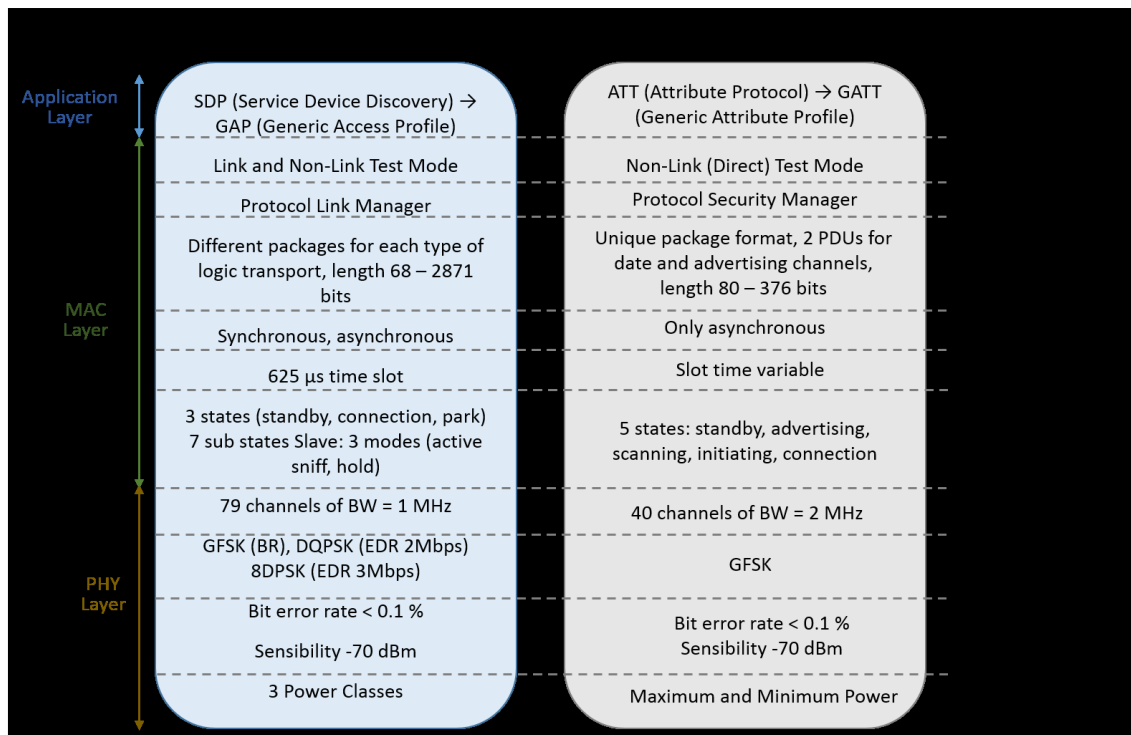


Figura 35 – Bluetooth Basic Rate vs Bluetooth Low Energy

2.5.5.5 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 è un sottogruppo di funzionalità che fa riferimento a livelli di controllo di accesso fisico e medio che possono supportare ZigBee e 6LoWPAN superiore. IEEE 802.15.4 si concentra sulle specifiche del livello fisico e del collegamento dati mentre ZigBee Alliance mira a fornire le caratteristiche superiori. È uno standard che definisce i livelli PHY e MAC per le reti personali che richiedono applicazioni a basso costo e bassa frequenza. Questo è anche chiamato protocollo LR-WPAN e presenta alcuni vantaggi. Tra questi ci sono uno stack di protocollo semplice e flessibile, a basso costo, basso consumo energetico, funzionamento a corto raggio, trasferimento dati affidabile e facilità d'uso. Queste funzioni sono più importanti quando si opera nello spazio operativo personale (POS) definito anche come rete personale (PAN) che coinvolge il corpo umano. Un indirizzo dispositivo IEEE 802.15.4 può essere un indirizzo breve a 16 o 64 bit. Inoltre, IEEE 802.15.4 utilizza una modalità di accesso DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) e opera su bande ISM a 2450 MHz, 915 MHz e 868 MHz che funzionano rispettivamente con 16 canali, 10 canali e un canale. I principali limiti delle interfacce radio che lavorano nella banda di frequenza ISM sono le dimensioni ridotte e le larghezze di banda strette. Di conseguenza, dimensioni ridotte e larghezze di banda ridotte causano una riduzione della trasmissione della potenza di uscita. Con queste caratteristiche dell'interfaccia radio, è possibile ottenere da 20 a 250 Kbps condivisi tra tutti i nodi usando lo stesso

canale. Il livello fisico fornisce un'interfaccia tra il servizio di dati fisici e il servizio di gestione PHY a cui si accede tramite i punti di accesso al servizio (SAP). Questo strato è anche responsabile per l'attivazione e la disattivazione del ricetrasmittitore radio, il rilevamento di energia (ED) all'interno del canale corrente, l'indicazione della qualità del collegamento (LQI) per i pacchetti ricevuti, la valutazione del CCA per l'accesso multiplo di rilevamento del vettore con prevenzione delle collisioni (CSMA-CA), selezione della frequenza del canale e trasmissione e ricezione dei dati. Gli aspetti di risparmio energetico dell'IEEE 802.15.4 sono principalmente indirizzati a questo livello dalle funzionalità ED, LQI e CCA. Secondo le specifiche del layer PHY e seguendo l'utilizzo dello spettro di ciascuna regione, le distanze tra i nodi basate su IEEE 802.15.4 possono arrivare fino a 100 m. Questa gamma dipende dagli ostacoli dell'ambiente di propagazione e dai livelli massimi di potenza di trasmissione definiti dallo standard IEEE 802.15.4, illustrato nella Figura 36. Il livello IEEE 802.15.4 MAC fornisce l'accesso al canale fisico per tutti i livelli superiori, fornendo due tipi di servizi: il servizio dati MAC e il servizio di gestione MAC. I dati MAC e la gestione MAC sono servizi forniti anche ad altri livelli che consentono loro di accedere alle risorse del livello PHY. Lo standard definisce due diversi metodi di accesso al canale che sono una modalità *beacon abilitata* (BE) e una modalità *non beacon abilitata* (NBE). Il sottostrato MAC, che è responsabile della gestione dei beacon, è anche responsabile dell'accesso ai canali, della gestione degli intervalli di tempo garantiti (GTS), della validazione dei frame, del riconoscimento dei frame consegnato e delle attività di associazione/dissociazione. Un controllo IEEE 802.2 Logical Link (LLC) può accedere al sottostrato MAC IEEE 802.15.4 tramite il sottostrato di convergenza specifico del servizio (SSCS). Il sottostrato di convergenza IEEE 802.2 SSCS esiste in una prospettiva concettuale, in cima al MCPS (sottostrato della parte comune MAC). SSCS fornisce un collegamento tra il sottostrato IEEE 802.2 LLC e IEEE 802.15.4 MCPS nel piano di servizio dati tramite MCPS-SAP (MCPS-Service Access Point). Sul piano di gestione, guidando le funzioni di gestione dei livelli, MMLE (entità di gestione del sottostrato MAC) fornisce le funzioni di servizio che assemblano la capacità attraverso un'interfaccia tra SSCS e PHY. MMLE è anche responsabile del mantenimento di una PIB (PAN Information Base) che contiene la base di dati degli oggetti gestiti appartenenti al sottostrato MAC.

Le modalità operative IEEE 802.15.4 BE e NBE sono state oggetto di indagini approfondite negli ultimi anni. Pertanto, sono state affrontate alcune limitazioni e le più importanti sono il ritardo illimitato, la bassa efficienza di comunicazione, la bassa robustezza dell'interferenza e dai nodi di relè alimentati. Il gruppo di attività IEEE 802.15.4 4e è stato noleggiato per definire un emendamento MAC allo standard 802.15.4-2006 al fine di evolvere e aggiungere importanti funzioni al protocollo MAC 802.15.4-206 per migliorare l'interazione tra funzionalità MAC e PHY. IEEE 802.15.4e supporta cinque nuove categorie di miglioramenti MAC chiamati anche comportamenti MAC: Time

Slotted Channel Hopping (TSCH), Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension (DSME), Low Latency Deterministic Network (LLDN), Asynchronous Multi-channel Adaptation (AMCA) e Radio Frequency Blink (BLINK). Alcuni miglioramenti generali sono stati inclusi come segue: Low Energy (LE), Information Elements (IE), Enhanced Beacons (EB), Multipurpose Frame, MAC Performance Metrics e Fast Association (FastA) meccanismo. La Figura 37 confronta lo stack IEEE 802.15.4 con il modello di riferimento OSI.

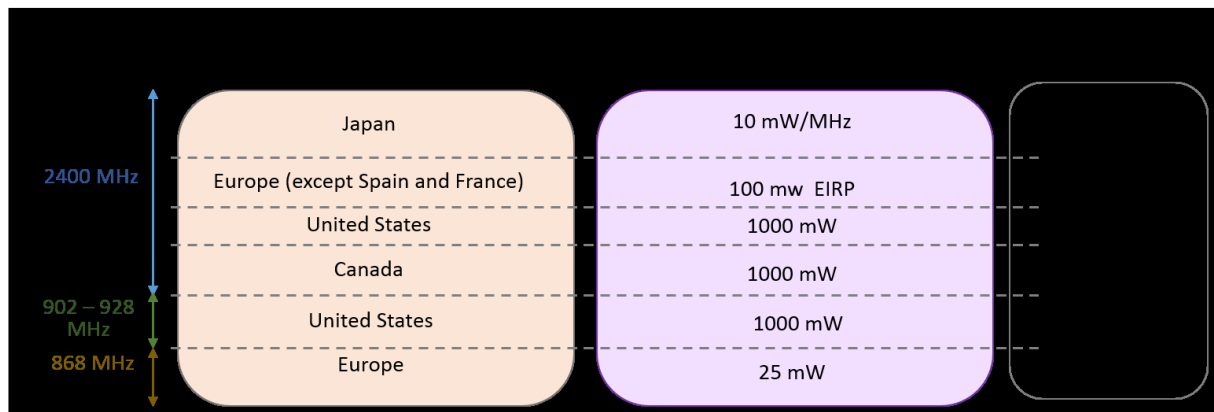


Figura 36 – IEEE 802.15.4 livelli di potenza in trasmissione massimi per regione

L'uso di reti di sensori multiuso diventa un ambiente di rete naturale con un focus su come ridurre l'implementazione dei costi operativi attraverso il riutilizzo delle risorse. Il traffico ordinario generato da applicazioni regolari come il monitoraggio ambientale non richiederà lo stesso trattamento della risposta al traffico richiesta per le applicazioni che utilizzano informazioni sensibili al tempo. Una coesistenza eterogenea del traffico, con requisiti di qualità del servizio diversi (QoS) non è gestita bene dall'IEEE 802.15.4. Un'opzione per migliorare la QoS è l'adozione di più code di trasmissione sia in 802.15.4 che in 802.15.4e considerando il livello di urgenza del diverso traffico. Questo processo separa il diverso traffico QoS in diverse classi e li gestisce su quattro code di trasporto con trattamenti differenziali. La mobilità può essere curabile con IEEE 802.15.4 ma difficilmente può degradare le prestazioni della rete e si verifica quando un dispositivo orfano che perde la sua associazione di coordinatori tenta di sincronizzarsi con i coordinatori di rete. Il terminale IEEE 802.15.4 utilizza il canale di trasmissione comune per cercare i coordinatori. Per quanto riguarda la topologia, i coordinatori che appartengono alla stessa identificazione della rete di area personale (PANId) sono collegati a un super coordinatore in grado di gestire la mobilità del dispositivo da un coordinatore all'altro. È importante sottolineare che, durante questa riassociazione, i dati di servizio

vengono interrotti. Alcuni autori hanno ampliato le loro visioni oltre i limiti IEEE 802.15.4 suggerendo la mobilità tra tecnologie. Ad esempio, per consentire a un nodo mobile di spostarsi attraverso le celle in una diversa rete del cluster. I coordinatori hanno connessioni wireless e cablate IEEE 802.15.4 per espandere il dominio della mobilità. Le prestazioni energetiche sono potenziate dal salto dei canali basato sul supporto multicanale. Lo sviluppo di IEEE 802.15.4 è un lavoro congiunto tra IEEE e ZigBee Alliance. Lo stack è costituito dai livelli uno e due dello standard IEEE 802.15.4 come base per altri protocolli come ZigBee stesso, 6LoWPAN, Thread e ISA100. A causa del fatto che questi protocolli sono derivati dai livelli IEEE 802.15.4 PHY e MAC, appartengono al livello di rete e sono fuori contesto per questo confronto.

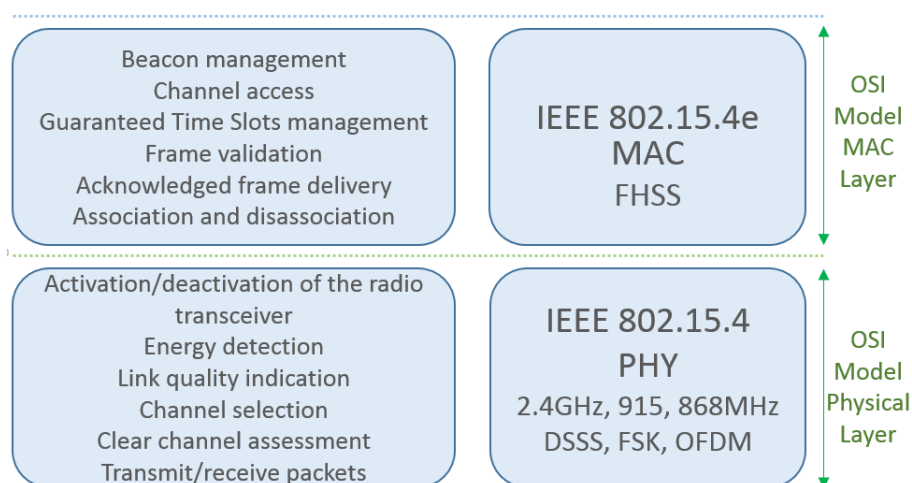


Figura 37 – Confronto tra il livello di riferimento OSI e IEEE 802.15.4

2.5.5.6 Wireless-HART

Wireless-HART (Highway Addressable Remote Transducer Protocol) è una variante del design IEEE 802.15.4 che funziona essenzialmente come una rete wireless centralizzata. IEEE 802.15.4 è progettato per soddisfare i requisiti delle applicazioni wireless industriali con restrizioni dei parametri di temporizzazione rigida, problemi di sicurezza critici e gravità delle interferenze agli ostacoli. Il protocollo Wireless-HART ha le stesse specifiche di IEEE 802.15.4 PHY, ma sviluppa il proprio livello MAC basato sulla tecnica TDMA. Utilizzando il Bluetooth, non vi è alcuna garanzia di ritardare i valori su una comunicazione wireless end-to-end. L'assenza di una tecnica di canali saltellanti e di una topologia Bluetooth a stella quasi statica si contrappone alla sua scalabilità. Queste caratteristiche li rendono inappropriati per essere utilizzati in scenari industriali. Wireless HART è

una soluzione per le applicazioni di controllo di processo attraverso lo sforzo di alcune organizzazioni industriali come International Society of Automation 100 (ISA 100), HART, Wireless Industrial Networking Alliance (WINA) e ZigBee Alliance per soddisfare i loro requisiti specifici ratificati dalla HART Communication Foundation nel 2007. Utilizzando lo strato IEEE 802.15.4 PHY, Wireless-HART opera nell'ISM senza licenza di 2,4-2,4835 GHz con una larghezza di banda di 2 MHz di ciascuno dei 16 canali. I canali sono numerati da 11 a 26 con uno spazio di 5 MHz tra i canali adiacenti IEEE 802.11b/g, offrendo fino a 250 Kbps. Wireless-HART utilizza il proprio accesso multiplex a divisione temporale (TDMA) sul livello MAC, comprese le funzioni di intervallo di tempo sincronizzato di 10 ms. Queste caratteristiche consentono il routing dei messaggi attraverso un ostacolo e un'interferenza di topologia di rete. Ciò è possibile grazie all'uso di tecniche di rete mesh auto-organizzanti e autorigeneranti supportate dal livello di rete. Pur essendo essenzialmente una rete wireless centralizzata, Wireless-HART utilizza un gestore di rete nel suo stack per fornire programmi di routing e comunicazione. Ciò può garantire prestazioni di rete e soddisfare le applicazioni industriali wireless. Il focus di Wireless-HART è la comunicazione a un livello hop e il livello di rete ha la sua responsabilità per l'allocazione di prossimità dei dispositivi di rete. A differenza di IEEE 802.15.4, Wireless-HART utilizza la tecnica TDMA sincronizzata nel tempo combinata con il salto di frequenza sul suo livello MAC, consentendo così a più dispositivi di trasmettere dati contemporaneamente su canali diversi. Durante il processo di unione dei dispositivi sulle reti, il gestore della rete distribuisce i collegamenti di comunicazione e i modelli di hop dei canali ai dispositivi. Gestisce anche l'abilitazione o la disabilitazione dell'uso di canali che sono frequentemente interessati da notevoli livelli di interferenza, chiamando questa lista nera dei canali di funzionalità, wHart-n-802-15-4e, [petersen2011wirelesshart](#). Gli otto tipi di dispositivi definiti su Wireless-HART sono: router, gateway, adattatori, gestori di rete, dispositivi di sicurezza di rete, punti di accesso e dispositivi di campo su una topologia mesh. Tutti supportano l'implementazione di funzionalità per la creazione della rete, problemi di manutenzione, capacità di routing di dati e segnalazioni e un minimo di affidabilità. Un confronto tra il modello di riferimento OSI e i livelli del protocollo Wireless-HART e relativi le caratteristiche principali sono mostrate nella Figura 38.

Un'altra caratteristica di Wireless-HART sono i blocchi di informazioni che ciascun dispositivo di rete mantiene nella sua memoria. Le informazioni dei nodi vicini e il successivo dispositivo raggiungibile sono chiamati blocchi di informazioni vicini. La connessione con il livello di rete viene stabilita tramite le informazioni sul blocco, aggiungendo dati alla tabella di routing del livello di rete. Lavorando con TDMA come tecnica di accesso medio, i dispositivi di rete hanno requisiti di temporizzazione molto rigorosi per realizzare i locali di sincronizzazione della rete. Ciò accade perché la sincronizzazione si verifica sia nel processo di unione che nelle normali operazioni.

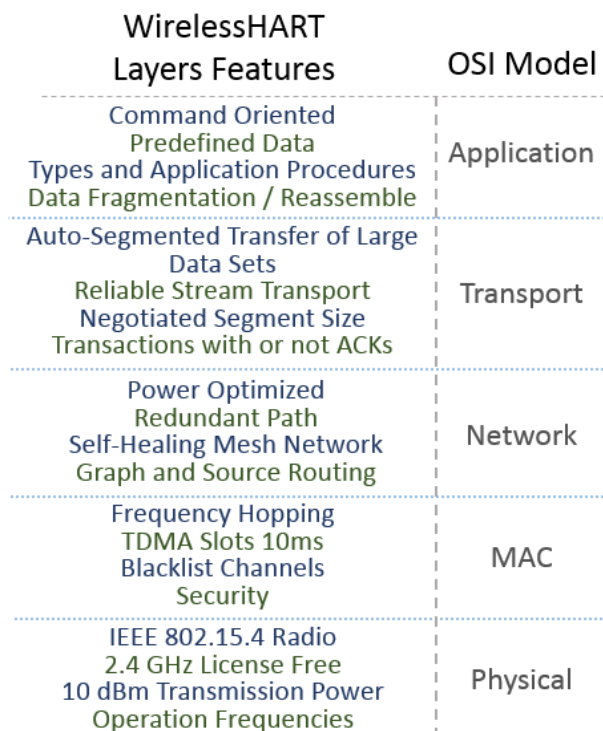


Figura 38 – Stack del protocollo WirelessHART

2.5.5.7 Z-Wave

Z-Wave è stato sviluppato ed è supervisionato dalla società Zensys per fornire comunicazioni wireless tra dispositivi con particolare attenzione all'automazione residenziale. Il monitoraggio e il controllo dell'illuminazione, della temperatura ambiente e della sicurezza tramite sensori e attuatori tramite tablet, smartphone o computer sono alcune delle sue applicazioni. I dispositivi Z-Wave sono disposti in topologia di rete mesh. Possono inviare e ricevere messaggi da qualsiasi dispositivo connesso alla rete. Il protocollo è uno standard proprietario basato sulla specifica ITU G.9959 che opera nella banda di radiofrequenza industriale, scientifica e medica (ISM). L'onda Z trasmette su frequenze 868,42 MHz (Europa) e 908,42 MHz (Stati Uniti) lavorando con modulazioni FSK e Gaussian Fase Shift Keying (GFSK). Con basse velocità di trasmissione di 9,6 Kbps, 40 Kbps e 100 Kbps, utilizza la crittografia AES-128 simmetrica. Il livello MAC utilizza la tecnica CSMA-CA per un accesso di controllo e, basato su ITU G.9959, presenta le seguenti caratteristiche: una capacità di 232 identificatori di rete univoci che consente la stessa quantità di nodi che rallegrano la rete; meccanismo di prevenzione delle collisioni; tempo di recupero in caso di collisione; affidabilità garantita dalla ricezione di riconoscimenti; meccanismi di validazione e ritrasmissione dei frame. Un meccanismo di risparmio energetico è ottenuto grazie a una modalità di sospensione con un modello di sveglia dedicato. La Figura 39 mostra lo stack del protocollo Z-Wave.

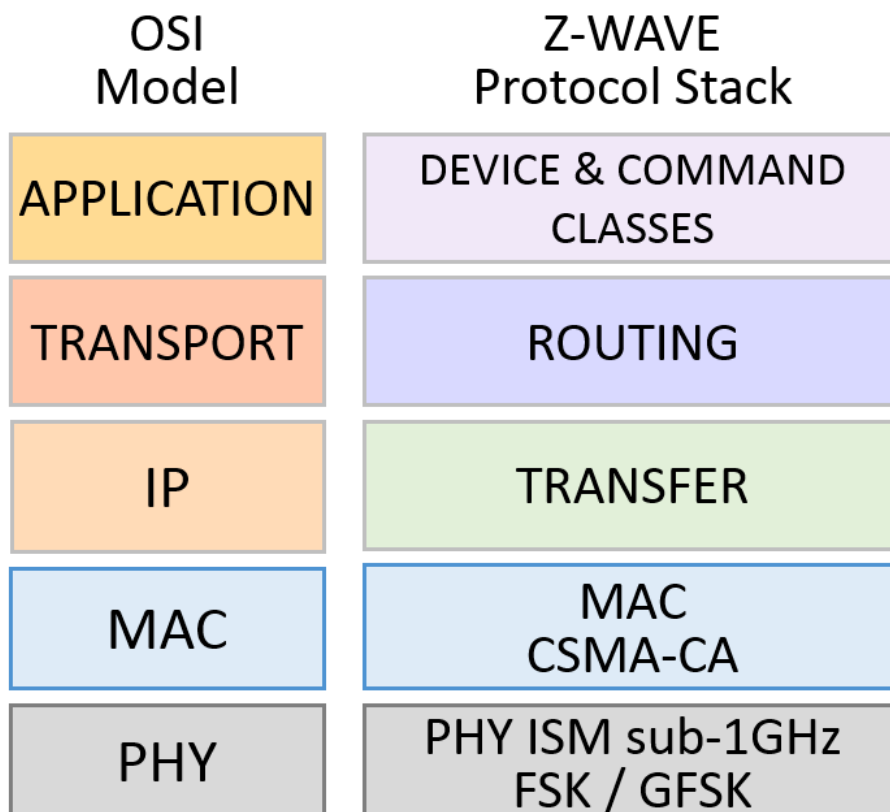


Figura 39 – Stack del protocollo Z-Wave

Le classi di dispositivi base Z-Wave sono le seguenti: Controller portatile, Controller statico, Slave e Slave con funzionalità di routing. Classi diverse forniscono al dispositivo un determinato ruolo nella rete Z-Wave. All'interno di una classe di base, le classi di dispositivi generici e specifici vengono utilizzate per ottenere la funzionalità desiderata nella rete di controllo. Nel protocollo Z-Wave, l'identificazione univoca dei dispositivi viene utilizzata tramite un ID a 32 bit. Questo valore ID non può essere modificato poiché è scritto nel chipset del dispositivo dal produttore del dispositivo. Una rete Z-Wave ha un solo dispositivo di controllo primario alla volta. Ciascuno dei 232 nodi di questa rete può anche essere un ripetitore per l'inoltro dei dati ai vicini, mediando una connessione. I nodi alimentati a batteria non godono di questa funzione. In un ambiente con un certo livello di deriva del dispositivo o anche quando un dispositivo viene rimosso dalla rete per qualche motivo, la topologia della rete potrebbe cambiare. La modifica della topologia di rete può causare problemi nell'inoltro dei pacchetti e nell'instradamento dei pacchetti nella rete. Per ridurre al minimo questo effetto, le tabelle di routing devono essere aggiornate, ottimizzate e deve essere rilevata qualsiasi nuova topologia; Z-Wave supporta la scoperta e l'idoneità della nuova topologia di rete. Ciò è possibile mantenendo la

tabella di routing aggiornata su ciascun dispositivo e mostrando tutti i dispositivi vicini. Quando un nodo cambia posizione o viene rimosso dalla rete, un errore di topologia può avviare una topologia automatica e una procedura di correzione per rilevare la nuova topologia e definire i percorsi migliori per aggiornare le tabelle di routing. Questo meccanismo è soggetto a modifiche non autorizzate degli attacchi alle tabelle di routing da parte di nodi rogue. Le funzioni di gestione del livello di trasferimento (o trasporto) sono: comunicazione tra due nodi vicini, riconoscimento dei pacchetti, nodi di rete a basso consumo attivi (Beaming) e autenticazione dell'origine dei pacchetti. Questo livello controlla i frame Beam utilizzati per riattivare i dispositivi Z-Wave alimentati a batteria, poiché ciascun dispositivo controller principale di un cluster può gestire fino a 232 nodi. Tutti i nodi possono fungere da ripetitore di pacchetti, ad eccezione dei dispositivi alimentati a batteria. Questa è la topologia della mesh Z-Wave formata. La sicurezza dei dati Z-Wave si basa su AES e sul codice di autenticazione dei messaggi concatenati del blocco di cifratura (CBC-MAC). Tuttavia, mancano gli standard e le regole per le classi di comando, i tipi di dispositivo e i timer. Queste caratteristiche sono acquisite solo nel nuovo framework di sicurezza avanzata (S2) determinato dalla Z-Wave Alliance e sviluppato in collaborazione con la comunità della sicurezza informatica. Per la certificazione di nuovi prodotti a partire dal 2017, Z-Wave offre ai dispositivi un livello di sicurezza più elevato. La struttura di S2 si basa sulla protezione dei dispositivi già associati alla rete, quindi non vengono hackerati mentre sono ancora connessi alla rete. Una volta che il dispositivo è già stato associato alla rete tramite il suo codice PIN o QR (risposta rapida), c'è uno scambio di chiavi di sicurezza attraverso l'algoritmo Elliptic Curve Diffie-Hellman (ECDH).

2.5.5.8 Weightless

Weightless è il nome di un insieme di protocolli LP-WAN per reti di comunicazione wireless con basse velocità di trasmissione. In questo set, Weightless ha le varianti Weightless-P, Weightless-N e Weightless-W. Queste tecnologie sono standardizzate dal Weightless Special Interest Group (Weightless SIG). La rete Weightless è un tipico sistema di topologia a stella composto dai dispositivi terminali (ED) e dalle stazioni base (BS). Gli ED sono i nodi del sensore o sono anche chiamati nodi foglia e le stazioni base (BS) concentrano la comunicazione con gli ED. L'interconnessione con le stazioni base costituisce le reti delle stazioni base (BSN) che, tra le altre cose, gestisce le strutture del sistema come l'autenticazione, il roaming e l'allocazione e la programmazione delle risorse radio. Il livello fisico del protocollo Weightless ha una variante per velocità dati elevate e un'altra per velocità dati basse. In entrambi i casi, i blocchi funzionali che compongono il livello fisico per il downlink sono la codifica Forward Error Correction (FEC), interleaving, whitening, Phase Shift Keying (PSK) / Quadrature Amplitude Modulation (QAM), tipi di modulazione, spreading factor, prefisso ciclico Inserimento, sincronizzazione e Root Raised Cosine (RRC). La combinazione del tipo di

modulazione, delle velocità FEC e dei parametri del fattore di spread utilizzati influisce sulla velocità di trasmissione finale. Questa velocità di trasmissione può variare da 125 Kbps a 16 Mbps. La velocità dei dati di 125 Kbps è attraverso una modulazione di $(p/2)$ BPSK con una frequenza FEC e scattering spettrale. Inoltre, si ottiene 16 Mbps quando la modulazione utilizzata è 16-QAM senza l'uso del meccanismo FEC e il fattore di scattering spettrale è ridotto. A seconda della disponibilità del modulo encoder FEC, il modulo interleaving può essere presente o meno. Quando presente, il blocco interleaving offre una diversità temporale e aumenta la robustezza del processo aggiungendo un guadagno di elaborazione. Il modulo sbiancante utilizza una sequenza casuale nota per rimescolare il flusso di bit trasformandolo in un pseudo rumore bianco e aumentando le prestazioni di sincronizzazione del ricevitore. Un modulo di diffusione è necessario per diffondere i dati modulati che ricevono un inserimento di prefisso ciclico, al fine di ridurre gli effetti di trasmissione multi-percorso. Questa caratteristica regola la conversione del frame dal dominio del tempo al dominio della frequenza. Il modello di sincronizzazione necessario per ricevere i processi viene quindi inserito dal modulo di inserimento della sincronizzazione. La modellazione di impulsi RRC funge da filtro digitale per ridurre la radiazione che supera la banda di radiofrequenza di trasmissione. Nel processo di ricezione, sono necessari moduli aggiunti per aumentare la stima e la correzione dell'offset temporale. È necessario scoprire l'inizio del burst, la stima e la correzione dell'offset della frequenza fine, la stima del canale, l'equalizzazione e il rilevamento della temporizzazione per determinare la posizione iniziale del carico utile. Come molti altri sistemi, Weightless utilizza i canali per scambiare dati tra i livelli di protocollo. Sono classificati in base al loro ruolo di canali di controllo, canali di trasporto di canali logici e canali fisici. Per consentire lo scambio di dati in banda base, il livello fisico (PHY) ha tre canali fisici. Sono chiamati canale downlink, canale uplink e canale di accesso conteso uplink. Per trasmettere dati dalla stazione base a uno o più ED, viene utilizzato il canale downlink. Per la comunicazione verso monte, da un ED al punto di accesso, viene utilizzato il canale verso monte. Il canale fisico di accesso conteso uplink viene anche utilizzato per trasmettere dati dai dispositivi terminali alla stazione base. Questo canale è conteso dai dispositivi terminali e diversi ED possono trasmettere contemporaneamente usando questo canale. Un sottostrato in banda base (BB) è responsabile della fornitura dei canali di trasporto per il trasporto dei dati verso o dal Link Layer (LL). Questo viene fatto collegando i canali di trasporto ai canali fisici di PHY. Tra le operazioni svolte da BB vi sono l'identificazione di allocazioni strutturate all'interno di una struttura di trama e la trasmissione di trama in entrambe le direzioni di uplink e downlink, usando canali fisici appropriati. La procedura di accesso conteso (CA) è anche controllata da BB mediante il canale fisico di accesso conteso uplink. La comunicazione tra LL e BB viene effettuata da un insieme di canali di trasporto e i suoi canali sono definiti in base al tipo di informazioni di indirizzamento utilizzate. Il collegamento

di canali logici ai canali di trasporto BB è LL. LL è anche responsabile del controllo della ritrasmissione, dell'affidabilità dei canali logici e della frammentazione e riassettaggio dei dati. Questi processi possono essere riconosciuti o meno.

Questi processi possono essere riconosciuti o meno. La LL esegue i processi di multiplexing e demultiplexing dei canali di trasporto in controllo logico o canali dati utente. Pertanto, LL fornisce tali canali logici per consentire i dati o controllare il traffico tra i dispositivi finali e il BS o un BSN attraverso un riconosciuto e affidabile o un non riconosciuto e inaffidabile flusso di pacchetti. Radio Resource Manager (RRM) è presente per controllare il traffico tra un ED e la sua BS attraverso i canali di controllo, utilizzando la sicurezza appropriata fornita da LL. I messaggi che controllano e mantengono la connessione tra ED e BS durante la comunicazione tra loro, sono gestiti da RRM attraverso i canali di controllo. RRM fornisce anche un flusso di messaggi di controllo solo downlink inviato da BSN, al fine di mantenere il collegamento tra ED e BS. Un esempio di stack leggero può essere visto in Figura 40.

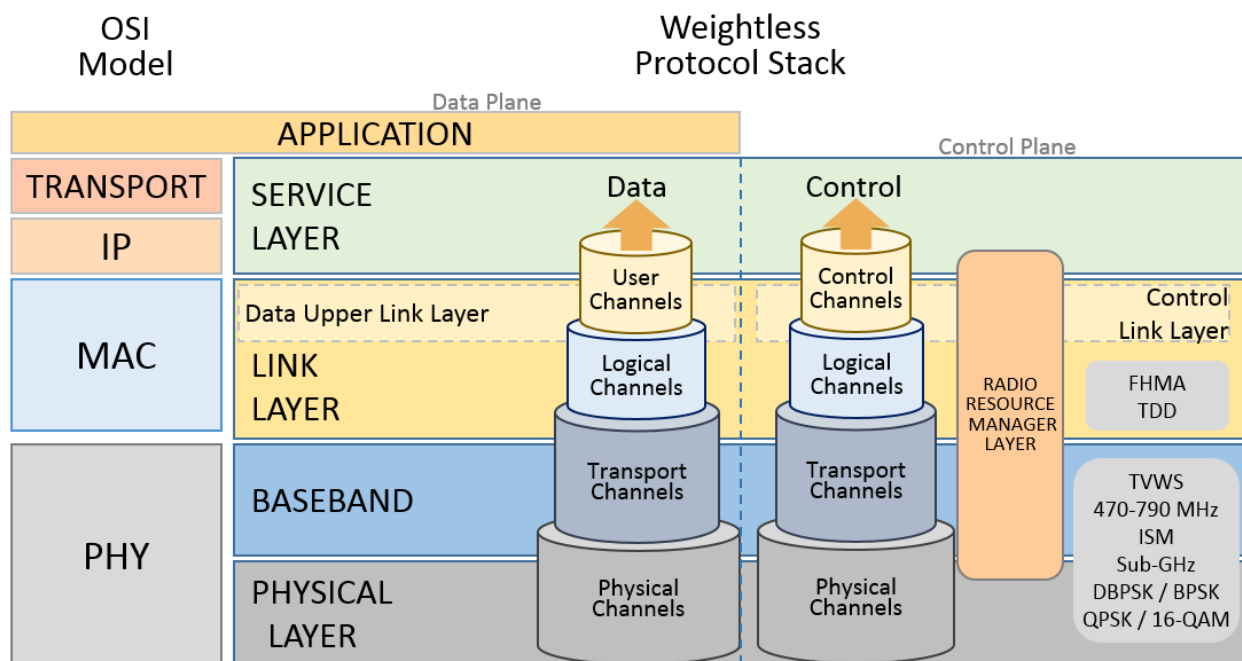


Figura 40 – Stack del protocollo Weightless

I dati sul payload sono condotti da un ED e dai suoi BS attraverso canali utente che forniscono canali specifici per dati unicast, dati multicast, dati di interruzione e dati di riconoscimento. Mentre il canale dati utente unicast è un canale bidirezionale tra ED e BS, il canale dati multicast è un canale solo

downlink. Il canale dati utente multicast è un canale solo uplink. Weightless-W è una tecnologia di comunicazione bidirezionale che funziona su uno spettro televisivo White Space (TVWS) da 470 a 790 MHz. Il suo meccanismo ad accesso multiplo utilizza il salto di frequenza (Frequency Hopping Multiple Access — FHMA) con Time Division Duplexing (TDD). Ciò può separare e coordinare gli intervalli di trasmissione di uplink e downlink. Le velocità di trasmissione dati vanno da 1 Kbps a 10 Mb / se la durata della batteria varia da tre a cinque anni a seconda dell'utilizzo. Questa tecnologia supporta la topologia a stella e la crittografia AES a 128 bit nei suoi pacchetti. I pacchetti possono contenere fino a 10 byte di payload, ma la crittografia può essere implementata end-to-end in base ad altri meccanismi, come il core della rete. Il sistema di correzione degli errori si basa su un algoritmo Forward Error Control (FEC) non specificato dal produttore. La canalizzazione viene eseguita con 16-24 canali con larghezza di banda di 5 MHz, a seconda della frequenza d'uso. La modulazione dei canali è adattiva e può raggiungere frequenze elevate a brevi distanze in base alle esigenze dell'applicazione. La modulazione può iniziare con il Differential Phase Shift Keying (DBPSK) e BPSK per distanze maggiori. Frequenze più basse da 1 Kbps utilizzano la quadratura con spostamento di fase quadratura (QPSK) o 16-QAM, raggiungendo picchi di 10 Mbps su brevi distanze.

Weightless-N si basa sullo standard Weightless-W ed è adattato per distanze minori e consumi energetici inferiori (le batterie durano fino a 10 anni), sacrificando la velocità di trasmissione da 30 a 100 Kbps. Weightless-N non raggiunge i picchi di velocità dati che può raggiungere Weightless-W. A differenza di Weightless-W, Weightless-N si basa su un sistema Ultra Narrow Band (UNB) e opera sulla frequenza UHF nella banda ISM 800-900 MHz, fornendo solo comunicazioni uplink. Questo sistema supporta la topologia a stella e applica la modulazione UNB DBPSK (Differential Phase Shift Keying) a canali a banda larga ultra-sottili a 200 Hz. Con questa modulazione più semplice, DBPSK, il dispositivo può risparmiare energia facendo durare la batteria fino a 10 anni.

A differenza di W e N, lo standard Weightless-P non richiede un oscillatore a cristalli compensato in temperatura (TCXO), che rende il sistema più economico e meno vulnerabile alla perdita di sincronizzazione a causa della variazione della temperatura ambiente. Questa caratteristica è possibile solo perché utilizza la modulazione Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) e una modulazione offset-QPSK.

La capacità della tecnologia Weightless-P è stata misurata in modo comparativo con la capacità di diverse tecnologie ad accesso multiplo. La potenza di trasmissione è impostata per una popolazione definita di dispositivi.

Il flusso massimo per ciascun meccanismo di accesso multiplo consente 1404 bps per UNB, 93 bps per spettro diffuso e 4923 per NB (banda stretta).

2.5.5.9 IEEE 802.11 a/b/g/n/ah

Certamente, uno degli standard più discussi e sfruttati nelle sue funzionalità e applicazioni è IEEE 802.11. Il suo design ha come impulso la richiesta di elevate velocità di trasferimento dei dati. Standardizzata dall'IEEE come protocollo per WLAN, la sua tecnologia si è evoluta per soddisfare esigenze sempre più specifiche. Questa evoluzione ha avviato un gruppo di standard IEEE 802.11 che sono stati uniti e denominato Wireless Fidelity (Wi-Fi). Questo gruppo è la Wi-Fi Alliance che certifica i prodotti Wi-Fi. Al fine di garantire che i prodotti Wi-Fi soddisfino gli standard, questa struttura è stata denominata Toolbox del sistema WLAN che garantisce la compatibilità dei prodotti di mercato nei parametri del livello PHY. Inoltre, contribuisce allo sfruttamento delle diverse implementazioni regionali, contribuendo così all'evoluzione del protocollo. Lo standard definisce che i dispositivi di comunicazione sono indicati come stazioni (STA) e possono comportarsi in modo indipendente. La comunicazione avviene direttamente tra i due dispositivi formando una topologia ad hoc. La topologia a stella si verifica quando un determinato STA è definito come il punto di concentrazione del traffico di altri STA, diventando un punto di accesso (AP).

Un STA-AP ha un'area di copertura definita chiamata Basic Service Area (BSA) che gli consente di associarsi a più STA, formando un Basic Service Set (BSS). L'STA-AP è in genere connesso a Internet o a una rete WAN tramite una connessione cablata. È anche possibile avere un sistema distribuito (DS) che collega i vari STA-AP della stessa LAN formando un'infrastruttura di *backbone* di trasporto chiamata Extended Service Set (ESS).

Lo stack del protocollo IEEE 802.11 segue il modello di riferimento OSI sui suoi livelli PHY e MAC. Mentre l'IEEE si concentra sulla definizione dei livelli PHY e MAC del protocollo come un contesto raggruppato, Wi-Fi Alliance mira a lavorare sul livello fisico per facilitare le comunicazioni peer-to-peer. Lo standard IEEE 802.11 si è evoluto dalla sua prima versione nel 1997. Lo strato PHY si è evoluto per funzionare sulle bande di frequenza ISM da 2,4 GHz e 5 GHz con spettro di diffusione a sequenza diretta (DSSS) e multiplexing a divisione di frequenza ortogonale (OFDM). La canalizzazione è stata segmentata da 20 MHz per IEEE 802.11 fino a 40 MHz per IEEE 802.11 n. La tecnologia multiforme di trasmissione del fascio migliora i parametri di trasmissione e ricezione e, di conseguenza, le velocità di trasmissione con valori maggiori da 2 Mbps su IEEE 802.11 fino a 600 Mbps per IEEE 802.11 n.

Anche il livello MAC ha dovuto adattarsi a questa evoluzione. Il livello MAC di IEEE 802.11 ha come principale differenziale il meccanismo di accesso al rilevamento multiplo da parte del corriere con prevenzione delle collisioni (CSMA / CA) come metodo di accesso medio. IEEE 802.11 adotta funzionalità quali riconoscimenti a livello MAC, frammentazione e riassettaggio, gap tra frame e algoritmo di back-off esponenziale, roaming, sincronismo, sicurezza e meccanismi di risparmio energetico. Queste tecniche garantiscono la comunicazione in una banda di frequenza con molto inquinamento spettrale. L'802.11a opera sulla banda 5 GHz, con 52 multiplexing a divisione di frequenza ortogonale (OFDM) che raggiunge meno di 54 Mbps. La sua velocità di trasmissione è frammentata su 48, 36, 24, 18, 12, 9 o 6 Mbps. Poiché la banda a 2,4 GHz è più comune e presenta un maggiore inquinamento spettrale, la banda a 5 GHz offre un vantaggio rispetto allo standard IEEE 802.11a, a causa della bassa interferenza dello spettro. I dispositivi che utilizzano IEEE 802.11a hanno prestazioni di trasmissione basse rispetto a IEEE 802.11b quando si affrontano ostacoli.

La revisione dello standard originale IEEE 802.11b è stata ratificata nel 1999 con una velocità di trasmissione massima di 11 Mbps e utilizza lo stesso metodo di accesso CSMA / CA definito nello standard originale. Standard IEEE 802.11b utilizza lo stesso 2,4 GHz, operando ad una velocità teorica massima di 54 Mbps.

Con l'emergere delle comunicazioni Machine to Machine (M2M), era necessario regolare lo standard IEEE 802.11 che era stato progettato principalmente per la comunicazione al computer. La comunicazione M2M richiede caratteristiche distinte come un raggio di trasmissione superiore a 1 Km, velocità di trasmissione superiori a 100 Kbps e un basso consumo energetico. È inoltre necessario disporre di una rete che supporti un gran numero di nodi, operando secondo una politica di basso consumo energetico. Nel tentativo di soddisfare questi requisiti, il Task Group IEEE 802.11ah (TGah) ha guidato i miglioramenti necessari nei PHY e nei livelli MAC del protocollo IEEE 802.11 per soddisfare questo scenario.

L'IEEE 802.11ah può essere utilizzato non solo come WSN ma anche come infrastruttura *backhaul* per collegare i sensori ai data collectors. Ciò è possibile grazie alla sua ampia capacità di copertura e velocità dei dati. L'emendamento IEEE 802.11ah viene a risolvere alcune importanti limitazioni riscontrate nell'uso di Wi-Fi IEEE 802.11a / b / g / n quando utilizzato per le comunicazioni M2M. Il suo livello fisico opera su ISM a 863-868,6 MHz in Europa, 950,8-957,6 MHz in Giappone, 314-316 MHz, 430-432 MHz, 433,00-434,79 MHz in Cina, 917-923,5 MHz in Corea e 902-928 MHz negli Usa. Utilizza uno schema di modulazione di divisione di frequenza ortogonale (OFDM) per raggiungere aree di copertura più ampie e aumenta il numero di stazioni azionabili contemporaneamente. Le operazioni in frequenza inferiori a 1 GHz dipendono dalle normative locali

per ciascuna regione. Per questo motivo, l'occupazione della larghezza di banda è in genere 1 MHz o 2 MHz, ma, in alcuni paesi, sono consentite anche configurazioni più ampie che utilizzano 4, 8 e 16 MHz. Nel livello fisico, la trasmissione è basata su OFDM e funziona con 32 o 64 sub carrier con spaziatura 31,25 KHz. Le tecniche di modulazione supportate includono BPSK, QPSK e da 16 a 256 QAM con caratteristiche di trasmissione / ricezione. Queste modulazioni sono migliorate con la formazione del fascio utilizzando uno schema di antenna multi-input multi-output (MIMO) per utenti singoli e MIMO multiutente downlink. Tuttavia, la canalizzazione PHY BW di livello fisico IEEE 802.11ah può essere suddivisa in:

Larghezza di banda di 1 MHz: utilizzata per una vasta gamma di applicazioni, in particolare le applicazioni IoT o M2M che funzionano con velocità di trasmissione ridotte a breve termine. L'estensione della gamma si ottiene quando si utilizza il nuovo indice di modulazione e codifica 10 (MCS 10) aggiunto ai precedenti MCS 802.11.

Larghezze di banda di 2 MHz e oltre: questa modalità è orientata a velocità di trasmissione dati superiori a quelle ottenute con la larghezza di banda di 1 MHz, utilizzando una larghezza di banda fino a 16 MHz con diverse opzioni di modulazione e schema di codifica (MCS). MIMO può essere utilizzato per comporre questa soluzione per migliorarne le prestazioni.

Lo strato PHY di IEEE 802.11ah segue l'evoluzione dello standard IEEE 802.11 per IEEE 802.11ac che utilizza la modulazione OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Il suo sistema di trasmissione dispone ora di antenne MIMO uplink e di antenne MIMO multiutente (DL MU-MIMO).

Le precedenti larghezze di banda di 10, 20, 40, 80 e 160 MHz erano ridotte a una scala di 10 volte, risultando in canali con larghezze di banda di 1, 2, 4, 8 e 16 MHz nello standard IEEE 802.11ah. Allo stesso tempo, mantenendo lo stesso numero di portatori in ciascun canale delle versioni precedenti, ad eccezione del canale 1 MHz, non è possibile ridurre il valore della banda di protezione tra i portatori secondari. In questo modo, la trasmissione di un simbolo dura 10 volte di più rispetto agli standard precedenti. L'aumento della gamma di trasmissione è una conseguenza della combinazione di alcuni altri fattori di miglioramento nello strato PHY.

A causa del suo funzionamento nella gamma di frequenza inferiore a 1 GHz, la trasmissione ha perso 8,5 dB del suo budget di collegamento, in condizioni LOS. Ridurre 10 volte la larghezza di banda del canale di trasmissione riduce anche il livello di rumore nella trasmissione. Ciò aumenta il rapporto segnale-rumore (SNR) di 10 dB. Con l'adozione di un canale con larghezza di banda di 1 MHz, nel SNR si ottiene un incremento di 3 dB rispetto al canale di larghezza di banda di 2 MHz. Altri 3 dB di guadagno sono migliorati sull'SNR, con il canale da 1 MHz che supporta lo schema di codifica di

ripetizione per la modulazione binaria di spostamento di fase (BPSK), utilizzato con la frequenza di codifica 1/2. La somma dei suddetti guadagni ci porta a un guadagno totale nel budget di collegamento di 24 dB rispetto agli standard precedenti che funzionano a 2,4 GHz.

Quando il parametro principale non è la distanza ma il fattore energetico, la potenza di trasmissione dei nodi può anche essere ridotta usando la sua modalità di funzionamento a bassa potenza. Riduce il consumo energetico, il costo del dispositivo e, di conseguenza, le sue dimensioni.

Uno svantaggio dell'uso di un canale più stretto è una trasmissione più sensibile alla dissolvenza piatta che può essere profonda negli ambienti interni. Questa sfida viene superata utilizzando la selezione di trasmissione dei migliori sotto-canali per la trasmissione in quel momento. Questa tecnica può aumentare fino a 7 dBs di guadagno per i sistemi che lavorano in ambienti interni. In caso di spostamento del nodo durante la trasmissione, si verifica l'effetto Doppler. È necessario stimare il canale e la correzione della trasmissione durante la trasmissione. Per fare ciò, IEEE 802.11ah cambia il vettore pilota di ciascun simbolo OFDM.

Il livello MAC IEEE 802.11ah incorpora la maggior parte delle caratteristiche principali IEEE 802.11 o ne ha migliorate alcune. Questo per ottimizzare le comunicazioni M2M, supportare una grande rete IoT esterna e supportare comunicazioni ad alta efficienza energetica per i sensori.

Considerando uno scenario di una rete densamente popolata da nodi, sono stati implementati alcuni fattori che implicano il contenimento e le caratteristiche di accesso al supporto, ad esempio le tecniche di regolazione della finestra di accesso limitato, frame di sincronizzazione e gerarchico e mappa di indicazione del traffico (TIM). Sono implementati nel livello MAC per mitigare i problemi di collisioni di trasmissione tra nodi nascosti. La finestra temporale in cui un gruppo di nodi appartenenti allo stesso AP deve accedere al supporto e trasmettere è chiamata finestra ad accesso limitato (RAW). RAW è diviso in slot assegnati singolarmente ad alcuni nodi di trasmissione di questo gruppo durante ciascun RAW. Lo stesso gruppo di nodi contesta l'accesso al supporto tramite lo stesso RAW assegnato a loro e, pertanto, è una risorsa condivisa. Informazioni come il numero di slot, la durata di ogni slot e l'ora di inizio di ciascun RAW sono fornite dal RAW Parameter Set (RPS).

La tecnica RAW impedisce la sovrapposizione delle trasmissioni tra nodi nascosti, limitando il tempo che una stazione utilizza quando compete per il mezzo di trasmissione. Quando una stazione deve trasmettere, deve prima rilevare e ricevere un frame completo e corretto.

Il rilevamento e l'identificazione di questo frame fa sì che la stazione attenda la finestra di trasmissione per evitare la collisione della trasmissione. Quando si tenta di accedere al supporto, se

la stazione non riceve un frame o non è in grado di identificare il frame ricevuto, deve attendere un intervallo di tempo chiamato Probe Delay per effettuare un altro tentativo di accesso al supporto. Lo svantaggio di questa procedura è generare un ritardo di accesso medio, che viene ridotto con l'aiuto dell'AP e delle sue modalità di controllo dell'accesso medio. All'inizio di ogni RAW slot, l'AP trasmette un frame SYNC. L'AP può rilevare la disponibilità del supporto e iniziare la sua trasmissione, dopo la fine della ricezione del frame SYNC, senza dover attendere il timeout di Probe Delay. L'uso del frame SYNC può ridurre il consumo della batteria fino al 30%.

Un altro miglioramento apportato da IEEE 802.11ah riguarda il consumo di energia e il controllo della latenza. Sono causati dal processo di comunicazione basato sulla mappa di indicazione del traffico (TIM), utilizzato nel meccanismo di rilevamento della domanda di trasmissione downlink. Questo metodo funziona rilevando la richiesta di comunicazione downlink fino a TIM trasmessa nel beacon dall'AP. Pertanto, è anche necessario che il nodo risponda all'AP con un frame PS-Poll. Questa procedura viene eliminata adottando un programma predefinito del futuro orario di sveglia. Con i dati memorizzati nel buffer, pronti per essere trasmessi, l'AP trasmette i dati a quel nodo nella sua finestra predefinita, risparmiando così energia che il nodo spenderebbe mappando il TIM, negoziando l'accesso al supporto e ricevendo dati dal AP.

Un'altra caratteristica che merita di essere evidenziata è l'uso dei campi del preambolo PHY è quello di indicare la continuità dell'utilizzo del canale. Viene utilizzato per ridurre al minimo le collisioni e per adottare l'uso della capacità transitoria bidirezionale (BDT). Inoltre, l'adozione del breve spazio inter-frame (SIFS) tra comunicazioni uplink e downlink all'interno della stessa opportunità di trasmissione (TXOP) per migliorare l'accesso dei media. Queste caratteristiche contribuiscono anche al risparmio energetico.

Un altro miglioramento apportato a favore del risparmio energetico sta ridimensionando il valore del campo Periodo massimo di inattività. Questo campo definisce il tempo di spegnimento del terminale. In questo modo, il terminale è in grado di entrare in modalità di sospensione per più di cinque anni.

La riduzione dell'elaborazione, la riduzione delle spese generali oltre alla riduzione e l'ottimizzazione dell'accesso al supporto guidano anche l'evoluzione dei livelli IEEE 802.11 PHY e MAC. Nel livello PHY, il sistema di riconoscimento della trasmissione che utilizza il pacchetto di riconoscimento (ACK) è stato ottimizzato riducendo il pacchetto ACK stesso al minimo necessario e anche creando il pacchetto di dati null

(NDP) con MAC. Per mantenere i parametri QoS, l'uso di un nuovo formato di frame dedicato a QoS chiamato Short QoS Data Frame. La sua intestazione è stata ridotta a 12 byte rispetto ai 30 byte del

frame di dati QoS di IEEE 802.11n. Per aumentare il numero di stazioni fino a un massimo di 8191, in IEEE 802.11ah sono state definite quattro modalità di codifica. Consentono a IEEE 802.11ah di comprimere la bitmap virtuale di indicazione del traffico, utilizzata per segnalare l'identificatore di associazione di una stazione. Un confronto tra gli standard IEEE 802.11 descritti è presente nella Figura 41.

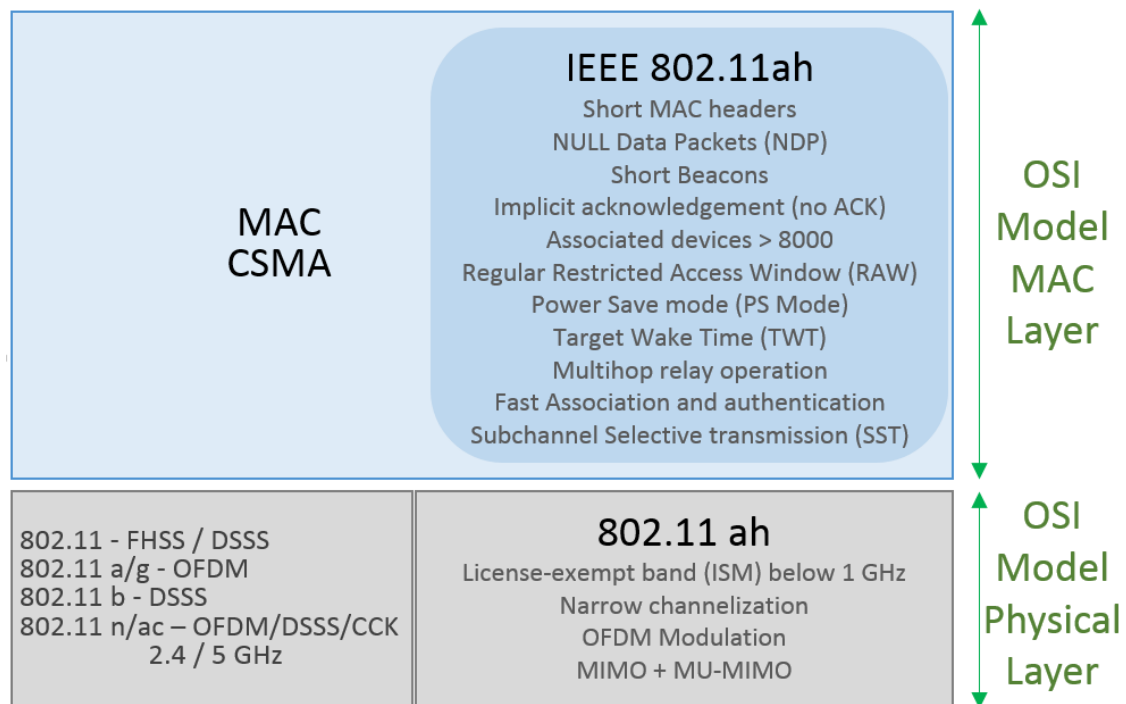


Figura 41 – Standard IEEE 802.11

La separazione delle stazioni in diversi tipi, con procedure diverse, periodi di tempo di accesso ai canali comuni e altre caratteristiche è stata aggiunta al protocollo MAC. Queste caratteristiche consentono fino a 8191 dispositivi terminali collegati già considerati i problemi di collisione tra loro. Sebbene sia necessario mantenere la connessione e la sincronizzazione con gli AP, i terminali IEEE 802.11ah sono dotati di meccanismi che forniscono risparmio energetico durante il periodo di inattività. Ciò garantisce che IEEE 802.11ah sia a lungo raggio e basso consumo energetico rispetto ad altre tecnologie WLAN, ma rimanendo diverso dalle LP-WAN. Utilizzando le antenne appropriate e le sue caratteristiche, il protocollo può essere utilizzato anche in array punto-punto fissi, generalmente in intervalli di oltre 1 km ogni volta che c'è una linea di mira (LOS). IEEE 802.11ah viene utilizzato anche per le comunicazioni punto-punto o per i sistemi di trasporto back-haul.

2.5.5.10 Protocolli a corto raggio: discussione

Questo studio ha dimostrato la diversità dei modelli nel protocollo MAC dei protocolli a corto raggio, per quanto riguarda le loro caratteristiche applicative. Le tecnologie RFID e NFC non hanno molte caratteristiche in comune sebbene entrambe siano state sviluppate per comunicazioni a corto raggio. Ad esempio, le applicazioni per l'identificazione e il tracciamento utilizzano RFID più comunemente mentre NFC è stato reso popolare tra gli smartphone per lo scambio di contenuti multimediali e dispositivi di e-business per macchine di pagamento. C'è una costante evoluzione di queste tecnologie, adattandosi alle nuove esigenze. Conservando le caratteristiche di miniaturizzazione, consumo energetico ed efficienza di trasmissione.

Diverse funzionalità a volte impediscono un confronto diretto del protocollo a causa delle forti differenze nella progettazione e nella costruzione dei loro livelli PHY e MAC. Tuttavia, il livello PHY dello standard IEEE 802.15.4 viene utilizzato come base per molti altri protocolli a corto raggio. Inoltre, i protocolli che presentano soluzioni diverse non compensano gli svantaggi di IEEE 802.15.4, ma soddisfano piuttosto i requisiti delle diverse applicazioni. Il confronto tra BLE e IEEE 802.15.4 chiarisce il consumo energetico inferiore di BLE rispetto a IEEE 802.15.4. Per quanto riguarda la produttività e l'efficienza energetica, IEEE 802.11a mostra alcuni vantaggi rispetto a IEEE 802.15.4. Utilizzando il livello PHY del protocollo IEEE 802.15.4, il protocollo Wireless-HART implementa diverse funzionalità nel suo livello MAC come TDMA come tecnica di accesso medio e salto di frequenza che ne aumenta la capacità.

Il protocollo Z-Wave presenta i livelli PHY e MAC con una combinazione diversa. Il suo livello MAC, standardizzato da ITU G.9959, presenta la tecnica di accesso intermedio di eredità CSMA-CA, meccanismi di sicurezza, ottimizzazione dell'accesso del mezzo (come tempo di backoff, validazione dei frame e flessibilità della topologia). Queste caratteristiche consentono elevate prestazioni di velocità dei dati con la gamma che può fornire la banda ISM sub-GHz.

Operando nell'intervallo di TVWS (470–790 MHz), il protocollo Weeighthless deve compensare la larghezza di banda di trasmissione interessata dall'inquinamento spettrale. Lo fa usando tecniche di modulazione complesse come le derivazioni di Keying Shift Phase e opzioni di modulazione di ampiezza in quadratura. Le sue prestazioni di trasmissione sono inoltre rafforzate dall'uso congiunto di meccanismi di accesso multipli come il mezzo FHMA e TDD.

Le diverse varianti del protocollo IEEE 802.11 hanno seguito le esigenze delle comunicazioni wireless. L'uso massiccio delle sue variazioni che si sono evolute è una conseguenza della domanda di servizi H2H che richiedono alte velocità di trasmissione, con reti molto fitte. La variante IEEE

802.11ah è arrivata per migliorare le prestazioni e la solidità della comunicazione dei dati. È dovuto a vari meccanismi implementati nel livello MAC, come header MAC corti, beacon brevi, modalità di risparmio energetico, finestra ad accesso limitato regolare, tra gli altri. Inoltre, contribuisce a buone prestazioni della gamma di trasmissione, a una riduzione dell'utilizzo del canale rispetto ai precedenti standard IEEE 802.11 e alle nuove tecniche per funzionalità di più antenne.

Le differenze tra applicazioni e caratteristiche tecniche rendono difficile il confronto dei protocolli di copertura a breve distanza (Bluetooth, Bluetooth Low Energy, IEEE 802.11ah e IEEE 802.15.4) con protocolli di copertura a lunga distanza. Quindi, la prossima sottosezione discute i protocolli IoT a lungo raggio. La Figura 42 presenta un confronto tra i protocolli a corto raggio studiati in quest'indagine.

2.5.6 Protocolli Long-Range

In base ai propri requisiti quali velocità, copertura della distanza, robustezza, ecc., I protocolli di rete esistenti necessitano di alcuni adattamenti per soddisfare i requisiti necessari per partecipare ai servizi IoT.

In alcuni casi, sono stati sviluppati alcuni protocolli per soddisfare le applicazioni IoT che richiedono una trasmissione di vasta portata, affidabile e robusta. Alcuni dei protocolli classificati come protocolli per LP-WAN sono in grado di soddisfare la domanda di protocolli con un'ampia area di copertura. I protocolli LP-WANS possono superare alcuni guasti della rete cellulare mobile aumentando forti adattamenti per soddisfare i requisiti IoT.

LP-WAN sono presentati come buoni candidati per supportare molti dei requisiti della struttura IoT precedentemente menzionati e sono in grado di superare le restrizioni a corto raggio delle LAN. Tra le possibili soluzioni ci sono le tecnologie di banda ISM proprietarie e senza licenza Sigfox, LoRa / LoRaWAN, contro soluzioni di rete cellulare mobile come LTE-A (Long Term Evolution — Advanced) e Narrow Band IoT (NB-IoT). Tecnologie di rete cellulare mobile, Future Internet 2019, 11, 16 22 di 42 con spettro autorizzato o meno, può soddisfare i requisiti energetici e di latenza ed è meglio usare l'infrastruttura esistente.

	RFID	NFC	Bluetooth Low Energy	IEEE 802.15.4	Wireless HART	Z-Wave	Weightless W	Weightless N	Weightless P	IEEE 802.11ah
Standard	ISO/IEC 18000, 29167, 20248, JTC 1/SC 31	ISO/IEC 14443, 18092, JIS X6319-4	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4	HART MAC IEEE 802.15.4 PHY	ITU G.9959 Based	Weightless SIG	Weightless SIG	Weightless SIG	IEEE 802.11ah
Frequency band	Global: 6 MHz ISM: 13.5 MHz ISM EU: 863-870 MHz ISM NA: 902-928 MHz ISM: 2.4 GHz UWB: 3-27 GHz	13.56 MHz	2.4 GHz	EU: 868 MHz NA: 915 MHz Global: 2.4 GHz	Global: 2.4 GHz	EU: 868 MHz NA: 915 MHz	TV White spaces 470-790MHz	ISM Sub-GHz, EU (433/470/868 MHz), US (915 MHz), Asia (430 MHz)	ISM Sub-GHz, EU (433/470/868 MHz), US (915 MHz), Asia (430 MHz)	Sub-1GHz
Data rate	500 Kb/s @ payload of 16-32 bits	106 kb/s or 212 kb/s or 424 kb/s or 848 Kbps	1 Mbps	20 kb/s @ 868 MHz 40 kb/s @ 915 MHz 250 kb/s @ 2.4 GHz	250 kb/s	9.6, 40 and 100 kb/s	1 kb/s - 10 Mb/s	30 kb/s - 100 kb/s	200 b/s - 100 kb/s	0.15-4 Mb/s @ BW=1MHz 0.65-7.8 Mb/s @ BW=2MHz
Typical range	0.1 - 5 m	0.1 m	70 m	10-100 m @ 2.4 GHz	10-600 m	100 m	5 km	2 km	2 km	100-1000m
TX power	1.5 mW	20 or 23 dBm	0 - 10dBm	0 - 20dBm	10 dBm	0 dBm	17 dBm	17 dBm	17 dBm	<10 mW - <1 W (@ local regulations)
Bandwidth per channel	10 MHz @ 6 MHz 14 MHz @ 13.5 MHz 1.74 MHz @ 433 MHz 7 MHz @ 800 MHz 8 MHz @ 2.4 GHz 5-27 GHz segmented	Variable	40 channels of 2 MHz width	868 MHz band: 0.3 MHz 915 MHz band: 0.6 MHz 2.4 GHz band: 2 MHz	2 MHz	300, 400 kHz	5 MHz	200 Hz	12.5 kHz	1, 2, 4, 8 MHz or 16 MHz for GFSK
Modulation / Transmission Technique	Proximity Field Modulation Induced Pulse	ASK, BPSK	GFSK FHSS Star	O-QPSK BPSK ASK DSSS	O-QPSK BPSK ASK	FSK GFSK CSMA-CA	BPSK QPSK 16-QAM DB-PSK	DBPSK Slotted ALOHA	GMSK offset-QPSK FDMA/TDMA	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM OFDM
Topology	Point to Point Point to Multipoint	Peer-to-peer	Single-hop	Mesh	Star Cluster Mesh	Mesh	Star	Star	Star	Star
Power saving mechanisms	Inductive mechanism Backscattering	NA	Standby mode	Only in ZigBee RF4CE	On / Off radio	Sleep / Wakeup Modes	NA	NA	NA	Native
Packet length	16 - 64 Kbps	Segments	8 to 47 bytes	100 bytes	250 bits	255 bits	> 10 bytes	< 20 bytes	> 10 bytes	100 bytes
Security	Clandestine Tracking and Inventorying EPC discovery Service	Encryption, Cryptographic, Secure Channel, Key Agreements.	Advanced Encryption Standard (AES) - 128 bits	AES-128	Cipher Block Chaining Message Authentication Code (CCM) AES-128	AES-128	AES-128	AES-128	AES-128	WPA
Licensing	Free	Free	Free	Free	Free	Free	Free	Free	Free	Free
Scalability	Limited	Peer to Peer	5917	Upper layers	NA	232	High	High	High	8191
Typical scenarios	Human Implantation Tracking Identification	Healthcare, Smart Environment, Mobile Payment, Ticketing & Loyalty	Multimedia data exchange between nearby nodes	Multi-hop networks with few nodes	Industrial	Automation in residential and light commercial	M2M Applications	M2M Applications	M2M Applications	One-hop networks with many nodes

Figura 42 – Confronto tra protocolli short range

Le sfide della comunicazione e l'ampia serie di specifiche della comunicazione M2M sono state aggiunte ai protocolli basati su LTE. Lo sviluppo delle risorse MTC (Machine Type Communication) nel contesto di LTE (Long Term Evolution) è stato avviato nella versione 10, o Release 10 (R10), dello standard LTE-A. Durante lo sviluppo della comunicazione M2M, il comitato 3GPP (3rd Generation Partnership Project) ha definito un nuovo profilo, chiamato CAT-0, o Categoria 0, per il funzionamento dell'MTC delle reti WAN (Wide Area Network) a bassa potenza. Nella versione 13 (R13) del 2016, due categorie speciali CAT-M per MTC e CAT-N per Narrowband-IoT (NB-IoT). Queste categorie sono state incluse per supportare le caratteristiche della comunicazione M2M e della tecnologia IoT, rispettivamente. Tali categorie saranno meglio affrontate nel documento. In letteratura è possibile trovare riferimenti allo standard CAT-N come NB-IoT e allo standard CAT-M come LTE eMTC, LTE-M2M, LTE-M e CAT-M1. In questo documento verranno utilizzate le notazioni LTE eMTC e NB-IoT.

2.5.6.1 NB-IoT

Secondo le specifiche regionali LTE eMTC, può operare solo all'interno della larghezza di banda di un vettore LTE. I sistemi NB-IoT possono essere implementati come sistemi autonomi nella banda Global System for Mobile Communications (GSM), impiegati nel vettore di larghezza di banda LTE o nella banda di protezione della larghezza di banda LTE. A causa della riduzione della larghezza di banda NB-IoT a 180 kHz, i dispositivi a bassa velocità di trasmissione dati possono avere una copertura estesa, una riduzione della complessità e un basso consumo energetico. Per scenari con problemi di copertura degli operatori di rete cellulare, NB-IoT è visto come il futuro dei dispositivi IoT che utilizzano l'infrastruttura di rete mobile. Con la pressione della crescente connettività IoT, il 3 ° Generation Partnership Project Agreement (3GPP) ha lanciato il progetto chiamato CAT-N. Questo progetto presenta una serie di categorie che offrono diverse interfacce aeree specificamente dedicate ai sistemi a bassa potenza. Queste categorie includono anche diverse caratteristiche dell'uso del sistema di irradiazione MIMO e diversi valori di velocità dei dati di uplink e downlink sfruttando lo spettro GSM disponibile.

NB-IoT copre tutti i componenti importanti per la comunicazione nei sistemi M2M / IoT: bassa complessità, basso consumo energetico e lunga distanza. Alcune caratteristiche chiave dello standard includono una larghezza di banda di 180 kHz e velocità di trasmissione uplink e downlink di circa 250 Kbps con un'operazione half-duplex. Tuttavia, pur essendo una nuova interfaccia radio, le implementazioni NB-IoT possono essere effettuate nella banda dei carrier LTE esistenti. Oltre a questa modalità operativa, NB-IoT supporta anche la modalità operativa della banda di protezione di un vettore LTE. Queste due modalità operative sono mostrate nella Figura 43. È importante

differentiare NB-IoT da LTE eMTC, che si riferisce all'uso dell'evoluzione LTE per l'uso di MTC e IoT. La terza modalità di funzionamento di NB-IoT, che si può vedere nella Figura 44, è la distribuzione di NB-IoT utilizzando bande portanti GSM dello spettro che è stato assegnato a servizi cellulari GSM legacy.

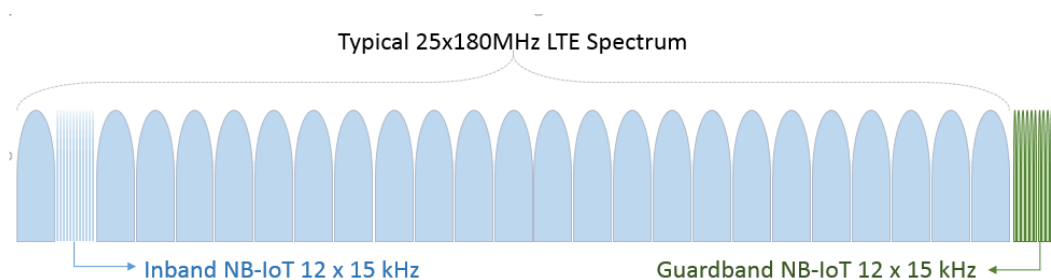


Figura 43 – Banda operativa di NB-IoT

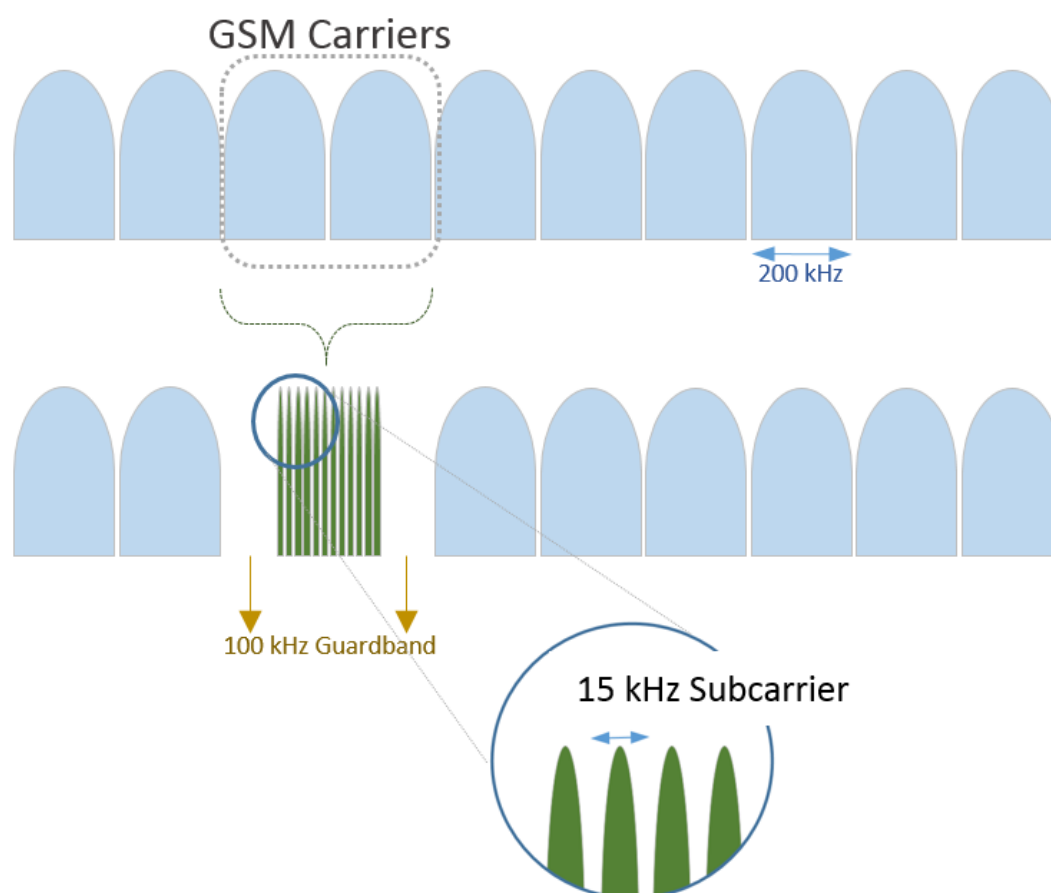


Figura 44 – Banda operativa NB-IoT

Nel downlink, NB-IoT utilizza strutture di accesso multiplo a divisione di frequenza ortogonale a lungo termine (LTE / OFDMA) con spaziatura tra portatori secondari di 15 kHz, mentre il collegamento ascendente è in grado di utilizzare SC-FDMA con spaziatura portante secondario a 3,75 kHz.

Per la spaziatura di 3,75 kHz tra i portanti secondari, la struttura del frame mostra piccole differenze rispetto alla struttura definita per lo standard LTE. Ogni slot del frame LTE diventa 2 ms, il frame NB-IoT è quindi composto da cinque slot, per un totale di 10 ms. La tecnologia NB-IoT presenta una perdita di accoppiamento massima estesa a 20 dB su 140 dB LTE. Si ottiene attraverso un aumento del numero di ripetizioni temporali e della trasmissione (p/2) -BPSK di un singolo sub-vettore, fornendo un raggio di copertura per NB-IoT di circa 15 km. NB-IoT contiene i seguenti segnali fisici e risorse del canale, come mostrato nella Figura 45.

- Segnale di sincronizzazione primaria a banda stretta (NPSS)
- Segnale di sincronizzazione secondario a banda stretta (NSSS)
- Narrowband Physical Broadcast Channel (NPBCH)
- Segnale di riferimento a banda stretta (NRS)
- Canale di controllo downlink fisico a banda stretta (NPDCCH)
- Canale condiviso downlink fisico a banda stretta (NPDSCH)

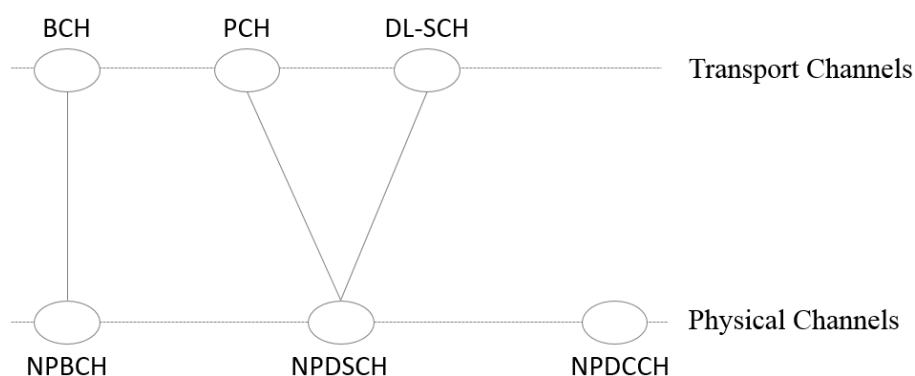


Figura 45 – Banda operativa NB-IoT

Questi canali e segnali di controllo del livello fisico nell'NB-IoT sono multiplexati nel tempo. I sub frame della struttura presentati per NB-IoT sono forniti per canali e segnali fisici diversi. Ogni

sottostruttura NB-IoT comprende un blocco di risorse nel dominio della frequenza e 1 ms nel dominio del tempo. I segnali NPSS e NSSS vengono utilizzati per eseguire la sincronizzazione di tempo e frequenza e il rilevamento di celle. Un segnale NRS viene utilizzato per fornire riferimento di fase nella demodulazione dei canali di downlink. NB-IoT supporta fino a due porte NRS. Il canale NPBCH, trasmesso in ciascun sub frame 0 del frame, carica il blocco di informazioni principale, chiamato Master Information Block (MIB). NPDCCH trasporta le informazioni di pianificazione per i canali di dati downlink e uplink, oltre alle informazioni di conferma HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) per il canale di dati uplink. Il canale NPDSCH trasporta dati di livello superiore nonché messaggi di paging, informazioni di sistema e messaggi di risposta ad accesso casuale. In uplink, NB-IoT include due canali fisici che sono descritti come (i) Narrow-Physical Random Access Channel (NPRACH) e (ii) Narrowband Physical Uplink Shared Channel (NPUSCH). NPRACH è un canale di accesso casuale di nuova concezione che sostituisce il canale di accesso casuale LACH legacy e utilizza una larghezza di banda di 1,08 MHz. È più della larghezza di banda uplink per NB-IoT. Il canale NPUSCH ha due formati. Il primo viene utilizzato per caricare i dati di uplink e ha una dimensione massima del blocco di 1000 bit, che è molto più piccolo di LTE. Il secondo formato viene utilizzato per segnalare il riconoscimento HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest) per NPDSCH e utilizza un codice di ripetizione per la correzione degli errori. NB-IoT riduce la semplicità per applicazioni tolleranti al ritardo come misuratori, dispositivi e sensori, offrendo una copertura più ampia. Le soluzioni IoT comuni richiedono basso costo, elevata densità dei dispositivi di rete e basso trasferimento di dati. La tecnologia NB-IoT mira, attraverso l'ottimizzazione LTE, a soddisfare questa domanda (oltre 50 mila dispositivi) con basse velocità di dati in applicazioni tolleranti al ritardo. Figura 46 consolida i parametri chiave di NB-IoT.

Frequency Range	NB - IoT (LTE) FDD Bands: 1, 2, 3, 5, 8, 11, 12, 13, 17, 18, 19, 20, 25, 26, 28, 66, 70 MHz
Duplex Mode	FDD Half Duplex Type B
Multiple Access	Downlink: OFDMA - Uplink: SC-FDMA
Modulation Scheme	Downlink: QPSK - Uplink: $\pi/4$ -QPSK, $\pi/2$ -BPSK, QPSK
Link Budget	Up to 164 dB (20dB GPRS)
Data Rate	~25 kbps in Download and ~64 kbps in UL
Latency	< 10 seconds
Low Power	eDRX, Power saving mode
Features Supported	HARQ, Uplink Power Control

Figura 46 – Parametri chiave di NB-IoT

2.5.6.2 LTE—Long Term Evolution

Le tecnologie basate su standard LTE eMTC (Advanced Type Evolution) a lungo termine supportano le modalità CAT-0 e CAT-M. Mentre LPWAN LTE CAT-0 viene comunemente utilizzato per implementare M2M / IoT, CAT-M riduce la complessità mantenendo l'aspetto di copertura utilizzando l'infrastruttura di rete cellulare mobile esistente. LTE eMTC conta sugli stessi vantaggi della tecnologia mobile di sicurezza, privacy, affidabilità dei dati e identificazione dei dispositivi.

Con le applicazioni che coinvolgono le informazioni di comunicazione generate dai servizi da uomo a uomo (H2H), la velocità di trasmissione dei dati nelle reti cellulari è aumentata considerevolmente nell'ultimo decennio. Tuttavia, il traffico generato dalla comunicazione M2M ha caratteristiche diverse da quelle generate dai servizi H2H nelle attuali tecnologie mobili. I dispositivi M2M inviano più traffico di quello che ricevono rispetto ai dispositivi H2H. Ad esempio, il traffico di servizio (H2H) presenta caratteristiche di concentrazione specifiche in determinate ore del giorno, mentre il traffico M2M può presentare una caratteristica uniforme. In applicazioni come la misurazione, il traffico M2M tende a essere periodico e la mobilità è breve rispetto ai dispositivi di comunicazione (H2H). Pertanto, i requisiti di qualità del servizio tra M2M e H2M possono essere molto diversi. 3GPP ha offerto l'adeguatezza di LTE per consentire la connessione MAC e i collegamenti PHY attraverso le reti LTE e per ottimizzare le tecnologie e i meccanismi relativi all'accesso radio. Fornisce aggiornamenti di reti LTE che soddisfano i requisiti MTC e IoT come segue:

- CAT-0, versione 12 (R12): poiché la Categoria 1 (CAT-1) ha una bassa capacità di trasmissione, è diventata necessaria una nuova categoria per supportare le nuove sfide di MTC e IoT. La Categoria 0 o CAT-0 di R12 presenta una complessità hardware inferiore rispetto a CAT-1.
- CAT-M, versione 13 (R13): con l'obiettivo di nuove tecniche di riduzione della complessità, CAT-M è stato proposto in R13.
- CAT-N, versione 13 (R13): Poiché i principali dispositivi IoT, o MTC, in genere gestiscono la copertura a lunga distanza per trasmettere pochi byte di dati, CAT-N è stato incorporato nelle specifiche LTE per supportare la funzionalità richiesta. L'obiettivo principale di CAT-N è migliorare la copertura della distanza riducendo la sua complessità e, di conseguenza, un maggiore ciclo di vita della batteria.

Al fine di soddisfare i prerequisiti necessari per consentire alle reti LTE di essere in grado di partecipare ai servizi MTC, 3GPP ha lavorato sull'R12 per ridurre al minimo il consumo di energia e

i costi con il nuovo profilo del traffico dati, la semplificazione dell'hardware e le regolazioni dello spettro. Viene mantenuta la modulazione LTE OFDMA e la codifica SC-FDMA. 3GPP LTE Release 13 è in fase di studio per le applicazioni IoT a causa del fatto che utilizza una larghezza di banda di trasmissione inferiore rispetto ai terminali LTE delle versioni precedenti. La versione 13 funziona con la libertà di occupare lo spettro all'interno del vettore LTE usando solo 1,4 MHz dei 20 LTE disponibili. Un miglioramento del budget del collegamento di 15 dB può garantire una copertura più lunga e un migliore fattore di penetrazione degli ostacoli. La tecnologia LTE eMTC presenta gli stessi strati osservati nello stack del protocollo LTE, mostrato in Figura 47.

In breve, i livelli possono essere descritti come segue:

- Non-Access Stratum (NAS): funziona tra Device e Network Core e viene utilizzato per scopi di controllo, autenticazione e gestione della mobilità.
- Radio Resource Control (RRC): in una stazione base eNodeB, questo livello prende le decisioni di trasferimento, invia messaggi broadcast contenenti informazioni di sistema e controlla le misure dei parametri del dispositivo (UE).
- Packet Data Control Protocol (PDCP): responsabile della compressione e decompressione delle intestazioni dei pacchetti IP dell'utente. Esegue inoltre la crittografia dei dati, sia sul piano dati dell'utente che sul piano dati del piano di controllo.
- Radio Link Control (RLC): utilizzato per formattare e trasportare i dati tra il dispositivo e la stazione base eNodeB, trasferire le unità dati di protocollo (PDU) di livello superiore, la correzione degli errori, la concatenazione, la segmentazione e il riassemblaggio delle unità dati di servizio (SDU).
- MAC: esegue la mappatura del canale di trasporto fisico.
- Livello fisico: questo livello trasporta tutte le informazioni dai canali di trasporto attraverso l'interfaccia aerea.

Con LTE-RACH fissato sulla larghezza di banda 1,08 MHz, è conveniente utilizzare la canalizzazione LTE-eMTC in multipli del suo valore, consentendo la compatibilità con le versioni precedenti. La struttura del sottotelaio di LTE eMTC è la stessa dello standard LTE. Dal punto di vista del piano di frequenza, la larghezza di banda di 180 kHz di un blocco di risorse è divisa in 12 portatori secondari, ciascuno con una larghezza di banda di 15 kHz.

In termini di copertura, gli eMTC di LTE hanno un budget di link di 155 dB raggiunto con l'aggiunta di 15 dB nei processi di previsione dei canali e di ottimizzazione delle risorse, consentendo una copertura fino a 11 km.

Queste caratteristiche consentono all'LTE eMTC di avere una comunicazione soddisfacente anche in condizioni di perdite eccessive, ma le velocità di trasmissione sono interessate. Nel downlink, la struttura del sub-frame di LTE eMTC utilizza solo una parte dell'eredità del framework LTE. Poiché i dispositivi LTE eMTC possono essere implementati con una larghezza di banda ridotta, non è possibile utilizzare i canali di controllo LTE. Pertanto, è necessario creare un canale di controllo downlink fisico MTC (MTC-PDSCH) e un canale condiviso downlink fisico (PDSCH) utilizzando i canali dati LTE. PDSCH trasporta livelli di dati più elevati, segmentati in base alle risorse di trasmissione disponibili.

I dispositivi LTE eMTC dipendono dall'NPSS e dall'NSSS dello standard LTE per l'acquisizione della frequenza portante di una cella e l'utilizzo del tempo di trama. I segnali LTE possono essere utilizzati invariati dai dispositivi LTE eMTC anche in condizioni di copertura difficili. Per migliorare le prestazioni di ricezione, i dispositivi LTE eMTC possono accumulare i dati ricevuti nel buffer. Ciò accade perché i segnali NPSS e NSSS vengono trasmessi periodicamente. Al fine di scoprire le caratteristiche del canale di comunicazione, il segnale NRS viene utilizzato per fornire stime del comportamento del canale. Questo segnale, che ha un modello noto, viene trasmesso dalla stazione base ed esegue misurazioni della qualità del downlink.

Per la trasmissione di dati uplink, esiste solo un canale di controllo dell'uplink fisico (PUCCH) che trasporta informazioni come richieste di pianificazione, informazioni sulla qualità del canale e conferme della trasmissione. Il canale utilizzato dall'apparecchiatura utente per trasmettere i dati in uplink è il Physical Uplink Shared Channel (PUSH). Alcuni sottoportanti possono essere utilizzati per assegnare risorse all'utente e non vengono utilizzati dai segnali PUCCH o Physical Random Access Channel (PRACH). Per iniziare la connessione tra il terminale e la stazione base e stimare il tempo di arrivo del messaggio di uplink, viene utilizzato il canale PRACH. La Figura 48 illustra i canali uplink LTE eMTC.

Il consumo di energia sui dispositivi IoT è costituito dal consumo di energia in standby e attivo (rispettivamente in modalità inattiva e connessa). Il consumo energetico della modalità standby dipende dal design e dalla tecnologia utilizzata e, in sostanza, non dovrebbe differire tra LTE MTC e NB-IoT (entrambe le tecnologie hanno una durata della batteria di circa 10 anni). Il consumo di energia attiva differisce tra queste due tecnologie. Operando sul consumo di energia attiva per la trasmissione downlink, LTE eMTC ha un throughput sostanzialmente più elevato (sia larghezza di banda che modulazione di ordine superiore) rispetto a NB-IoT. Di conseguenza, è possibile ottenere un consumo di energia attiva stimato inferiore del 50% rispetto all'NB-IoT.

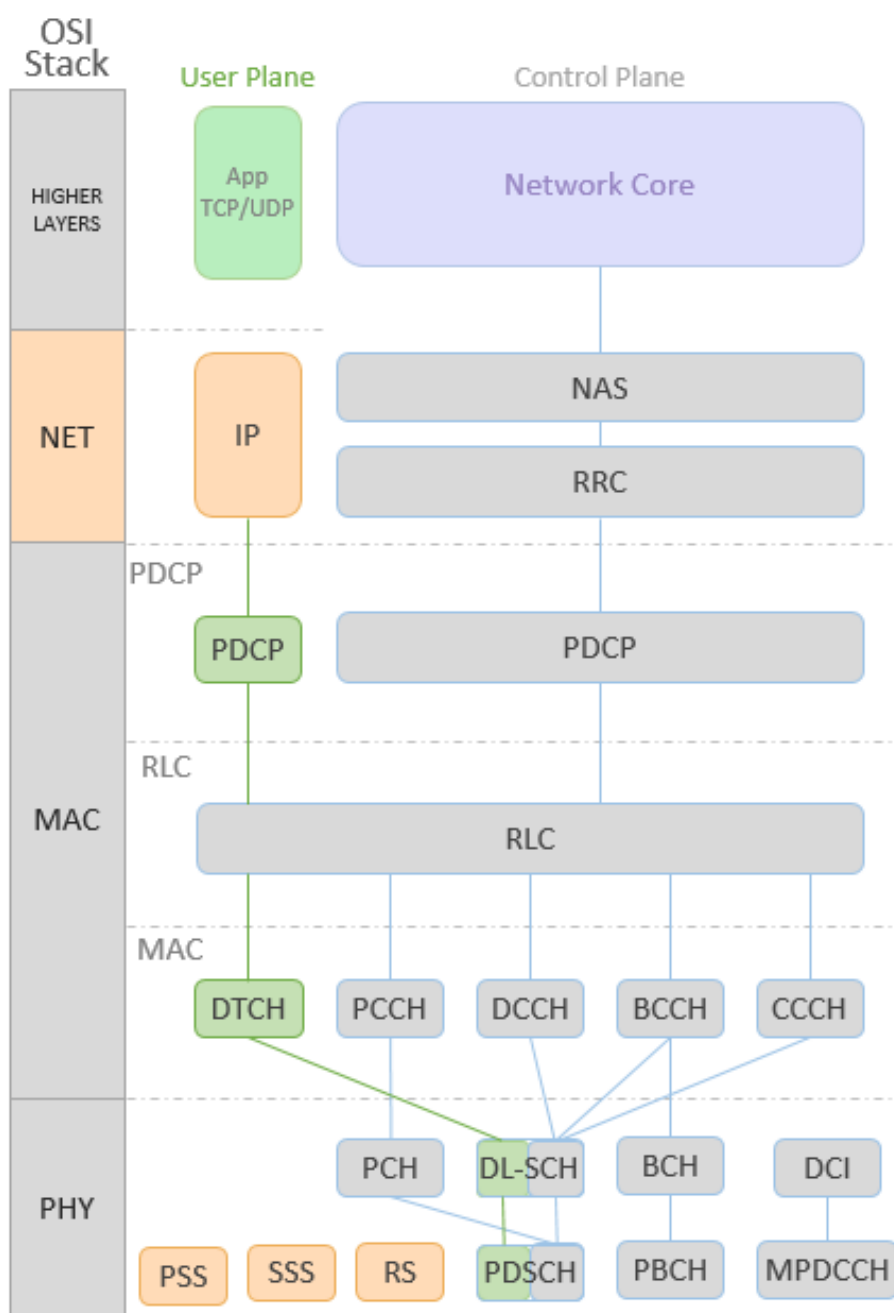


Figura 47 – Layer in downlink di LTE-eMTC

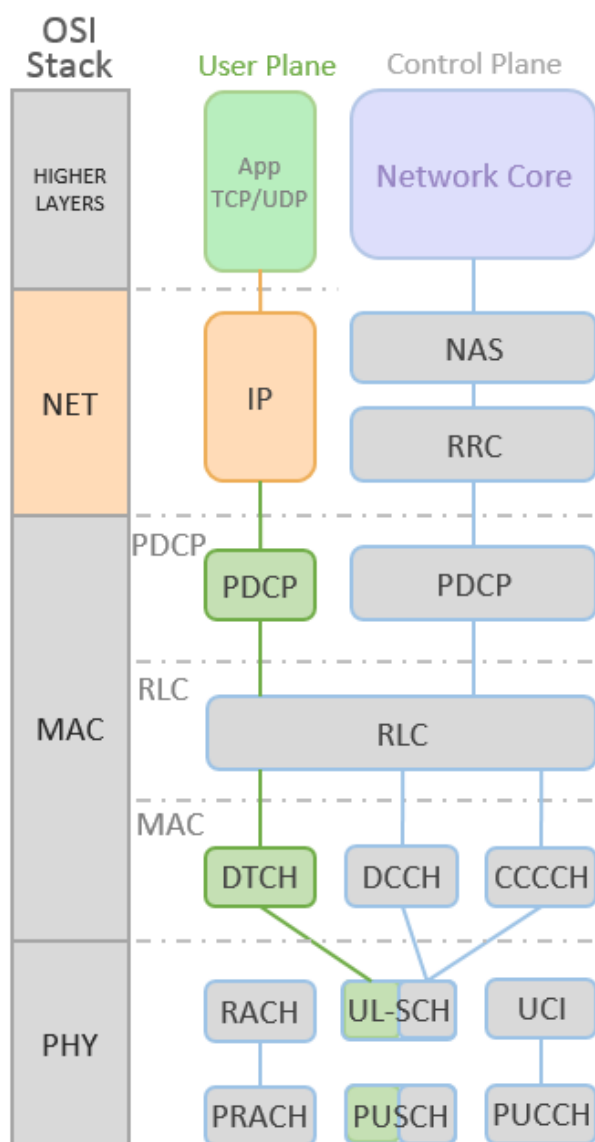


Figura 48 – Canali in uplink di LTE-eMTC

2.5.6.3 LoRa— Protocollo Long Range

LoRa definisce una tecnologia di livello fisico sviluppata da Cycleo nel 2010, una società acquisita da Semtech da Camarillo, Stati Uniti d'America. Il produttore del modulo LoRa offre all'utente una libreria programmata che consente la comunicazione tra i nodi LoRa, fornendo un semplice protocollo di collegamento. Libelium, una società con sede a Saragozza, in Spagna, fornisce gli strumenti e le librerie necessarie per operare con LoRa. Il protocollo LoRa è uno standard aperto che definisce il livello fisico per utilizzare lo spettro di diffusione in sequenza diretta (DSSS) con molteplici fattori di diffusione che vanno da 7 a 12.

Questa combinazione consente di stabilire una relazione tra la copertura della distanza e la velocità dei dati desiderata. Questa tecnica in banda ISM sotto-GHz consente una comunicazione robusta con un basso consumo energetico per lunghe distanze. Utilizzando la modulazione Frequency Shift Key (FSK) con l'uso opzionale del forward error correction (FEC), LoRa consente la demodulazione del segnale anche quando il livello del segnale è al di sotto del livello di rumore. LoRa conta anche sull'uso di un chirp modulato in frequenza (FM), basato su una modulazione dello spread spectrum con una variazione del chirp dello spread spectrum (CSS). Pertanto, LoRa modula i dati in canali diversi e li accelera, con una correzione dell'errore integrata diretta (FEC). Pertanto, è possibile aumentare la gamma di copertura mantenendo le caratteristiche di basso consumo energetico offerto dalla modulazione FSK. L'uso del guadagno di codifica migliora significativamente la sensibilità del ricevitore e utilizza gli spettri a larghezza di banda completa per trasmettere un segnale. Quindi, è più robusto incanalare il rumore e indipendente dalle compensazioni di frequenza causate da cristalli a basso costo. Le tecniche LoRa assicurano una demodulazione del segnale inferiore a -50 dB SNR contro 8-10 dB necessaria per la demodulazione FSK dei segnali in diverse bande ISM. La banda di frequenza utilizzata in Europa è la banda ISM di 863–870 MHz regolata dall'European Telecommunications Standards Institute (ETSI). Utilizza 8 canali scelti arbitrariamente, secondo l'attuale UN-111 in spagnolo BOE-A-2013-4845, con una larghezza di banda di 0,3 MHz per canale. Per il regolamento ISC 902-928 MHz FCC, LoRa funziona con 2,16 MHz per ciascuno dei 13 canali.

Per affrontare i problemi di basso costo, bassa potenza e robustezza, la modulazione LoRa conta su alcune proprietà chiave. La facile scalabilità della modulazione LoRa coinvolge domini di frequenza e larghezza di banda, consentendone l'utilizzo in sequenze dirette a banda larga e sistemi di salto di frequenza a banda stretta. Questo adattamento può essere fatto programmando il dispositivo affinché funzioni in base alle proprie esigenze. L'elevata efficienza a basso costo e bassa potenza può essere raggiunta con uno schema di modulazione costante e l'ottimo quota di collegamento ottenuto utilizzando il guadagno di elaborazione, riducendo così la potenza trasmessa. La natura asincrona e

l'elevata larghezza di banda utilizzata rendono il segnale LoRa più resistente ai meccanismi di interferenza, siano essi interferenze in banda o fuori banda.

La modulazione LoRa presenta una migliore immunità, principalmente alle interferenze AM (Amplitude Modulated) pulsate, rispetto ai sistemi di modulazione FSK. Ciò è dovuto al fatto che la durata del periodo di modulazione LoRa è più lunga rispetto ai tipici bursts di breve durata dei sistemi FHSS. Gli effetti dello sbiadimento e del multipath, comuni nelle aree urbane e suburbane, si sono affrontati con ampia diffusione delle chirps nello spettro. L'uso della modulazione Chirp Spread Spectrum (CSS) consente al sistema di essere più resistente a questi effetti. L'effetto Doppler, quando presente, influenza la qualità dei segnali demodulati nelle applicazioni. Tuttavia, la modulazione CSS mostra una piccola sensibilità all'effetto Doppler a causa della variazione di bassa frequenza generata da esso. Questa caratteristica può essere adatta per applicazioni in cui gli obiettivi monitorati hanno un supporto per la mobilità. Con robustezza contro le interferenze dello spettro e inconsapevole degli effetti di dissolvenza e multipath, LoRa supera la quota di collegamento dei sistemi FSK convenzionali e può aumentare fino a quattro volte la gamma rispetto ai sistemi FSK. Questo prendendo in considerazione la potenza di trasmissione fissa e la velocità effettiva. Come in ricezione, la trasmissione conta sulla caratteristica di modulazione LoRa per trasmettere o ricevere più segnali, lungo lo stesso canale. Ciò è dovuto al vantaggio del fattore di diffusione ortogonale, con un basso livello di degrado. I servizi di localizzazione o altre applicazioni in tempo reale come il range sono gestiti facilmente dalla modulazione LoRa grazie alla capacità di discriminare linearmente gli errori dovuti alla frequenza o agli effetti del time shift.

Le applicazioni possono utilizzare molte possibili velocità di dati, dimensioni del carico utile e larghezze di banda in base alle sue esigenze. Un altro livello di diversità si ottiene con l'uso di 125 kHz o 250 kHz in base al fattore di diffusione utilizzato. Il fattore di scattering spettrale utilizzato influenza sia l'intervallo finale ottenuto sia la velocità acquisizione dei dati finale. Maggiore è la dispersione spettrale, maggiore è l'intervallo massimo ottenuto. Al contrario, la velocità dei dati ottenuta sarà inferiore. Una stazione base può gestire più di 700 dispositivi terminali (ED) a seconda delle condizioni. Per soddisfare la capacità di risposta della rete, i metodi di pianificazione LoRa e il metodo di salto di frequenza utilizzati devono presumere che le condizioni del canale RF non varieranno durante un determinato periodo di tempo. LoRaWAN è una specifica di rete proposta da LoRa Alliance che offre un livello MAC basato sul livello PHY di modulazione LoRa. Al fine di soddisfare le caratteristiche di ottimizzazione della velocità di trasmissione dei dati, dell'utilizzo delle risorse di trasmissione e dell'utilizzo dell'energia, la tecnologia LoRaWAN MAC controlla le risorse di trasmissione.

Queste risorse sono la larghezza di banda da occupare, il fattore di spettro diffuso da utilizzare e la potenza di trasmissione di ciascun nodo. Questa combinazione di funzioni produce la funzione Adaptive Data Rate (ADR). Le tre classi di dispositivi specificate sono le seguenti:

- Classe A: il nodo può iniziare la comunicazione e trasmette al gateway solo quando necessario. Per ricevere messaggi dal gateway, il nodo apre una finestra di ricezione dopo ogni trasmissione.
- Classe B: i beacon vengono utilizzati per sincronizzare i nodi con il gateway attraverso gli inserimenti delle finestre ricevute dopo la sua trasmissione.
- Classe C: tranne che durante la trasmissione, il nodo rimane nella modalità di ascolto pronto per la ricezione. Questa classe è una limitazione per i sistemi alimentati a batteria.

La distanza di comunicazione e il tempo di durata della trasmissione dei messaggi definiscono la velocità di trasmissione dei dati raggiunta. Pertanto, diverse velocità di trasmissione dei dati sono dovute alla diffusione della trasmissione dei nodi attraverso canali diversi. Le bande ISM a 868 MHz e 915 MHz funzionano in genere con larghezze di banda 125, 250 e 500 (BW). La velocità dei dati finale viene ottenuta in base a SF e BW scelti. Per BW = 7,8 kHz e SF = 12 è possibile trasmettere a 22 bps e per BW = 500 kHz e SF = 7, è possibile trasmettere fino a 27 Kbps. Anche il salto di frequenza è combinato per migliorare la mitigazione delle interferenze esterne. La Figura 49 presenta una rappresentazione degli stacks di protocolli LoRa e LoRaWAN.

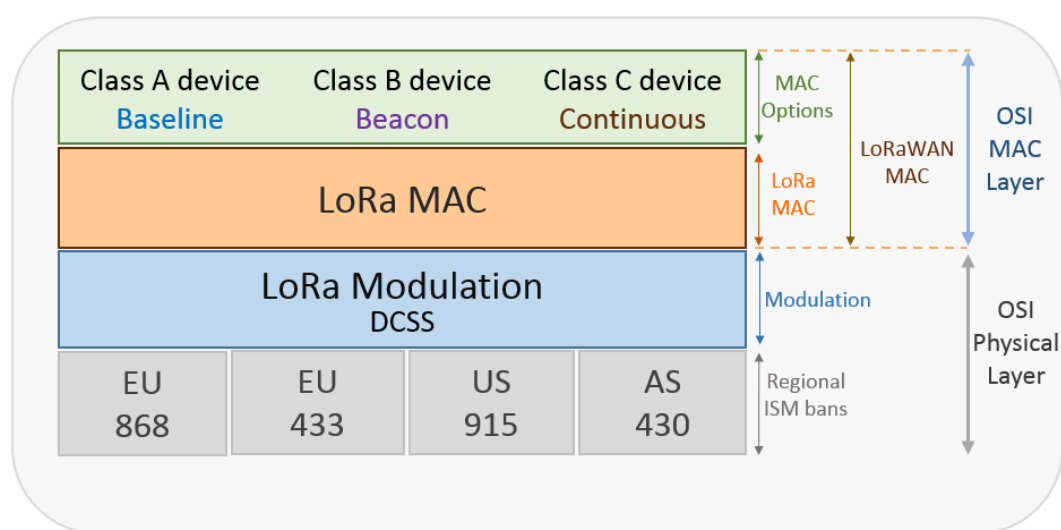


Figura 49 – Stack protocollare LoRa e LoRaWAN

La scalabilità di LoRaWAN è un grande vantaggio poiché può raggiungere fino a milioni di dispositivi a seconda di alcuni fattori. Tra questi fattori vi sono: lo scenario, la velocità media di transazione del messaggio, la dimensione media del messaggio trasmesso, il numero di canali LoRa utilizzati e il numero di canali GFSK utilizzati.

2.5.6.4 SigFox

SigFox è una tecnologia che porta una nuova strategia di rete e di informazione all'IoT. Denominato dal suo sviluppatore, un gruppo di Labège, in Francia, con lo stesso nome, SigFox è un attore IoT con un modello di business di un operatore di rete. Utilizzato da applicazioni che richiedono basse velocità di trasmissione dati, SigFox è anche classificato come protocollo LTN (Low Throughput Network), come definito da ETSI ERM TG28. Basato su una tecnologia Ultra Narrow Band (UNB), Sigfox utilizza una banda di trasmissione a 100 Hz nelle regioni ETSI e ARIB (Ente di regolamentazione delle industrie e delle imprese radio giapponesi) e una banda di trasmissione a 600 Hz nelle regioni FCC (Americhe e Oceania). Questa caratteristica consente una velocità dati di 100 bps e 600 bps nelle regioni ETSI e FCC, rispettivamente.

Lo stack del protocollo SigFox è composto da tre livelli principali: Frame, MAC e Physical layer.

La Figura 50 mostra il confronto tra SigFox e il modello di riferimento OSI. Sigfox opera sul vettore di banda ISM sub-GHz utilizzando 863–870 MHz in ETSI e ARIB (Europa e Giappone) e 902-928 MHz in FCC (Americhe e Oceania). La velocità in bit dipende dalla larghezza di banda di ciascuna regione.

In ETSI e ARIB, la larghezza di banda utilizzata per la trasmissione è di 100 Hz, quindi, in questo caso, la velocità in bit è di 100 bps. Nelle regioni FCC, l'occupazione della larghezza di banda di trasmissione a 600 Hz consente una velocità di trasmissione dati di 600 bps.

Le normative nelle regioni FCC, ETSI e ARIB determinano la potenza di trasmissione consentita in ciascun caso. Nelle regioni ETSI, la massima trasmissione di potenza è di 14 dBm per dispositivo per un massimo di due secondi di tempo di emissione e un totale di 140 messaggi al giorno. La stazione di trasmissione base Sigfox (BTS) può trasmettere fino a 26 dBm al massimo. I regolamenti nella regione FCC (America Latina e America, Stati Uniti e Asia) stabiliscono che ciascun dispositivo può trasmettere fino a 22 dBm con una trasmissione temporale massima di 0,346 secondi e un totale di 140 messaggi al giorno.

I BTS regolati FCC possono trasmettere fino a 30 dbm. Per superare le sfide con le interferenze del mezzo di trasmissione, nonché le collisioni di trasmissione inerenti al processo, la diversità si presenta

come uno strumento efficiente. Poiché non è necessario sincronizzare gli elementi di rete, i dispositivi possono utilizzare una frequenza casuale iniziale per la trasmissione e quindi inviare due repliche in modo casuale a diverse frequenze e a intervalli di tempo casuali. Questo meccanismo simultaneo di diversità di tempo e frequenza aumenta la robustezza contro le interferenze aumentando l'efficienza di ricezione.

Diversamente dai sistemi cellulari mobili, un terminale Sigfox non è collegato a una singola stazione base. Con una corretta distribuzione, il messaggio inviato da un terminale Sigfox può essere ricevuto da diverse stazioni base. Questa caratteristica è chiamata diversità spaziale che, unita alla diversità temporale e di frequenza delle ripetizioni, sono punti di forza nella tecnologia di concezione del protocollo Sigfox.

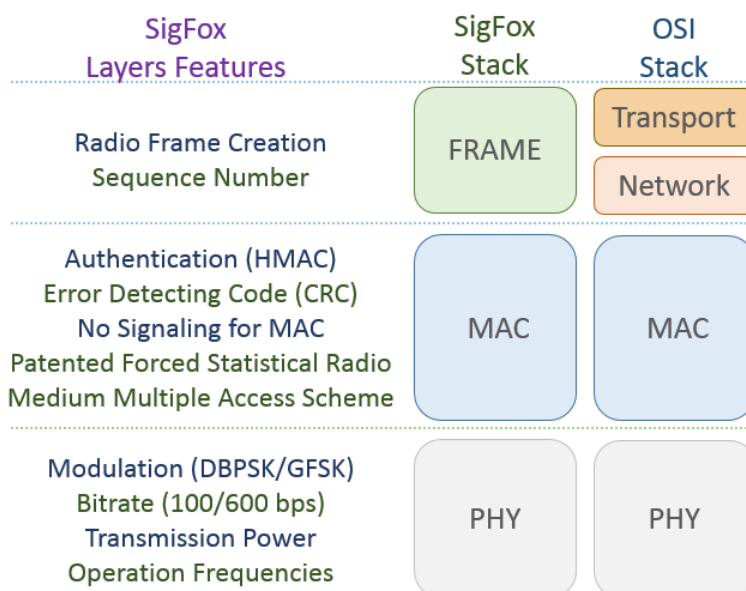


Figura 50 – Stack protocolle SigFox

I sistemi SigFox utilizzano la modulazione D-BPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) per l'uplink e la modulazione GFSK (Gaussian frequency shift keying) per il downlink. D-BPSK trasmette a 1 bps usando solo 1 Hz della banda operativa, il che significa che un singolo segnale utilizza solo una piccola parte della banda operativa, e quindi porta una maggiore efficienza nell'accesso allo spettro medio.

Le applicazioni che richiedono basse velocità di trasmissione dei dati, con dispositivi a basso costo, elevata disponibilità e facile implementazione, unitamente ai vantaggi di un budget elevato per i link, conducono l'uso della modulazione D-BPSK. Il suo strato fisico utilizza un modello proprietario di frequenza di salto e ripetizione del frame per evitare interferenze dei segnali ed è responsabile di determinare come saranno trasmessi i segnali SigFox.

Il livello fisico gestisce la modulazione utilizzata, il bit rate e il controllo della potenza di trasmissione, nonché l'occupazione delle risorse radio.

La tecnologia UNB viene identificata utilizzando una tecnica di accesso medio basata sul protocollo Aloha legacy chiamata Random-Multiple-Time Division (RFTDMA). Questa tecnica di accesso del mezzo non ha un metodo di controllo delle collisioni di accesso del mezzo, permettendo così ai terminali di accedere al mezzo in qualsiasi istante di tempo, a qualsiasi frequenza (all'interno della banda operativa), senza alcuna percezione preliminare di occupazione media. La tecnica RFTDMA favorisce il basso consumo energetico perché non utilizza energia per rilevare il mezzo prima della trasmissione. Non utilizza alcun tipo di pacchetto di sincronizzazione o tecnica beacon, il che favorisce anche il costo dei terminali dovuto alla non necessità di costosi circuiti oscillatori. Un'altra caratteristica è che nella RFTDMA le frequenze di trasmissione sono scelte in modo casuale ma entro un intervallo continuo. Uno svantaggio che può essere citato è la probabilità della collisione di pacchetti terminali che vengono trasmessi contemporaneamente.

Il livello Medium Access Control aggiunge un campo per l'identificazione del dispositivo e per la rilevazione degli errori. I dispositivi Sigfox non sono sincronizzati con la rete e possono trasmettere in qualsiasi momento perché Sigfox ha rimosso il medium access control dal suo concepimento. Lo scopo del livello frame è ricevere il payload proveniente dal livello applicazione; quindi, esegui la segmentazione e consegna i frammenti al livello MAC. Il livello MAC può identificare e ordinare la generazione dei frame radio con un numero di sequenza incluso. Come al solito sui sistemi UNB, ogni trasmissione occupa una semplice larghezza di banda di 100 Hz o 200 Hz dello spettro disponibile che consente un'elevata capacità per la rete SigFox.

L'alta resilienza si ottiene quando la potenza del segnale SigFox viene schiacciata in una larghezza di banda stretta a supporto di un comportamento migliore riguardo alle interferenze. La concentrazione di energia del segnale SigFox consente alle stazioni base di demodularlo facilmente, anche se vengono ricevuti simultaneamente segnali di interferenza più potenti e diffusi.

A seconda delle regioni globali, la potenza di trasmissione varia da 14 dBm (ETSI) fino a 22 dBm (FCC). UNB offre funzionalità a lungo raggio grazie alla modulazione D-BPSK oltre alla

trasmissione a bassa velocità di bit eseguita da SigFox. Ciò si traduce in un ricevitore per stazione base altamente sensibile. La sensibilità del ricevitore della stazione base varia in base alla velocità di trasmissione dei dispositivi. La sensibilità funziona intorno a -142 dBm per 100 bps e -134 dBm per velocità di trasmissione di 600 bps. Tale sensibilità offre un quota di collegamento molto elevata. La gamma di trasmissione raggiunta è definita dalle condizioni del canale, dalle interferenze e dal livello di rumore ricevuto. Con un sistema di irradiazione ad alto accoppiamento, il dispositivo può trasmettere fino a 16,15 dBm EIRP (potenza isotropica effettiva irradiata) con un guadagno dell'antenna di 5,15 dBi sulla stazione base. Con questa combinazione, la sensibilità del ricevitore ha un budget di collegamento da -142 dBm a 163,3 dBm. Per la trasmissione a 600 bps, la sensibilità del ricevitore della stazione base è inferiore di 8 dB a causa dell'alta velocità di trasmissione. Tuttavia, è compensato con una potenza di trasmissione dei dispositivi EIRP di 24,15 dBm.

La sensibilità tipica del dispositivo considerato come ricevitore è -126 dBm. I dispositivi sono liberi di trasmettere su qualsiasi portatore di banda operativo e le stazioni base sono pronte per ricevere da tutti i portatori in qualsiasi momento, consentendo ai dispositivi di funzionare con precisione a bassa frequenza.

SigFox ha adattato un protocollo leggero per gestire piccoli messaggi. Quando si tratta di trasmissioni di messaggi brevi, i protocolli convenzionali non sono adatti a causa degli overhead imposti dal loro design. Sigfox funziona con pacchetti da 26 byte che trasportano payload di dati a 12 byte. Ciò offre a Sigfox un'elevata efficienza di trasmissione rispetto ai suoi dati utili trasmessi, a fronte di 20 byte di intestazione Ethernet per trasportare gli stessi 12 byte più 52 bit complementari. I dati del payload che possono essere inseriti in un messaggio SigFox vanno da zero a 12 byte, costituendo una dimensione massima del pacchetto di 26 byte.

Con una dimensione del frame di protocollo leggero, ogni trasmissione ha meno dati da inviare, meno energia viene utilizzata e quindi la durata della batteria aumenta. La modulazione uplink è D-BPSK, la velocità in bit può essere 100 bps o 600 bps secondo le regole regionali e la potenza di trasmissione può arrivare fino a 22 dBm EIRP nella zona di configurazione radio numero due (RCZ2).

La topologia seguita da Sigfox è semplice. Segue un approccio topologico a stella in tutto il mondo.

Gli oggetti trasmettono i loro messaggi a una stazione base SigFox. I collegamenti punto a punto collegano una stazione base Sigfox al suo database Internet e quindi, dopo aver ricevuto e decodificato il messaggio, i dati vengono inviati al suo database Internet. Infine, il back-end cloud SigFox invia i messaggi ai server e alle piattaforme IT dei clienti attraverso le API (Application Programming Interface).

La procedura di comunicazione Downlink è attivata dal nodo di rete e pertanto non può essere trasmessa al dispositivo in qualsiasi momento. I dispositivi aprono la loro finestra di ricezione dopo una trasmissione, al fine di ricevere i pacchetti di downlink. Quando il dispositivo deve ricevere un messaggio di downlink, nel messaggio di uplink viene impostato un flag che richiede l'invio di un messaggio di downlink. Solo dopo l'invio di questo flag il dispositivo sarà pronto a ricevere il messaggio di downlink durante l'intervallo di tempo impostato per la ricezione dei messaggi di downlink. Questa procedura caratterizza l'invio di un messaggio di downlink a un dispositivo specifico. Per ricevere i messaggi broadcast, i nodi hanno una finestra temporale predefinita per attendere di ricevere i messaggi broadcast. Questa finestra di ricezione si apre dopo la trasmissione di ogni messaggio di uplink. Questa procedura riduce il consumo di energia senza richieste di comunicazione, che esenta l'uso del controllo della comunicazione di rete. Ciò semplifica il protocollo e consente una maggiore capacità di rete. Senza la necessità di segnalazione e controllo del traffico nel livello MAC, i nodi sono liberi di trasmettere in qualsiasi momento semplicemente uscendo dalla modalità di sospensione, trasmettendo e ritornando alla modalità di sospensione. La trasmissione viene quindi ripetuta altre due volte consecutive in portatori casuali al fine di evitare collisioni aumentando la capacità e la scalabilità. Altri aspetti che contribuiscono al basso consumo energetico sono il fatto che il payload del messaggio ha solo 12 byte che prolungano la durata delle batterie dell'elemento, riducendo il costo dei nodi e il basso numero di trasmissioni al giorno. La tecnica di modulazione combinata con alcune centinaia di Hertz che occupano la sua banda di frequenza operativa porta ad un'alta efficienza spettrale. La piccola larghezza di banda utilizzata nello spettro di frequenze disponibile contribuisce anche all'elevata capacità del sistema.

Grazie all'elevata sensibilità alla ricezione del gateway e alla capacità di trasmissione con un notevole livello di potenza, la tecnologia Sigfox raggiunge un'elevata quota di collegamento. È anche possibile migliorare le sue prestazioni regolando il suo sistema di irradiazione.

2.5.6.5 Protocolli a lungo raggio: discussione

Nel caso delle LPWAN presentate, i parametri principali che differiscono sono la gamma della distanza dei protocolli discussi. Miglioramenti, adattamenti e innovazioni si sono verificati principalmente a livello PHY mentre il livello MAC è stato regolato secondo necessità. La Figura 25 presenta un confronto tra i protocolli a lungo raggio studiati in quest'indagine.

Senza alcun controllo di potenza e meccanismi di regolazione della velocità di trasmissione, la modulazione LoRa stessa diventa inefficiente per le applicazioni che richiedono trasmissioni frequenti e velocità di trasmissione elevate (decine di kilobit o più). Grazie a queste caratteristiche, LoRa viene automaticamente superato dalla sua evoluzione, LoRaWAN. LoRaWAN migliora il

livello MAC con il meccanismo di controllo dell'alimentazione dividendo la modalità operativa dei dispositivi in classi e utilizzando velocità adattive dei dati (ADR).

SigFox è un'ottima scelta per le applicazioni che non richiedono elevate velocità di trasmissione dati e che richiedono un basso consumo energetico. L'efficienza di trasmissione presentata è dovuta all'elevata robustezza del collegamento, con una quota di collegamento superiore a 150 dBm in alcune regioni. Ciò garantisce robustezza contro le interferenze, grazie alla banda stretta occupata nella trasmissione. Lo svantaggio è la bassa velocità di trasmissione poiché Sigfox impiega molto tempo a trasmettere un messaggio. Questa caratteristica impone condizioni operative difficili per un'applicazione mobile supportata. In SigFox, LoRa e LoRaWAN, la capacità di uplink dipende dall'occupazione dello spettro e dalla quantità di messaggi trasmessi simultaneamente a uplink.

La capacità di questi sistemi non è limitata dal carico del traffico dati. La Figura 51 illustra le caratteristiche dei protocolli a lungo raggio.

Le tecnologie di rete cellulare esistenti sono ora fortemente messe alla prova dalle nuove applicazioni IoT che entrano nel loro ecosistema tecnologico. Le reti cellulari sono progettate per funzionare con il profilo del traffico vocale umano che ha un modello noto e prevedibile. Con l'avvento del traffico Internet, le reti mobili hanno dovuto adattarsi per soddisfare una domanda immediata e fluttuante per questo servizio.

Sulla base degli adattamenti apportati dalla rete LTE, le reti NB-IoT sono soluzioni eminenti per sfruttare l'infrastruttura di rete cellulare mobile esistente. NB-IoT emerge come una valida alternativa data l'infrastruttura di rete mobile disponibile e ben consolidata. Gli adattamenti apportati in LTE per supportare i servizi NB-IoT offrono un nuovo profilo del traffico dati, diverso dai servizi utente che richiedono velocità di trasmissione elevate. Poiché il traffico di dati da applicazioni H2H come audio, video e voce tende a migrare verso sistemi a capacità più elevata come il 5G, le funzionalità NB-IoT diventano più ampiamente disponibili. Questa è un'ottima alternativa agli operatori di telecomunicazioni poiché dispongono di un'infrastruttura 4G e non è compatibile con l'imminente 5G. Quindi, gli operatori di telecomunicazioni possono riutilizzare l'infrastruttura di rete disponibile per l'IoT, basata su NB-IoT, ed eseguire i propri investimenti per il 5G.

Sfidato dalle applicazioni IoT, non è sufficiente adattarsi. Ora, è necessario reinventare per supportare un nuovo profilo del traffico dati proveniente da oggetti con traffico, intervallo e caratteristiche basati sul tempo completamente diversi. Senza le definizioni dei parametri predefinite relative al ritardo del trasferimento dei dati, NB-IoT ha i suoi limiti quando utilizzato da sistemi che richiedono alcuni parametri di dipendenza dal tempo. Per soddisfare questa domanda, la tecnologia LTE CAT-M ha

portato a questo nuovo profilo di servizio una soluzione immediatamente implementata. Sebbene sembrano essere concorrenti, i protocolli LTE CAT-M e NB-IoT supportano servizi con requisiti diversi per i requisiti di tempo di trasferimento dei dati. Possono diventare una soluzione complementare. Anche se sono trattati come reti per lunghe distanze, le differenze tra le tecnologie LP-WAN e le tecnologie di rete mobile cellulare sono molto chiare.

Standard	NB-IoT	Cat-M	Cat-0	LoRaWAN	Sigfox
Frequency band	3GPP Licensed	3GPP Licensed	3GPP Licensed	LoRaWAN EU: 868MHz US: 433/915MHz AS: 430MHz	Sigfox EU: 868MHz US: 902MHz
Data rate	DL: 234.7 kb/s UL: 204.8 kb/s	UL / DL: 1 Mb/s	UL / DL: 1 Mb/s	22 b/s @BW=7.8 kHz / SF=12 27 kb/s @BW=500 kHz / SF=7 100kbps @ GFSK for Europe	100 bps (UL) 600 bps (DL)
Typical range	Deployment Driven 20 Km LOS	Deployment Driven ~ 5 Km	Deployment Driven ~ 5 Km	5 km (urban) 15 km LOS	15 Km LOS
TX power	23 dBm	23 dBm	23 dBm	EU: 13 dBm US: 20 dBm	EU: 14 dBm (ETS 300-220) US: 21.7 dBm
Bandwidth per channel	180 kHz	1.4 – 20 MHz	1.4 – 20 MHz	0.3 MHz: 863-870 MHz 2.16 MHz: 902-928 MHz	100 Hz (600 Hz USA)
Modulation	GFSK BPSK	OFDMA SC-FDMA	OFDMA SC-FDMA	Proprietary CSS	DBPSK (UL) GFSK (DL)
Transmission technique	FDD	FDD/TDD	FDD/TDD	FHSS (Aloha)	UNB
Topology	Star	Star	Star	Star of stars	Star
Battery operation	Many Years	Many Years	Many Years	Many Years	Many Years
Power saving mechanisms	PSM eDRX	PSM eDRX	PSM eDRX	3 devices classes operation	Deployment Driven
Packet length	Network Deployment Driven	Network Deployment Driven	Network Deployment Driven	255 Bytes	12 Bytes UL 8 Bytes DL
Security	NSA AES 256	AES 256	AES 256	AES CCM 128	Key Generation, Message Encryption, MAC Verification, Sequence
Licensing	Technology freely available for chip/device vendors. Network operators owns and manages its networks	Technology freely available for chip/device vendors. Network operators owns and manages its networks	Technology freely available for chip/device vendors. Network operators owns and manages its networks	Technology licensed by device vendors. No royalty to be paid by network operators	Technology freely available for chip/device vendors. Network operators pay royalty to SIGFOX (revenue sharing basis)
Scalability	Network Deployment Driven	Network Deployment Driven	Network Deployment Driven	> 10000	> 10000
Typical scenarios	M2M, Tracking, Smart Things, Point Of Sales (POS) terminals, Mobile Applications.	M2M, Tracking, Smart Things, Point Of Sales (POS) terminals, Mobile Applications.	M2M, Tracking, Smart Things, Point Of Sales (POS) terminals, Mobile Applications.	Network Configuration Building Automation and Security, Smart Metering, Land Agriculture, White Goods, Household Information Devices, Tracking, Positioning	Network Configuration Building Automation and Security, Smart Metering, Land Agriculture, White Goods, Household Information Devices, Tracking, Positioning

Figura 51 – Confronto tra protocolli Long-Range

Le forti differenze tra le architetture dei livelli PHY e MAC di questi due tipi di reti rendono difficile avere un confronto equo tra loro. Basi di confronto migliori potrebbero essere fornite considerando la stessa applicazione (o soluzione), implementata utilizzando entrambe le tecnologie.

In questo scenario in rapida evoluzione, l'emergere di nuove funzionalità, interoperabilità e aspetti prestazionali da studiare o convalidare è costante. Considerando la discussione qui presentata e le caratteristiche dei protocolli, vengono identificati i seguenti spunti di ricerca.

- Indipendentemente dalla tecnologia utilizzata in qualsiasi soluzione o applicazione, l'esposizione delle informazioni solleva sempre domande relative ai requisiti di sicurezza di ciascun protocollo, sottolineando che ogni soluzione richiede diversi aspetti della sicurezza. Al di là dell'ambito della sicurezza WSN fissa o mobile, da questo studio, l'uso della crittografia AES da parte della maggior parte dei protocolli è chiaro. Alcuni protocolli che non lo utilizzano hanno altri metodi per garantire la riservatezza dei dati a livello di livello MAC come la codifica proprietaria o il tipo di modulazione specifico del fornitore. Tecnologie proprietarie come Sigfox e Wireless-Hart garantiscono questa sicurezza mantenendo chiuse le loro funzionalità di sviluppo, limitando l'accesso alle loro tecniche. Sulla base delle informazioni presentate, è chiaro che, in termini di sicurezza, è necessario trattare i dati ai livelli superiori e integrare la sicurezza nel codice della soluzione, aspetti che meritano maggiore attenzione.
- Anche la capacità dei terminali di spostarsi tra le tecnologie è un argomento non trattato. La progettazione di sistemi ibridi come gateway multiprotocollo sembra essere una conseguenza inevitabile di queste eterogeneità del protocollo. La rapida evoluzione delle soluzioni hardware induce lo sviluppo di piattaforme e sistemi multiprotocollo, interfacce radio multibanda con tecniche adattive e opportunistiche come il 5G. È necessario che questi protocolli siano interoperabili in diversi livelli, consentendo confronti delle prestazioni. Ad esempio, nelle aree di roaming tra differenti tecnologie di protocollo, sistemi e operatori di rete, alleanze tecniche necessarie per ottenere un buon roaming transfrontaliero, compreso l'aspetto della sicurezza.
- Con l'attuale evoluzione, i dispositivi necessitano di diverse tecnologie di connettività. La stessa applicazione può utilizzare più di una tecnologia di connettività e il roaming dei terminali tra tecnologie può avvenire bruscamente. Una volta che l'aspetto del roaming tecnologico è diventato parte dello scenario, sorgerà la necessità di una verifica degli strumenti o delle soluzioni esistenti per portare la standardizzazione dell'interconnettività

al livello MAC. Pertanto, lasciando il livello dell'applicazione e le sue applicazioni, operando in modo trasparente e intrinsecamente alla tecnologia di protocollo utilizzata.

- Dal momento che esiste una tale eterogeneità, connettività e interconnessione, ci sono coesistenza, disputa per le risorse e interferenze. Sebbene siano stati fatti numerosi lavori sull'esecuzione di questi protocolli, poco è stato pubblicato su confronti pratici in scenari identici.

Questo confronto può evidenziare le capacità offerte da ciascun protocollo e indagare le loro caratteristiche in un ambiente coesistente. Poiché le bande ISM sono preferite dai protocolli LP-WAN, la loro coesistenza nello stesso scenario richiede ulteriori studi in modo da poter apprendere di più sulle interferenze inter-tecnologiche che possono degradare le loro qualità.

- Per ambienti e applicazioni più critici, come l'assistenza sanitaria e alcuni ambienti industriali, l'affidabilità può essere più importante di altre funzionalità. Servizi altamente affidabili possono sacrificare altre caratteristiche come la latenza. Gli studi sui meccanismi di "riconoscimento" dei dati richiedono flessibilità nelle dimensioni dei pacchetti utilizzati e reattività della rete a queste caratteristiche.
- Alcune tecniche o applicazioni, principalmente ai fini della piattaforma di gestione, dipendono ancora dalle funzioni di trasmissione e multicast ereditate dalle reti IP che devono ancora essere adattate o evolute. I canali di trasmissione, multicast e controllo sono anche aspetti emergenti che stanno mettendo in discussione le loro applicazioni senza molti studi specifici.

La diversità degli scenari applicativi e delle distribuzioni di rete interferiscono direttamente o indirettamente nelle prestazioni di ciascun protocollo. Le prestazioni del protocollo possono essere influenzate da fattori del messaggio di uplink, downlink fattori di messaggio, capacità di throughput, tolleranza di ritardo, dimensioni del payload, consumo di energia o persino il numero di elementi supportati dalla rete. Le applicazioni attuali e nuove giungono per esplorare e fornire input per nuovi studi e valutazioni riguardanti parametri di trasmissione, requisiti di temporizzazione, co-interferenza e parametri della piattaforma multiuso. I concetti vengono disgregati per seguire l'evoluzione dei bisogni dell'utente.

La coesistenza di sistemi nella stessa banda di frequenza merita attenzione e studi dettagliati a causa della crescita esplosiva di tecnologie che coesisteranno nello stesso spettro. Un esempio forte è la coesistenza dei protocolli Sigfox e LoRa che già richiedono studi di coesistenza. Alcuni aggiustamenti, che sono stati fatti per adattare le tecnologie attuali a quelle nuove, mentre si assiste alla domanda evolutiva, stanno generando competizione per le risorse.

Le reti di comunicazione M2M vengono utilizzate su dispositivi mobili come sistemi di pagamento. In alcuni casi, c'è un sacrificio di energia per ottenere un risultato migliore in un altro aspetto come latenza, tempi di consegna o velocità dei dati di trasmissione. C'è poca flessibilità per i protocolli di adattarsi a questi scenari.

Spesso, l'assenza di meccanismi di controllo può essere giustificata per quanto riguarda l'aspetto energetico. Poiché si tratta di nuove tecnologie in nuovi scenari per nuove applicazioni, molti parametri e capacità sono informati da studi e confronti teorici. L'implementazione e il funzionamento di queste nuove tecnologie possono presentare risultati ben oltre quelli proposti dalla tecnologia.

Lo studio condotto esplora le diverse caratteristiche della maggior parte dei protocolli di livello MAC utilizzati che sono stati adattati, evoluti o creati per soddisfare le crescenti esigenze e richieste delle nuove applicazioni IoT emergenti. Gli aspetti affrontati qui sono principalmente legati ai livelli fisico e MAC che offrono un panorama comparativo per quanto riguarda la copertura della gamma, i tassi di dati, la robustezza e gli aspetti di efficienza energetica.

La discussione illustra le diverse caratteristiche operative e prestazionali di ciascun protocollo per diverse applicazioni, all'interno dello stesso scenario, basate su diverse tecnologie di livello MAC.

La mancanza di interoperabilità tra i protocolli che mette in discussione la loro eterogeneità in diversi aspetti porta il paradigma dell'omogeneità alla sua rottura. Le caratteristiche di robustezza, copertura della distanza, velocità di trasmissione dei dati ed efficienza energetica sono aspetti che contribuiscono alla diversità del protocollo consentendo loro di offrire diverse applicazioni.

Infine, sono state presentate le caratteristiche del layer MAC da considerare nello sviluppo di piattaforme ibride o eterogenee. Questa interoperabilità può sempre essere ottenuta a livello di applicazione; tuttavia, l'interoperabilità degli strati inferiori può aumentare le prestazioni di dispositivi ibridi o eterogenei, principalmente in termini di consumo di energia.

2.5.7 Qualificazione del protocollo di comunicazione LoRa per piattaforme di monitoraggio strutturale

Il paradigma dell'Internet of Things (IoT) si riferisce all'estensione della rete Internet al mondo degli oggetti fisici ("cose"), incorporati in sensori, attuatori e altre tecnologie/piattaforme che consentono loro di evolversi e diventare più intelligenti e connessi ("cose intelligenti") [34]. Gli oggetti fisici possono essere qualsiasi cosa; essi possono percepire, monitorare, reagire all'ambiente e comunicare autonomamente le informazioni che elaborano e raccolgono ad altre oggetti intelligenti o servizi cloud. Una serie di oggetti intelligenti può interagire insieme per realizzare incredibili applicazioni

intelligenti che migliorano l'esperienza, la qualità della vita e la sicurezza degli utenti [35]. Il servizio più semplice fornito dall'IoT è la possibilità di controllare e monitorare in remoto l'ambiente fisico sulla rete Internet. Ad esempio, grazie all'IoT è oggi possibile monitorare facilmente la frequenza cardiaca, gestire l'illuminazione domestica, controllare la disponibilità del parcheggio e molto altro ancora [36]. Le applicazioni IoT stanno cambiando rapidamente ambienti ed ecosistemi, dando origine a città intelligenti, smart grid, industria intelligente, comunità intelligenti, ecc. Le opportunità offerte dall'IoT sono infinite, poiché l'IoT può rendere tutto intelligente (Internet of Everything – IoE) [37].

Concentrandosi su una prospettiva di rete, l'IoT può essere descritto come un'infrastruttura di rete eterogenea, cablata o wireless, in grado di garantire esigenze molto diverse rispetto alla rete Internet tradizionale. In particolare, mentre la rete internet è progettata per trasferire testi massicci, immagini e video in streaming (cioè, applicazioni che richiedono un'ampia larghezza di banda), nel paradigma IoT la situazione è ribaltata: nei dispositivi con risorse hardware limitate e alimentati da batteria, tali sensori e attuatori devono trasmettere solo pochi byte (relativamente, ad esempio, a misure di temperatura, umidità, ecc.) con una velocità dati inferiore. Per far fronte a questi vincoli, emergono diverse nuove specifiche leggere del protocollo di rete: un collegamento wireless con l'obiettivo di ridurre il cablaggio; larghezza di banda stretta; e bassa potenza, adatto per dispositivi IoT a basse prestazioni [38]

2.5.7.1 Stato dell'arte

Attualmente, i protocolli wireless possono essere suddivisi approssimativamente in breve e lungo raggio. I protocolli a corto raggio coprono distanze fino a 1 km senza ostacoli (Bluetooth LE, ZigBee, Wi-Fi, WirelessHart) e vengono utilizzati essenzialmente per applicazioni indossabili e smart home. I protocolli a lungo raggio sono invece in grado di coprire lunghe distanze, fino a 15 km in alcuni casi. I protocolli a lungo raggio sono suddivisi in spettro senza licenza (SigFox, LoRa) e concesso in licenza (GSM, 3G, 4G, LTE-M, NB-IoT, 5G). SigFox, LoRa e NB-IoT sono caratterizzati da bassa potenza e sono quindi definiti protocolli LPWAN (LowPower Wireless AreaNetwork). Nei sistemi LPWAN, il basso consumo energetico si ottiene garantendo che la comunicazione possa essere avviata solo dal dispositivo finale IoT e non dal server. In questo modo, il dispositivo IoT non ha bisogno di consumare energia elettrica ascoltando continuamente una possibile comunicazione dal server. Le prestazioni richieste su lunghe distanze possono essere ottenute sfruttando schemi di modulazione che rendono la comunicazione estremamente resistente alle interferenze e al rumore. Pertanto, gli LPWAN sono ideali per applicazioni che coinvolgono sensori a bassa potenza che inviano piccole quantità di dati su lunghe distanze. Diversamente da NB-IoT, LoRa e SigFox operano

in spettro senza licenza e i propri dispositivi hanno diritto di trasmettere senza richiedere alcuna commissione. Tutti questi aspetti positivi contribuiscono a renderle reti adeguate a sviluppare applicazioni IoT su larga scala, in modo da essere considerate tecnologie abilitanti effettive per l'IoT. Grazie alla sua versatilità, la tecnologia di comunicazione LoRa sta emergendo come leader tra gli LWPAN; tale protocollo è stato, quindi, scelto per la realizzazione della piattaforma di monitoraggio di ponti e gallerie, oggetto del progetto INSIST.

Tuttavia, ogni volta che una nuova applicazione viene aggiunta nella stessa area di altre, sono inevitabili fenomeni di interferenza, specialmente quando lo spettro dello standard di comunicazione adottato occupa bande di frequenza senza licenza. Le interferenze e il rumore hanno un impatto diretto sulle prestazioni dei dispositivi IoT perché i dati trasmessi possono andare persi e l'autonomia operativa del dispositivo e la durata della batteria possono diminuire. Per qualificare il protocollo di comunicazione della piattaforma di monitoraggio, è necessario valutare e certificare la capacità dei dispositivi IoT impiegati per la misurazione delle grandezze nelle strutture di interesse di fornire prestazioni wireless funzionali in diversi ambienti RF, testandone la robustezza a segnali o rumori previsti e indesiderati/interferenze. Tuttavia, caratterizzare solo il livello fisico (PHY) non si rivela appropriato per determinare in che modo le degradazioni del segnale influenzano il comportamento dei livelli superiori e le prestazioni. Allo stesso modo, la valutazione solo dei parametri chiave di livello superiore non fornisce alcuna informazione utile per risolvere possibili problemi al livello PHY vulnerabile. Pertanto, l'attività di ricerca mira attualmente ad andare oltre un approccio di misurazione a singolo livello per stabilire come e in quale misura la presenza di interferenze e rumore può influenzare le prestazioni complessive del collegamento wireless LoRa.

2.5.7.2 Analisi del protocollo LoRa

La tecnologia LoRa è una tecnologia di trasmissione wireless con un consumo energetico molto basso e viene utilizzata per trasmettere piccole quantità di dati su lunghe distanze (fino a 15 km). LoRa utilizza la modulazione CSS (Chirp Spread Spectrum) per la trasmissione dei dati, che consente anche a segnali estremamente piccoli, nascosti nel rumore, di essere demodulati dal ricevitore [39] (Fig. 26). In una modulazione CCS, il segnale portante è un chirp. Ogni chirp rappresenta un simbolo e la sua durata è il tempo del simbolo. La trasmissione dei dati è una sequenza cronologica di impulsi chirp in aumento e in calo. La larghezza di banda di frequenza dell'impulso è equivalente alla larghezza di banda spettrale del segnale. A differenza dello spettro nella modulazione DSS (Direct sequence Spread Spectrum), il CSS usa impulsi chirp invece di sequenze di codice pseudo-casuali per la diffusione della frequenza. Il fattore di diffusione (SF) è il numero di bit codificati per simbolo (che vanno da 7 a 12). Ad esempio, se SF è 7, allora è possibile trasmettere 7 bit su un simbolo, 256

modelli diversi; se SF è 8 è possibile trasmettere 8 bit, 512 modelli diversi e così via, fino a una SF uguale a 12. La frequenza iniziale del chirp rappresenta i valori assunti dal simbolo. Le prestazioni di comunicazione LoRa possono essere ottimizzate variando diversi parametri di impostazione PHY: larghezza di banda (BW); Spreading Factor (SF); Code Rate (CR); potenza di trasmissione; lunghezza del preambolo; header implicito o esplicito; e la lunghezza del payload. BW può assumere tre valori diversi: 125; 250; e 500 kHz [40]. Maggiore è il valore di BW, maggiore è la velocità dei dati per la trasmissione dei pacchetti, ma minore è la sensibilità del ricevitore e l'intervallo di comunicazione. Maggiore è l'SF, minore è il rapporto segnale/rumore che deve essere garantito per comunicazioni affidabili (Tabella 1). Pertanto, con l'aumentare della distanza tra trasmettitore e ricevitore, SF deve essere aumentata e BW ridotta, a discapito di pacchetti più lunghi e quindi di un maggiore consumo energetico.

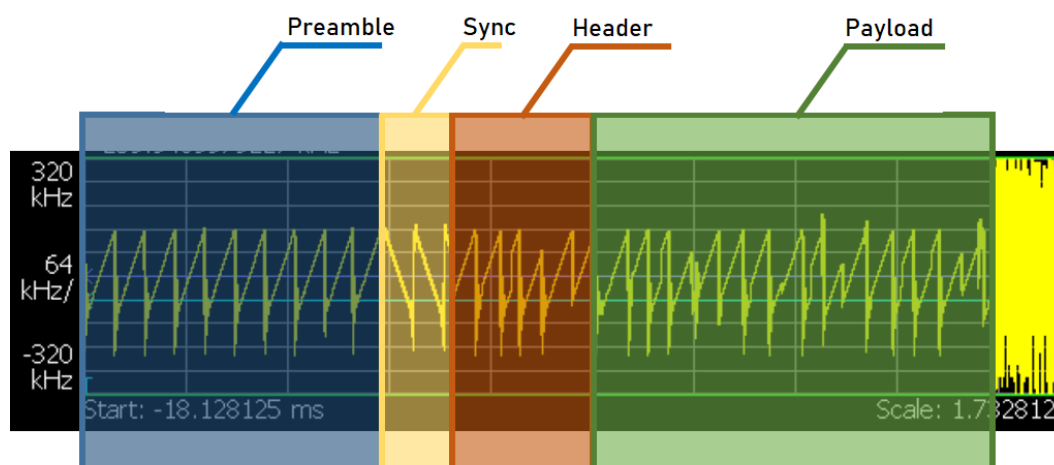


Figura 52 – Livello fisico PHY di una trasmissione LoRa

Il Code Rate (CR) protegge il segnale LoRa dai segnali burst di interferenza. Più grande è il valore di CR, maggiore è la robustezza. Tuttavia, per quanto riguarda l'SF, maggiore è il valore del CR, più lungo è il pacchetto e maggiore è l'energia richiesta per la trasmissione a parità di informazione trasferita. CR può assumere valori come 4/5, 4/6, 4/7, 4/8. Ad esempio, nella tabella 2, viene riportata la durata dei pacchetti, espressa in ms, rispetto a BW e SF, con CR=4/5, intestazione implicita, controllo ciclico della ridondanza (CRC)=1 e payload=10 byte [41]. Come si può apprezzare, ogni incremento unitario di SF corrisponde al raddoppio del tempo del simbolo.

Tabella 7 – Rapporto segnale/rumore minimo (SNR) per garantire demodulazione del segnale basata sui valori SF.

SF	Limite SNR (dB)
7	-7.5
8	-10
9	-12.5
10	-15
11	-17.5
12	-20

Tabella 8 – Valori di Tpacket (tempo totale di trasmissione del pacchetto LoRa), espresso in ms, rispetto a BW e SF, con CR = 1, header implicita (IH = 1), CR = 1, controllo di ridondanza ciclico (CRC) = 1, payload di 10 byte.

	SF					
BW	7	8	9	10	11	12
125	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

2.5.7.3 Metodo di misurazione crosslayer (a più livelli)

Un approccio di misurazione interstrato consente una valutazione efficiente delle prestazioni delle reti di comunicazione. Per un dispositivo IoT, l'interferenza può degradare gravemente l'integrità del segnale a livello PHY, il che a sua volta può compromettere le prestazioni dell'applicazione IoT e causare una diminuzione della durata della batteria a causa della necessità di ritrasmettere i pacchetti persi ([42]-[43]). Inoltre, la ritrasmissione dei pacchetti può causare il superamento del *duty-cycle* massimo, definito come la percentuale massima di tempo durante la quale un dispositivo finale può occupare un canale (valore pari all'1% nell'UE 868 per i dispositivi finali). L'approccio di misurazione *cross-layer* offre l'opportunità di correlare sperimentalmente i valori che caratterizzano le principali quantità di livello PHY a quelle assunte dai principali parametri di livello superiore, fornendo così informazioni utili per risolvere possibili problemi ai livelli PHY vulnerabili ([44]-[46]).

L'approccio cross-layer proposto può essere di grande aiuto sia nelle fasi di progettazione che di manutenzione di un ciclo di vita della rete IoT wireless. Nella fase di progettazione, le misurazioni effettuate allo strato PHY sono utili per caratterizzare le proprietà del canale wireless. Una volta che la rete è operativa, le misurazioni interstrato possono essere sfruttate in modo efficiente per raccogliere informazioni sulle possibili cause della degradazione della qualità del servizio (QoS) quando quest'ultima viene osservata a strati superiori. Come detto sopra, la tecnologia LoRa adotta uno schema CSS particolarmente robusto per l'interferenza del segnale a banda stretta, mentre è debole quando si hanno interferenze provenienti da altri nodi LoRa che non sono perfettamente ortogonali (stesso SF) o quando l'interferenza è dovuta a segnali modulati con ampia larghezza di banda e spettro *noise-like*. Pertanto, l'attenzione degli autori è stata focalizzata sulla correlazione tra PLR, un noto parametro chiave di livello superiore, e valori che caratterizzano grandi quantità di PHY, come diverse configurazioni del segnale LoRa e potenze AWGN intenzionali. Di seguito vengono forniti dettagli sul banco di prova e sulla procedura operativa dello scenario di misurazione considerato.

2.5.7.4 Configurazione di misura

Gli esperimenti sono stati condotti utilizzando una specifica configurazione di misurazione, emulando uno scenario comune. La configurazione di misura è composta da: (i) un collegamento wireless con tecnologia LoRa, realizzato da due board SX1272 LoRa Semtech, che fungono rispettivamente da LoRa Transceiver e LoRa Receiver; (ii) la sorgente AWGN, per emulare i tipici fenomeni di interferenza di un ambiente reale che corrompe la comunicazione (Fig. 27). L'interferenza AWGN è generata da un generatore di segnale e convogliata nella direzione del ricevitore LoRa tramite un'antenna a tromba collegata al generatore di segnale attraverso un cavo coassiale.

La potenza AWGN è opportunamente variata al fine di valutare la comunicazione LoRa a diversi livelli di SNR (misurata vicino al ricevitore LoRa). Il segnale al ricevitore LoRa viene catturato da un'antenna omnidirezionale, che è collegata all'analizzatore di spettro in tempo reale attraverso un cavo coassiale. Le misurazioni vengono effettuate secondo un approccio cross-layer. In particolare, vengono considerati i seguenti parametri: configurazione del segnale LoRa (SF, Bw, CR, CRC, Preambolo, Intestazione, Lunghezza payload) e rapporto segnale-rumore (SNR) a livello PHY, rapporto di perdita di pacchetti (PLR) al Layer di trasporto. Gli esperimenti sono stati condotti all'interno di un ambiente protetto e controllato, cioè una camera semianecoica schermata conforme ai requisiti di compatibilità elettromagnetica. La camera semianecoica riduce o elimina l'influenza sulle misurazioni dei fenomeni di perturbazione nel canale di propagazione come dissolvenza, ombra e multipercorso, rendendo così l'analisi focalizzata solo sugli effetti causati dalla sovrapposizione

dell'interferenza AWGN sull'utile segnale LoRa. Di seguito, la procedura di misurazione è descritta in base a quanto indicato nella fig. 2. In primo luogo, tramite dispositivi PC1 e PC2, i dispositivi Tx e Rx LoRa sono impostati con i valori desiderati dei parametri di configurazione, stabilendo così le caratteristiche del livello PHY del canale di comunicazione wireless LoRa. Inoltre, PC1 imposta anche il generatore di segnale per fornire l'interferenza AWGN, con il livello di potenza desiderato. Una volta completata la configurazione del banco di prova, SNR viene stimata in due fasi, una campagna di misurazioni preliminari effettuata con il supporto dell'antenna omnidirezionale posizionata vicino all'antenna LoRa Rx e collegata all'analizzatore di spettro in tempo reale. Nella prima fase, la potenza utile del segnale all'interno del canale wireless LoRa viene misurata durante l'unica trasmissione dati LoRa tra dispositivi LoRa Tx e Rx. Nella seconda fase, il livello di potenza di interferenza AWGN sul lato ricevitore, sempre all'interno del canale wireless LoRa, viene misurato con l'unica interferenza AWGN attivata.

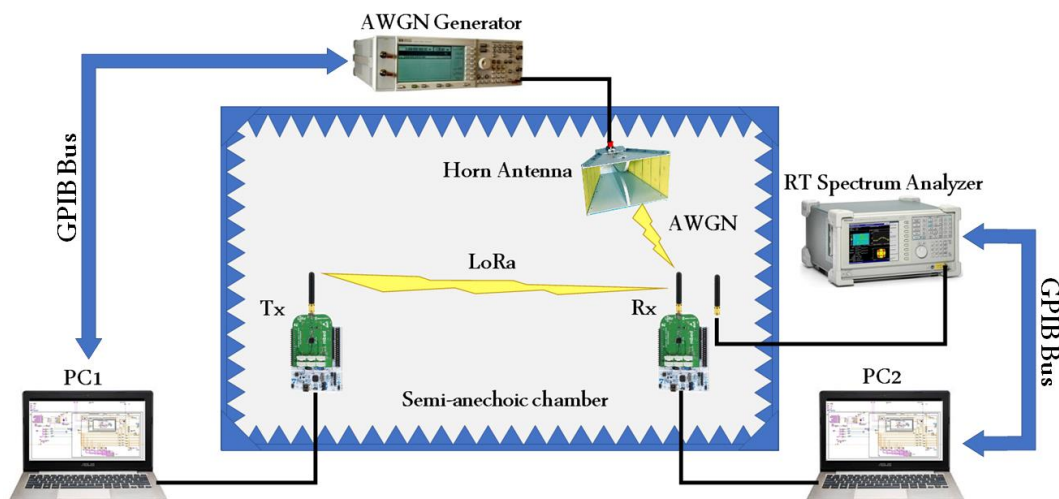


Figura 53 – Configurazione della misurazione a più livelli

Il valore misurato della potenza utile del segnale LoRa (P_s) e il livello di potenza di interferenza AWGN, P_I , vengono infine utilizzati per calcolare l'SNR sul lato ricevitore per la configurazione considerata secondo:

$$SNR = \frac{P_S}{P_I} \quad (2)$$

Infine, il PLR è stimato su 10000 pacchetti trasmessi. In particolare, il LoRa Tx trasmette i 10000 pacchetti LoRa in successione al LoRa Rx, che riceve il segnale rumoroso. I pacchetti inviati vengono enumerati con un numero di identificazione incrementale da 0 a 9999 a livello di applicazione superiore. Queste informazioni sono incluse nel payload. LoRa Rx demodula i pacchetti ricevuti ed estrae il numero di identificazione dal payload. Una stazione di misura automatica in LabVIEW, in grado di effettuare un controllo sul valore ricevuto, calcola il numero di pacchetti persi durante la comunicazione. Il rapporto di perdita di pacchetti è espresso in percentuale rispetto al numero totale di pacchetti inviati. Per eseguire una caratterizzazione esaustiva del ricevitore LoRa, questa procedura di misurazione deve essere ripetuta passo dopo passo per ogni possibile configurazione del segnale LoRa e per diversi valori del livello di potenza AWGN. È necessario un esperimento fattoriale completo. Tuttavia, questa attività di caratterizzazione richiederebbe uno sforzo notevole ed è molto lunga. Potrebbe influire negativamente sui costi di produzione dei dispositivi IoT. Per superare la limitazione considerata, gli autori propongono di adottare un'analisi di Central Composite Design (CCD), che consente di ridurre il numero di esperimenti necessari senza perdita di informazioni significative.

2.5.7.5 Progettazione degli esperimenti

Un Central Composite Design (CCD) è un progetto sperimentale tipicamente utilizzato nella metodologia della superficie di risposta. Il CCD consente di costruire un modello polinomiale quadratico di secondo ordine, in grado di correlare una o più variabili di processo (fattori) con una o più variabili di risposta, senza dover eseguire un esperimento fattoriale completo [47]. Nel CCD, i fattori coinvolti sono testati a cinque livelli per ottenere la "rotazione" del progetto e i valori delle quantità di input sono codificati in un intervallo unitario arbitrario: $[-\alpha, -1, 0, 1, \alpha]$, dove 0 corrisponde al valore medio del fattore considerato ($\overline{X_M}$); $\pm\alpha = \pm 2^{k/4}$ per l'estremità dell'intervallo ($+\alpha = X_{MAX} - \alpha = X_{MIN}$), k è il numero dei fattori. Una relazione semplice consente di determinare i valori effettivi corrispondenti a codici ± 1 . La "rotazione" garantisce una varianza costante nei punti equidistanti dal punto centrale, e quindi fornisce la stessa precisione della stima della risposta in qualsiasi direzione del progetto. Il numero limitato di esperimenti è l'unione di tre punti di progettazione distinti (cioè la configurazione dei parametri in ogni esperimento): (i) punti centro; punti assiali ($2k$ esperimenti); punti fattoriali (2^k esperimenti). I punti centro coinvolgono i valori medi di ogni fattore e sono un insieme di esperimenti ripetuti sfruttati per stimare sia la ripetibilità

che la riproducibilità dell'esperimento. L'insieme dei punti assiali emula un'analisi a un fattore alla volta. Le quantità degli esperimenti sui punti assiali sono le stesse dei punti centrali (i valori medi dei fattori), ad eccezione di uno di essi che assume un valore massimo o minimo. I punti assiali sono anche usati per stimare i coefficienti dei termini quadratici. L'ultimo punto da indagare sono i punti fattoriali, usati per stimare i coefficienti dei termini lineari e le interazioni tra i fattori sulla variabile di risposta. Ad esempio, nella Figura 54 viene mostrata la rappresentazione grafica del disegno CCD costituita da due fattori, X_1 e X_2 , su cinque livelli. Per due fattori $\alpha = \sqrt{2} = 1.414$. Una volta effettuati gli esperimenti indicati dal CCD, le misurazioni ottenute possono essere utilizzate per identificare l'intera superficie di risposta applicando una tecnica di regressione lineare (Eq. 3):

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \dots + \beta_{kk} X_k^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \dots + \beta_{k-1,k} X_{k-1} X_k + \varepsilon \quad (3)$$

dove y è la risposta misurata, β sono i regressori, $X_1, X_2, \dots, X_k$ sono le variabili sperimentali (k è il numero di fattori) e ε indica l'errore residuo associato al modello.

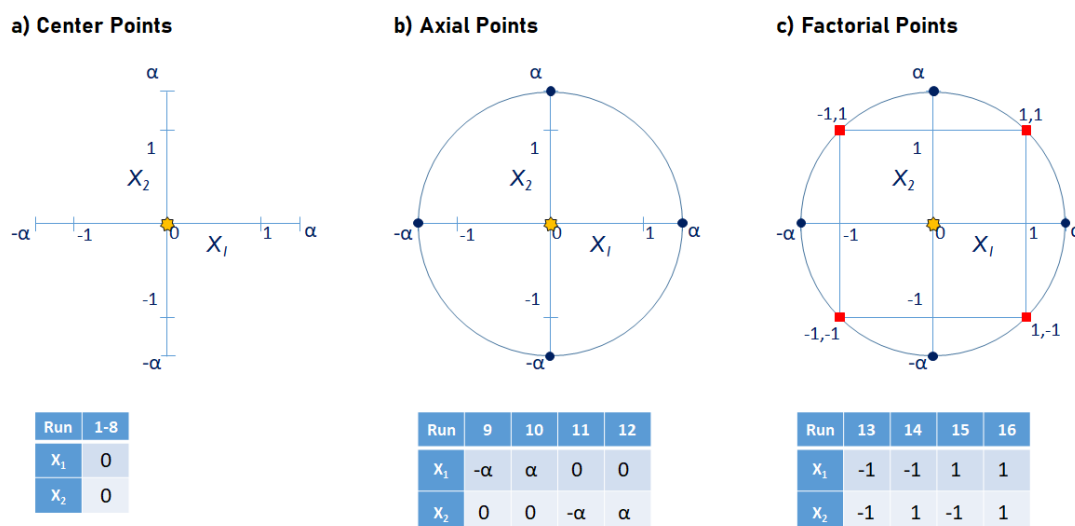


Figura 54 – Rappresentazione grafica della progettazione CCD di due fattori, X_1 e X_2 , su cinque livelli.

(a) Punti di centro (indicati da marker stella-gialli); b) punti assiali (indicati da marker blu); (e)Punti fattoriali (indicati marker quadrati rossi)

2.5.7.6 Risultati sperimentali

La valutazione delle prestazioni di LoRa è stata effettuata applicando la tecnica CCD e considerando 4 fattori: SF; Bw; CR e SNR. Al contrario, i valori di Lunghezza Preambolo (PL), Intestazione, CRC e Payload, sono stati fissati ai seguenti valori: PL=1 byte; Header=Explicit; CRC=Abilitato; Payload=1 byte, rispettivamente.

Per un CCD a 4 fattori, $\pm\alpha = \pm 2^{k/4} = \pm 2$. Pertanto, l'intervallo unitario arbitrario è: [-2, -1, 0, 1, 2]. L'esecuzione del CCD a 4 fattori richiede di eseguire solo 36 esperimenti invece del 625 associato a un esperimento fattoriale completo, con una conseguente notevole riduzione del carico sperimentale. Tuttavia, l'applicazione del CCD alla caratterizzazione della tecnologia wireless LoRa, in presenza di rumore, implica una certa approssimazione poiché i fattori coinvolti possono assumere solo valori discreti nell'intervallo di definizione. Ad esempio, il fattore CR può assumere solo 4 valori effettivi: 1;2;3;4, mentre CCD richiede almeno cinque valori. Secondo l'analisi CCD, il valore massimo dell'intervallo effettivo (uguale a 4) corrisponde al valore codificato massimo dell'intervallo arbitrario (uguale a 2), e il valore minimo dell'intervallo effettivo (uguale a 1) è associato al valore codificato minimo dell'intervallo arbitrario (uguale a -2); l'analisi CCD restituisce cinque configurazioni sperimentali che non sono accettabili e selezionabili per il fattore CR : [1, 1.75, 2.5, 3.25, 4]. Per superare la limitazione considerata, questi valori sono stati arrotondati all'intero disponibile più vicino, ottenendo così, per il fattore CR, i cinque livelli dell'intervallo effettivo: [1, 2, 3, 3, 4]. Lo stesso approccio è stato applicato per eseguire valori adeguati per i fattori Bw. Nella seguente Tabella 9 vengono mostrati i valori consentiti, i valori restituiti dall'analisi CCD e i valori arrotondati dei fattori Bw e CR, utilizzati per eseguire i punti di progettazione.

Tabella 9 – I valori consentiti, i valori restituiti dall'analisi CCD e i valori arrotondati dei fattori Bw e CR, utilizzati per eseguire i punti di progettazione.

<i>Fattore</i>	<i>Valori consentiti</i>	<i>Cinque valori restituiti dall'analisi CCD</i>	<i>Cinque valori arrotondati</i>
<i>Bw</i>	[125, 250, 500]	[125, 219, 313, 406, 500]	[125, 250, 250, 500, 500]
<i>Cr</i>	[1, 2, 3, 4]	[1, 1.75, 2.5, 3.25, 4]	[1, 2, 2, 3, 4]

Per quanto riguarda i parametri di configurazione SF, che possono assumere 6 valori diversi, a differenza di Bw e CR, l'intervallo a cinque livelli è stato ottenuto abbinando il valore 11 della SF con il valore codificato massimo dell'intervallo arbitrario (uguale a 2) e il valore 7 dell'SF con il valore codificato minimo dell'intervallo arbitrario (uguale a -2). Pertanto, i cinque livelli del fattore SF utilizzati nell'analisi CCD sono: 7; 8; 9; 10; 11. I cinque livelli adottati per il fattore SNR sono: -15; -10; -5; 0; 5; (dB).

Nella Tabella 10 sono riportati i risultati sperimentali ottenuti per ciascun punto assiale ($2 \times 4 = 8$ esecuzioni) dell'analisi CCD. Come detto sopra, i punti assiali coinvolgono una configurazione sperimentale caratterizzata da un parametro alla volta, uguale al valore estremo mentre tutti gli altri sono impostati sul loro valore medio.

Le esecuzioni indicate come 1 e 2 nella Tabella 10 si riferiscono ai risultati effettuati variando il livello SNR dal valore minimo di $\text{SNR} = -15$ dBm al valore massimo di $\text{SNR} = 5$, con SF, Bw, CR impostato sul proprio valore medio, $\text{SF} = 9$, $\text{Bw} = 250$, $\text{CR} = 2$. Questi esperimenti, insieme a quelli dei punti centrali mostrati nella tabella 6 successiva, evidenziano l'effetto negativo di degradazione dell'SNR sul numero di pacchetti persi. Il numero di pacchetti persi è 0% quando SNR è maggiore di zero ($\text{SNR} \geq 5$); 16,39% in media quando SNR è -5 dB, e 34,6 % in presenza di SNR pari a -15dB, cioè quest'ultimo caso è anche il caso peggiore tra tutti quelli analizzati. Le esecuzioni 3 e 4 evidenziano che aumentando l'SF da livelli bassi ($\text{SF} = 7$) a livelli elevati ($\text{SF} = 11$), può notevolmente ridurre il numero di pacchetti persi, anche in presenza di livello AWGN pari a -5 dBm. Infatti, in questo esperimento, i pacchetti persi diminuiscono dal 26,1% allo 0,1%, che è vicino allo zero, quando SF aumenta da 7 a 11.

Al contrario, considerando le esecuzioni 5 e 6, il numero di pacchetti persi cresce drasticamente dallo 0,05% al 26,2% quando SNR e SF sono invariati ($\text{SNR} = -5$ dB, $\text{SF} = 9$) e la larghezza di banda aumenta dal valore minimo di 125 kHz al valore massimo di 500 kHz. Vale la pena notare che maggiore è la larghezza di banda, peggiore è la comunicazione, secondo le specifiche base di LoRa.

Inoltre, si può osservare che aumentando il CR (esecuzioni 7 e 8), mentre altri parametri sono invariati, si ottiene un miglioramento meno significativo della perdita di pacchetti rispetto al miglioramento che è possibile ottenere aumentando l'SF o riducendo la larghezza di banda. I pacchetti persi diminuiscono dall'11,5% al 6,8%, quando CR aumenta da 1 a 4.

Tabella 10 – Risultati sperimentali ottenuti per ogni progetto di punto assiale dell'analisi CCD.

<i>Esecuzione</i>	<i>SNR</i>	<i>SF</i>	<i>BW</i>	<i>CR</i>	<i>TX</i>	<i>PACCHETTI PERSI</i>	<i>PACCHETTI PERSI (%)</i>
<i>1</i>	<i>-15</i>	<i>9</i>	<i>250</i>	<i>2</i>	<i>10.000</i>	<i>3460</i>	<i>34,6</i>
<i>2</i>	<i>5</i>	<i>9</i>	<i>250</i>	<i>2</i>	<i>10.000</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>3</i>	<i>-5</i>	<i>7</i>	<i>250</i>	<i>2</i>	<i>10.000</i>	<i>2610</i>	<i>26,1</i>
<i>4</i>	<i>-5</i>	<i>11</i>	<i>250</i>	<i>2</i>	<i>10.000</i>	<i>10</i>	<i>0,1</i>
<i>5</i>	<i>-5</i>	<i>9</i>	<i>125</i>	<i>2</i>	<i>10.000</i>	<i>5</i>	<i>0,05</i>
<i>6</i>	<i>-5</i>	<i>9</i>	<i>500</i>	<i>2</i>	<i>10.000</i>	<i>2620</i>	<i>26,2</i>
<i>7</i>	<i>-5</i>	<i>9</i>	<i>250</i>	<i>1</i>	<i>10.000</i>	<i>1150</i>	<i>11,5</i>
<i>8</i>	<i>-5</i>	<i>9</i>	<i>250</i>	<i>4</i>	<i>10.000</i>	<i>680</i>	<i>6,8</i>

Nella Tabella 11 sono riportati i risultati sperimentali ottenuti per ogni progettazione fattoriale dell'analisi CCD. Le esecuzioni da 9 a 16 evidenziano la robustezza della tecnologia wireless LoRa rispetto al rumore gaussiano bianco quando vengono selezionati alti livelli di SF a livello PHY. L'elevato livello di SF (≥ 10) consente di ottenere le migliori prestazioni, infatti, anche con una larghezza di banda elevata, o basso CR, il valore di PLR è vicino allo zero.

Nella tabella 6 sono riportati i risultati sperimentali ottenuti per ogni progetto di punto centrale dell'analisi CCD. Per il punto centrale restituito dall'analisi CCD sono state eseguite dodici misurazioni ripetute. Di conseguenza, è stato ottenuto un tasso medio di pacchetti persi pari al 16,3 % ed è stata ottenuta una deviazione standard del 2,3 %.

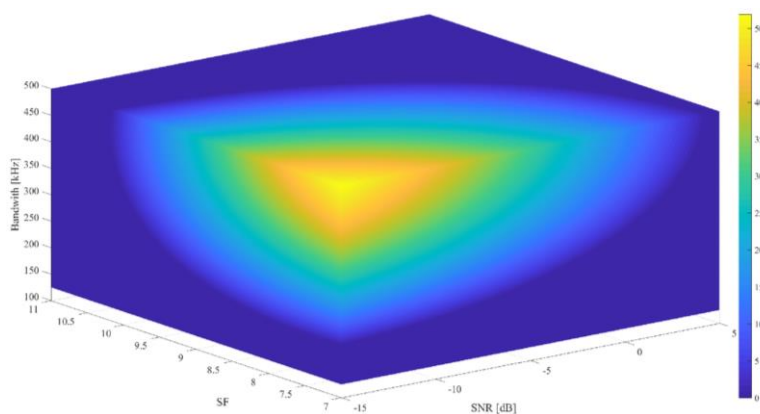
Infine, applicando una tecnica lineare di regressione, il modello è stato identificato e l'intera superficie di risposta ricostruita. Nella Figura 55 e nella Figura 56 la superficie di risposta ricostruita rispettivamente per CR=1 e CR=4 viene visualizzata mediante un grafico 3D.

Tabella 11 – Risultati sperimentali ottenuti per ogni punto di progettazione fattoriale dell'analisi CCD.

<i>Esecuzioni</i>	<i>SNR</i>	<i>SF</i>	<i>BW</i>	<i>CR</i>	<i>TX</i>	<i>PACCHETTI PERSI</i>	<i>PACCHETTI PERSI (%)</i>
9	-10	8	125	1	10.000	100	1
10	-10	8	125	3	10.000	20	0,2
11	-10	8	500	1	10.000	3066	30,66
12	-10	8	500	3	10.000	1220	12,2
13	-10	10	125	1	10.000	5	0,05
14	-10	10	125	3	10.000	4	0,04
15	-10	10	500	1	10.000	40	0,4
16	-10	10	500	3	10.000	18	0,18
17	0	8	125	1	10.000	16	0,16
18	0	8	125	3	10.000	8	0,08
19	0	8	500	1	10.000	948	9,48
20	0	8	500	3	10.000	185	1,85
21	0	10	125	1	10.000	5	0,05
22	0	10	125	3	10.000	5	0,05
23	0	10	500	1	10.000	5	0,05
24	0	10	500	3	10.000	2	0,02

Tabella 12 – Risultati sperimentali ottenuti per ogni progetto di punto centrale dell'analisi CCD

<i>Esecuzioni</i>	<i>SNR</i>	<i>SF</i>	<i>BW</i>	<i>CR</i>	<i>TX</i>	<i>PACCHETTI PERSI</i>	<i>PACCHETTI PERSI (%)</i>
25	-5	9	250	2	10.000	1.768	17,68
26	-5	9	250	2	10.000	1.580	15,8
27	-5	9	250	2	10.000	1.820	18,2
28	-5	9	250	2	10.000	1.605	16,05
29	-5	9	250	2	10.000	2.075	20,75
30	-5	9	250	2	10.000	1.670	16,7
31	-5	9	250	2	10.000	1.445	14,45
32	-5	9	250	2	10.000	1.356	13,56
33	-5	9	250	2	10.000	1.728	17,28
34	-5	9	250	2	10.000	1.425	14,25
35	-5	9	250	2	10.000	2.075	20,75
36	-5	9	250	2	10.000	1.120	11,2


Figura 55 – Superficie di risposta ricostruita per CR=1

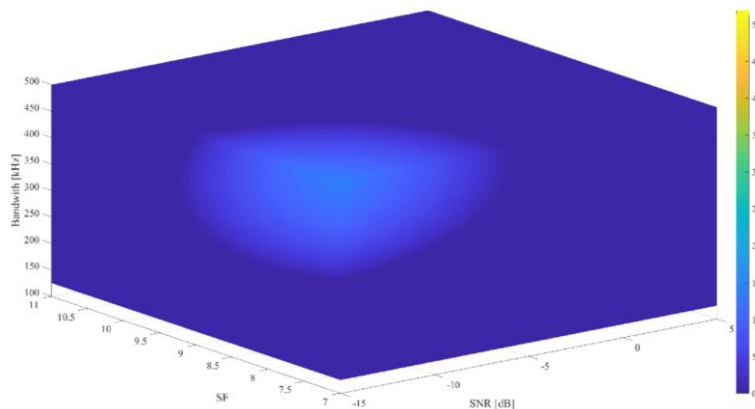


Figura 56 – Superficie di risposta ricostruita per CR=4

In Figura 57 e Figura 58 sono invece rappresentati lo stesso grafico della Fig. 29 e della Fig. 30 da un punto di vista diverso, senza faccia laterale esterna, per apprezzare meglio le variazioni all'interno della risposta superficiale.

Per verificare l'accuratezza del modello identificato, gli esperimenti sono stati ripetuti su alcuni punti presi a caso tra tutte le possibili 625 combinazioni dell'analisi fattoriale completa, diverse da quelle utilizzate per effettuare l'analisi CCD. Una volta effettuate le misurazioni, i valori PLR così ottenuti sono stati confrontati con quelli restituiti dal modello negli stessi punti. È stato quindi verificato che l'incertezza, data dalla differenza tra PLR misurata e PLR restituita dal modello nello stesso punto, era sempre inferiore alla maggiore incertezza del modello, dimostrando la fattibilità del metodo proposto per ridurre l'onere sperimentale della procedura di valutazione del protocollo LoRa.

In conclusione, la tecnologia di comunicazione LoRa sta emergendo come leader tra le reti *wide area* a bassa potenza utilizzate per applicazioni IoT, come Smart Infrastructure e monitoraggio strutturale. Questo successo è principalmente associato alle sue caratteristiche intrinseche e allo sfruttamento delle bande di frequenza senza licenza. Tuttavia, a causa della rapida diffusione delle applicazioni IoT che operano nello stesso intervallo di frequenza, le comunicazioni LoRa potrebbero soffrire di coesistenza all'interno del canale e problemi di interferenza. Per questo motivo, è importante effettuare una valutazione delle prestazioni dei dispositivi IoT basata sulla tecnologia di comunicazione LoRa sia nelle fasi di progettazione che di manutenzione del ciclo di vita del prodotto.

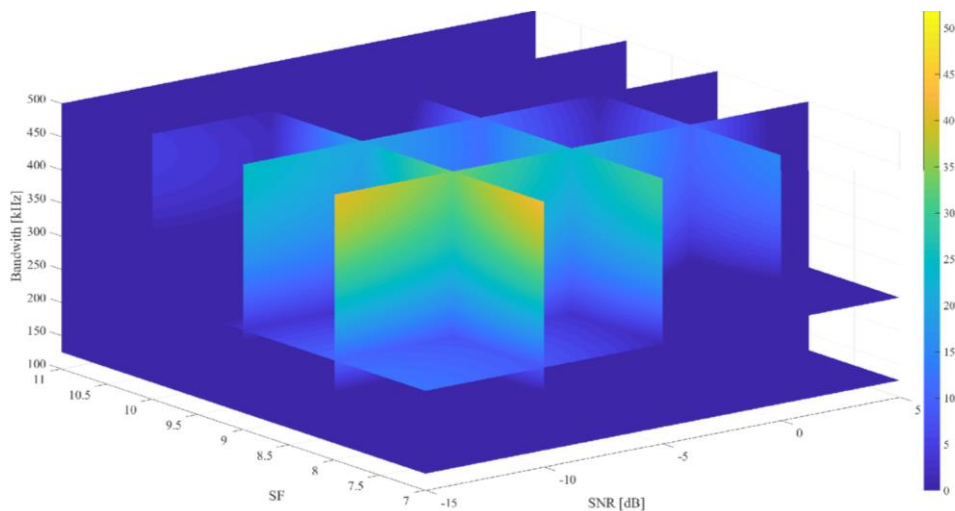


Figura 57 – Superficie di risposta ricostruita per CR=1 senza faccia laterale esterna

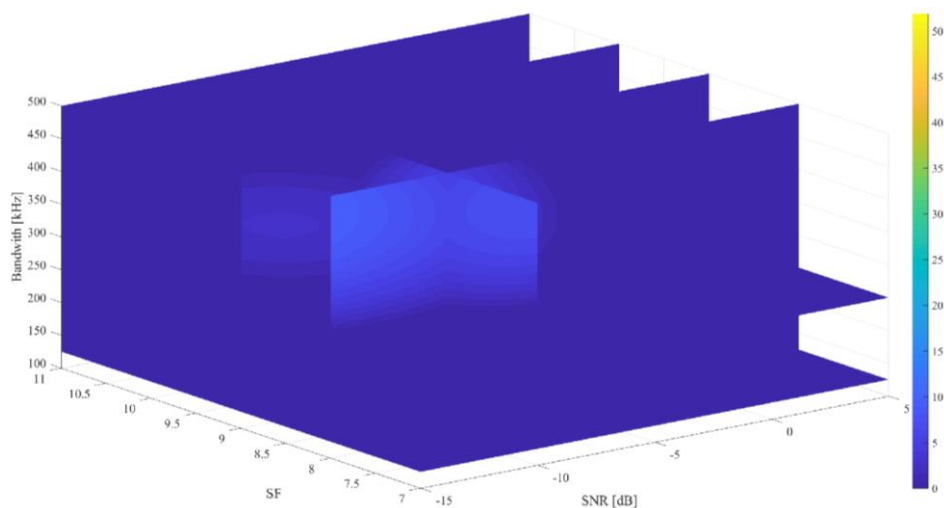


Figura 58 – Superficie di risposta ricostruita per CR=4 senza faccia laterale esterna

A tal fine, gli autori hanno proposto di utilizzare un approccio Cross-Layer per correlare sperimentalmente i valori che caratterizzano le principali quantità di livello PHY a quelli assunti dai principali parametri di livello superiore, fornendo così informazioni utili per risolvere possibili problemi al livello PHY vulnerabile. In particolare, l'attenzione degli autori è stata focalizzata sulla dipendenza mostrata da PLR, un noto parametro chiave di livello superiore, sui valori che caratterizzano le principali quantità di PHY, come diverse configurazioni del segnale LoRa e livelli di potenza AWGN intenzionali. Tuttavia, poiché una caratterizzazione completa richiede un

esperimento fattoriale completo, che potrebbe richiedere molto tempo e diventare costoso per i produttori, gli autori propongono di effettuare l'analisi cross-layer attraverso una corretta progettazione della tecnica di esperimento, chiamata CCD, invece dell'esperimento fattoriale completo, per ridurre in particolare il numero di esperimenti senza perdere le informazioni utili e l'accuratezza del modello. La fattibilità dell'approccio proposto è stata sperimentalmente dimostrata mediante un'adeguata procedura di misurazione.

2.5.8 *Algoritmo di classificazione dei segnali LoRa*

Le reti di sensori richiedono sistemi di comunicazione ancora più affidabili e a basso consumo energetico, soprattutto nell'ambito del paradigma dell'Internet of Things; questo è particolarmente vero per il monitoraggio strutturale. In questo scenario, la tecnologia LoRa, basata su un'efficiente modulazione Chirp Spread Spectrum, è particolarmente adatta a garantire una lunga distanza e un basso consumo energetico nel collegamento di comunicazione. Anche se si tratta di una soluzione recente, diversi produttori di strumentazione stanno fornendo strutture e configurazioni di prova per effettuare misure affidabili sui segnali LoRa sia in esperimenti di laboratorio che in applicazioni sul campo. Purtroppo, queste soluzioni sono solitamente fornite come aggiornamento di costosi strumenti che operano nel dominio del tempo e/o della frequenza.

Per superare questo inconveniente, è stato proposto un approccio innovativo basato sul campionamento compressivo per ridurre adeguatamente i requisiti hardware e ricostruire in modo affidabile il segnale di interesse da un numero ridotto di campioni acquisiti nel dominio del tempo. Per valutarne l'affidabilità e la potenziale attrattiva, la metodologia proposta è stata sfruttata per estrarre parametri caratteristici da segnali LoRa reali mediante un set-up sperimentale che si occupa della loro generazione e acquisizione. I risultati ottenuti evidenziano le promettenti prestazioni dell'approccio proposto.

La visione dell'Internet of Things sta stimolando lo sviluppo di nuove tecnologie di rete che produrranno un aumento rilevante del numero di dispositivi interconnessi. Secondo le previsioni più recenti, entro il 2020 saranno connessi alla rete fino a 50 miliardi di dispositivi di diversi fornitori IoT ([48]-[49]). Sono state proposte diverse soluzioni per implementare le reti di comunicazione su cui si basa l'IoT. In particolare, negli ultimi anni sono nate nuove soluzioni LPWAN per consentire applicazioni che richiedono la combinazione di lunghe distanze di comunicazione e basso consumo energetico.

In questo contesto, una soluzione molto recente per realizzare il livello fisico delle LPWAN è offerta dalla tecnologia Long-Range ([50]-[55]). Le comunicazioni LoRa si basano su una tecnica di

modulazione brevettata da Semtech [56] e vengono solitamente sfruttate per (i) comunicazioni punto-punto tra due nodi wireless o (ii) come livello PHY in un adeguato stack di protocollo. In particolare, LoRaWAN è un livello MAC generalmente ma non esclusivamente basato sulla modulazione LoRa. LoRaWAN è stato definito, standardizzato e supportato da LoRa Alliance, un'organizzazione solidamente consolidata che coinvolge un numero consistente di aziende affiliate (ad esempio, Semtech, IBM, Actility e Microchip).

Il test e la misurazione sono aspetti fondamentali del ciclo di vita (sviluppo, implementazione e manutenzione) delle nuove tecnologie. I produttori leader di soluzioni di misura, che sono anche membri della LoRa Alliance, hanno già distribuito le proprie suite hardware e software proprietarie per testare i dispositivi LoRa ([57]-[59]). Queste suite includono strumenti costosi come oscilloscopi digitali ad alte prestazioni, analizzatori di spettro e generatori di segnali. Pertanto, la valutazione delle prestazioni dei dispositivi LoRa è attualmente un compito costoso. I costi delle suddette suite sono fondamentalmente legati ai componenti hardware di base, ovvero il digitalizzatore e la sua memoria di acquisizione e il processore, adottati per digitalizzare, registrare ed elaborare il segnale di ingresso.

La progettazione di soluzioni di test LoRa economicamente vantaggiose richiede essenzialmente competenze relative alle strategie di campionamento e all'elaborazione del segnale digitale (DSP). In particolare, la strategia di campionamento deve garantire una significativa riduzione dei requisiti di memoria dello strumento, che hanno un forte impatto sui costi dell'hardware. La fase di elaborazione digitale deve essere caratterizzata da un basso carico computazionale e da una rapida reattività. Sebbene i segnali LoRa siano caratterizzati da valori di larghezza di banda mai superiori a 500 kHz, le soluzioni tradizionali basate sul downsampling del segnale, sia analogiche che digitali, si rivelano poco efficienti; gli approcci analogici, infatti, richiedono lo sfruttamento di ulteriori circuiti elettronici per la traduzione in banda base (ad esempio [60]-[62]), mentre i metodi digitali, come quelli presentati in ([63]-[66]), soffrono di un'inadeguata riduzione del rapporto segnale/rumore se utilizzati impropriamente.

Per soddisfare i requisiti considerati, si può considerare un approccio alternativo ai paradigmi di campionamento standard, denominato campionamento compressivo [67]. In particolare, è stato dimostrato in ([68]-[69]) che la rappresentazione digitale prodotta dagli approcci CS può essere efficacemente utilizzata in problemi di test; i vincoli relativi all'integrità del segnale sono, infatti, più difficili che in altre applicazioni ([70]-[73]). Ad esempio, sono state proposte e valutate soluzioni di test basate su CS per supportare compiti di classificazione di segnali che sfruttano comuni schemi di modulazione di frequenza ([74], [75]). Tuttavia, poiché LoRa si basa su nuovi schemi di modulazione

impegnativi, gli approcci basati su CS specificamente adattati ai segnali LoRa devono ancora essere studiati.

Per affrontare i problemi sopra citati, gli autori propongono di seguito un nuovo strumento di misura, basato su strategie di elaborazione digitale del segnale associate a un hardware di acquisizione a basso costo, per la ricostruzione e la classificazione dei segnali LoRa. Per quanto riguarda l'hardware, il front-end RF dello strumento può essere realizzato con moduli off-the-shelf in grado di lavorare nella banda di frequenza ISM senza licenza, che potrebbero essere recuperati anche da prodotti dismessi. Per quanto riguarda l'elaborazione, lo strumento proposto si basa sul paradigma CS e sfrutta la possibilità di rappresentare i segnali LoRa come segnali localmente sparsi in termini di funzioni base del coseno discreto. In questo modo è possibile registrare i segnali LoRa con risorse di memoria limitate, molto inferiori a quelle disponibili nelle costose suite presenti sul mercato.

L'approccio proposto basato su CS è stato implementato e convalidato mediante una piattaforma di test che consente la generazione, la digitalizzazione e l'elaborazione digitale di segnali LoRa reali [76]. Inoltre, viene considerato un algoritmo di classificazione, progettato per operare sul segnale acquisito, al fine di evidenziare, attraverso test di classificazione, l'affidabilità nella stima dei parametri caratteristici dei segnali LoRa, ovvero larghezza di banda, fattore di diffusione e tempo di simbolo dei dati trasmessi, per una data frequenza portante e campionamento.

2.5.8.1 Lista dei simboli e degli acronimi

Acronym/Symbol	Parameter
IoT	Internet of Things
LoRa	Long Range
CSS	Chirp Spread Spectrum
LPWAN	Low-Power Wide Area Network
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
PHY	Physical
MAC	Media Access Control
RF	Radio Frequency
ISM	Industrial, Scientific and Medical
DSP	Digital Signal Processing
CS	Compressive Sampling
DCT	Discrete Cosine Transform

Acronym/Symbol	Parameter
BW	Bandwidth
SF	Spreading Factor
T_c	Chips time resolution
T_s	Symbol period
f_c	Sampling rate
R_b	Nominal bit rate
CR	Code rate
DFT	Discrete Fourier Transform
$\mathbf{x}$	Signal of interest
N	Dimension of $\mathbf{x}$
Ψ	$N \times N$ representation matrix
$\mathbf{s}$	Sparse representation of $\mathbf{x}$
$\mathbf{y}$	Sampled/measured signal
M	Dimension of $\mathbf{y}$
Φ	$M \times N$ sampling matrix
C	Constant
$\mu^2(\Phi, \Psi)$	Coherence between Φ and Ψ
C_r	Compression ratio
$X(k)$	Sample of DCT of $\mathbf{x}$
DFT	Discrete Fourier Transform
Δf	Frequency increment of chirp
Δf_w	DCT frequency resolution
BP	Basis pursuit
MP	Match pursuit
OMP	Orthogonal MP
ROMP	Regularized OMP
SP	Subspace pursuit
CoSaMP	Compressive Sampling MP
CG	Conjugate Gradient
CGP	Conjugate Gradient Pursuit
M_i	Number of random samples in a 50 μs signal segment
N_i	Number of reconstructed samples in a 50 μs signal segment

Acronym/Symbol	Parameter
$f(t)$	Instantaneous frequency
$\theta(t)$	Instantaneous phase
$u(k)$	Input samples of median filter
$v(k)$	Output samples of median filter
m	Order of median filter
δ	Overshoot of recovered instantaneous frequency trajectory
P	Length of the signal portion exploited to carry out the classification task
ARM	Advanced RISC Machine
CRC	Cyclic Redundancy Code
SMA	SubMiniature version A
σ	Noise standard deviation
V_{rms}	Root mean square value of the input signal
SNR	Signal-to-Noise Ratio

2.5.8.2 Fondamenti della modulazione LoRa

Tecnica di modulazione e parametri associati

Per consentire comunicazioni a lungo raggio, i sistemi LoRa sfruttano le frequenze portanti appartenenti alla più bassa banda di frequenza ISM senza licenza, pari a 868 MHz in Europa, 915 MHz in Nord America e 433 MHz in Asia. Inoltre, si affidano a tecniche di spread spectrum e di correzione degli errori in avanti per migliorare la robustezza del sistema rispetto al rumore e alle interferenze, a scapito di un throughput ridotto. Per descrivere brevemente le caratteristiche dello schema di modulazione, l'evoluzione nel tempo della frequenza istantanea di un tipico segnale LoRa è mostrata nella Figura 59 e di seguito commentata. La frequenza istantanea di un segnale LoRa scandisce ripetutamente intervalli di tempo contigui di durata limitata, T_s ; ogni intervallo è utilizzato per trasmettere un simbolo. Il segnale corrispondente all'interno dell'intervallo di tempo del simbolo viene solitamente definito chirp e può essere caratterizzato da traiettorie di frequenza istantanea ascendenti o discendenti. L'oscillazione di frequenza rappresenta la larghezza di banda, BW, del canale di comunicazione; il suo valore può essere scelto tra 125 kHz, 250 kHz o 500 kHz; il rapporto tra BW e T_s dà il tasso di chirp, c. In base al valore del simbolo da trasmettere, ogni chirp presenta una frequenza iniziale diversa all'interno della larghezza di banda data; a titolo di esempio, le frequenze iniziali dei chirp associati a diversi simboli (indicati con S1, S2, S3 e S4) sono mostrate nella Figura 59.

Come si può notare, la traiettoria della frequenza istantanea di ogni simbolo, tranne quelli coinvolti nel preambolo, è caratterizzata da bruschi salti verso l'alto o verso il basso. Se il limite della larghezza di banda viene raggiunto prima della fine del tempo del simbolo, la frequenza istantanea salta al limite BW opposto e riprende a scorrere con la stessa velocità di chirp fino al valore di frequenza iniziale. La frequenza media all'interno di ciascun simbolo è sempre pari al punto medio dell'intervallo di frequenza adottato e viene definita frequenza portante, f_c .

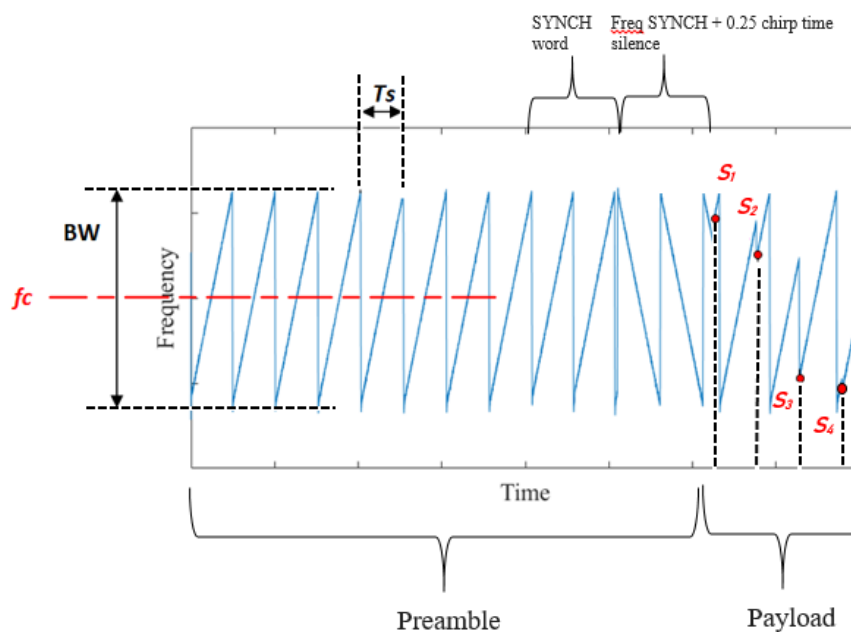


Figura 59 – Traiettoria di frequenza istantanea di un segnale lora

Come detto in precedenza, ogni simbolo è codificato come un segnale di chirping; il numero di bit sfruttato per rappresentare il simbolo è denominato Spreading Factor e può assumere valori variabili nell'intervallo 7-12. I livelli corrispondenti (chip) che possono essere distinti in un singolo chirp sono:

$$Chips = 2^{SF} \quad (4)$$

mentre la risoluzione temporale dei chip è data da:

$$T_c = \frac{1}{BW} \quad (5)$$

Di conseguenza, il tempo di simbolo è pari a

$$T_s = \text{Chips} \cdot T_c \quad (6)$$

Semplici passaggi matematici permettono di esprimere T_s come

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (7)$$

Dal momento che ogni simbolo include SF bit, il bit-rate nominale è uguale a

$$R_b = \frac{SF}{T_s} = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \quad (8)$$

Le equazioni (7) e (8) evidenziano che ogni incremento di SF dimezza la velocità di trasmissione, raddoppiando la durata del burst LoRa e, di conseguenza, il consumo energetico; al contrario, l'aumento di BW provoca il raddoppio della velocità di trasmissione R_b .

La tecnologia LoRa consente diverse combinazioni di SF e BW, ognuna delle quali è caratterizzata da una diversa velocità di trasmissione e area di copertura ([77], [78]). Per garantire un funzionamento affidabile in ricezione, il ricevitore deve essere impostato con le stesse configurazioni del trasmettitore in termini di parametri SF e BW. In questo modo è possibile generare i segnali down-chirp adatti per estrarre il segnale utile a banda stretta dal segnale rumoroso a banda larga ricevuto.

La modulazione LoRa introduce bit di ridondanza che migliorano la robustezza del segnale trasmesso a scapito del bitrate:

$$R_b = \frac{SF}{T_s} = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot \frac{4}{4 + CR} \quad (9)$$

Dove CR indica il code-rate e può assumere valori da 1 a 4.

Struttura del messaggio

Come illustrato nella Figura 59, i messaggi LoRa sono costituiti da un preambolo e da un carico utile. Il preambolo consiste in una sequenza di up-chirp, che copre l'intera larghezza di banda a partire dalla frequenza più bassa e consente la sincronizzazione del ricevitore. Il preambolo termina con due simboli di up-chirping che codificano la cosiddetta Sync Word, sfruttata per la sincronizzazione del frame, seguiti da due down-chirp, utilizzati per la sincronizzazione della frequenza, e da un ulteriore quarto di down-chirp necessario per assicurare il periodo di silenzio richiesto al ricevitore per allineare il tempo [79]. La durata del burst che trasmette un messaggio LoRa dipende dalla quantità di informazioni e dalla configurazione selezionata in termini di SF e BW. La durata massima si ottiene con la configurazione BW = 125 kHz e SF = 12, che determina un tempo di simbolo T_s pari a 32,768 ms. Un'apparecchiatura di prova destinata a registrare i segnali LoRa in versione digitale necessita di una strategia per ridurre la quantità di dati acquisiti. Per la combinazione considerata di SF e BW, la digitalizzazione senza alias del segnale richiederà più di 14 campioni MS. In questo modo, la lunghezza della registrazione dovrebbe superare la dimensione della memoria degli strumenti anche in presenza di messaggi caratterizzati da payload brevi.

2.5.8.3 Fondamenti di compressive sampling

Il paradigma convenzionale per la digitalizzazione di segnali a banda limitata richiede l'uso di frequenze di campionamento uniformi pari ad almeno il doppio della larghezza di banda del segnale; questo valore minimo è solitamente indicato come frequenza di Nyquist. I segnali acquisiti a una frequenza di campionamento non inferiore alla frequenza di Nyquist possono essere rappresentati senza ambiguità (senza alias) in termini di campioni del dominio del tempo.

La teoria del campionamento compressivo o compressed sensing afferma che è possibile ottenere una rappresentazione accurata del segnale anche se la frequenza di campionamento media (definita come il rapporto tra il numero di campioni acquisiti e la durata dell'intervallo di osservazione) è molto inferiore alla frequenza di Nyquist, a condizione che il segnale sia caratterizzato da una rappresentazione sparsa in quasi una base ortonormale [80]. Questa affermazione rappresenta una semplificazione del quadro generale della CS, che è tipicamente basato su un concetto esteso di

campionamento, che include la maggior parte degli approcci di conversione analogico-informatica. In ogni caso, la formulazione adottata si applica a tutti i casi pratici in cui il campionamento restituisce misure temporali dell'ampiezza del segnale.

Un segnale discreto rappresentato nel dominio del tempo mediante un vettore di lunghezza N $\mathbf{x}$, caratterizzata da una frequenza di campionamento non inferiore alla frequenza di Nyquist, ammette una rappresentazione S -sparsa in termini di vettore di lunghezza S $\mathbf{s}$, se:

$$\mathbf{x} = \Psi \mathbf{s} \quad (10)$$

dove Ψ è una matrice $N \times N$, definita matrice di rappresentazione di $\mathbf{x}$ in termini di $\mathbf{s}$. I coefficienti raccolti in $\mathbf{s}$ sono le proiezioni di $\mathbf{x}$ su un insieme di funzioni base, specificate dalle colonne di Ψ [67].

Gli approcci tradizionali per la compressione dei segnali prevedono (i) il campionamento del segnale secondo il tradizionale paradigma alias-free, (ii) il calcolo delle sue proiezioni sulle funzioni base per ottenere i coefficienti della sua rappresentazione sparsa e (iii) la memorizzazione di questi coefficienti anziché dei campioni del dominio del tempo, consentendo così di risparmiare risorse di memoria. Se necessario, la rappresentazione del dominio del tempo può essere ricostruita a partire dalla rappresentazione sparsa attraverso l'equazione 10.

Al contrario, la CS può recuperare un'accurata rappresentazione del dominio del tempo priva di alias di un segnale rado, in un dato intervallo di tempo, acquisendo solo M campioni, con M inferiore a N e che non soddisfa il teorema di Nyquist. Per un segnale a tempo discreto, l'acquisizione del segnale basata su CS può essere descritta mediante una matrice $M \times N$ Φ , detta matrice di campionamento:

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} \quad (11)$$

dove $\mathbf{y}$ è un vettore di lunghezza M di campioni o misure acquisite. Le righe della matrice Φ sono le cosiddette funzioni di campionamento e la loro evoluzione nel tempo viene solitamente scelta in base alla matrice di rappresentazione, come indicato di seguito.

Per l'applicazione considerata, la matrice di campionamento è una matrice di selezione, caratterizzata da tutte le righe composte da voci uguali a zero, ma da una sola unitaria. In presenza di un ingresso

analogico, il campionamento può essere effettuato in M diversi istanti di tempo nell'intervallo di osservazione, non necessariamente appartenenti a una data griglia discreta. La teoria CS afferma che se il segnale di ingresso ammette una rappresentazione sparsa S , e:

$$M \geq C\mu^2(\Phi, \Psi)S \log(N) \quad (12)$$

dove C è una costante data, allora M campioni sono sufficienti per rappresentare il segnale. I campioni raccolti attraverso l'approccio CS consentono, infatti, di stimare i coefficienti della rappresentazione sparsa del segnale in termini di funzioni base definite dalle colonne di Ψ . La rappresentazione sparsa può essere perseguita attraverso diversi approcci ([80], [81]); ad esempio, i coefficienti possono essere ottenuti risolvendo un problema di ottimizzazione, che consiste in una minimizzazione funzionale soggetta a un insieme di vincoli. Infine, la rappresentazione nel dominio del tempo del segnale di ingresso, se richiesta, è ottenuta dalla rappresentazione sparsa utilizzando l'equazione 10.

La funzione $\mu^2(\Phi, \Psi)$ dell'equazione 12 è una misura della coerenza tra Φ e Ψ ed esprime la massima correlazione tra qualsiasi coppia ottenuta selezionando una colonna di Φ e una riga di Ψ . Quanto minore è la coerenza tra Φ e Ψ , tanto minore è il numero di campioni M necessari per ricostruire e memorizzare $\mathbf{x}$. In alcuni convertitori analogico-informatici, la selezione di una matrice casuale Φ assicura un elevato grado di incoerenza con la maggior parte delle matrici tradizionali Ψ [67]. La matrice di selezione dell'equazione 11 può essere resa casuale evitando uno schema di decimazione regolare nell'estrazione dei campioni dal flusso di dati. In altre parole, gli intervalli di tempo tra i campioni successivi dell'insieme acquisito non devono essere costanti. L'efficienza di un approccio CS viene solitamente espressa in termini di rapporto di compressione, C_r , che confronta M con N :

$$C_r = \left(1 - \frac{M}{N}\right) \% \quad (13)$$

2.5.8.4 Metodo di classificazione proposto basato su CS

La prima sfida per un'applicazione affidabile del paradigma CS ai segnali LoRa è la scelta corretta di funzioni base che consentano una rappresentazione rada. Le comunicazioni LoRa sono caratterizzate da segnali non stazionari che non sono sparsi nel dominio della frequenza, cioè sulle classiche

funzioni base di Fourier. Al contrario, le funzioni base che coinvolgono chirplet o chirplet polinomiali possono essere adeguatamente adattate ai segnali LoRa ([82]-[84]), ma comportano un onere computazionale inaccettabile.

L'approccio CS proposto consiste nel dividere il segnale LoRa in brevi segmenti temporali, ognuno dei quali è caratterizzato da una porzione di segnale che presenta un comportamento in frequenza quasi stazionario. In particolare, l'intero intervallo di osservazione viene suddiviso in intervalli sufficientemente piccoli (indicati nel seguito come segmenti acquisiti) in cui l'oscillazione istantanea della frequenza è sufficientemente bassa da approssimare in modo affidabile il segnale di ingresso con un'onda sinusoidale della stessa ampiezza. Le porzioni corrispondenti del segnale LoRa vengono acquisite sfruttando un approccio di campionamento compressivo che utilizza funzioni base coseno discrete. Un segnale discreto $\mathbf{x}$ può essere rappresentato in termini di funzioni base discrete del coseno secondo:

$$X(k) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) & \text{for } k = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left[\frac{\pi(2n+1)k}{2N}\right] & \text{for } k = 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (14)$$

dove $\mathbf{x}(n)$ con $n = 0, \dots, N-1$ sono le componenti della matrice a tempo discreto $\mathbf{x}$, cioè i campioni del segnale di ingresso. L'equazione 14 esprime una trasformazione reale, denominata trasformata discreta del coseno (DCT), che offre una maggiore efficienza computazionale rispetto alla classica trasformata discreta di Fourier (DFT), poiché non comporta calcoli a valori complessi.

La durata di ciascun segmento acquisito deve essere definita in base al segnale di frequenza chirp. Sia T_w la durata di un segmento acquisito; il corrispondente incremento della frequenza istantanea del segnale LoRa è dato da:

$$\Delta f = \frac{BW}{T_s} T_w \quad (15)$$

Tenendo conto dell'equazione (7), l'equazione (5) può essere espressa anche come:

$$\Delta f = \frac{BW^2}{2SF} T_w = \frac{BW^2}{2SF \cdot 2 \cdot \Delta f_w} \quad (16)$$

dove Δf_w è la risoluzione in frequenza della rappresentazione nel dominio DCT, inversamente proporzionale a T_w , ovvero $\Delta f_w = 1/(2T_w)$.

Pertanto, i coefficienti DCT hanno valori significativi solo in un intorno centrato nella corrispondente frequenza media del segnale e ampio intorno a Δf . In condizioni operative reali, il caso peggiore in termini di pendenza della frequenza di chirp è associato a segnali LoRa caratterizzati da $BW=500\text{kHz}$ e $SF=7$ e pari a circa 2 MHz/s . Per garantire una rappresentazione sparsa del segnale chirp nell'intervallo di osservazione, si suppone che la variazione di frequenza Δf sia pari al massimo a 10 volte la risoluzione di frequenza Δf_w . In questo caso, risolvendo l'equazione (16) per Δf_w , la segmentazione del segnale richiede una durata T_w pari a $50\text{ }\mu\text{s}$. A titolo di esempio, nella Figura 60 sono riportati i coefficienti DCT corrispondenti al caso peggiore di segnale Lora acquisito a 10 MSamples/s nell'intervallo di osservazione considerato.

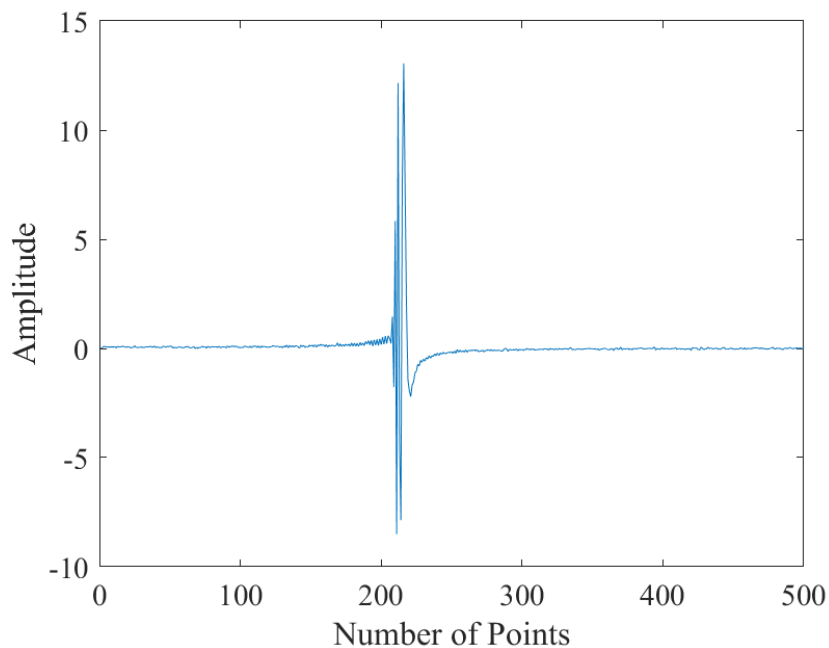


Figura 60 – Rappresentazione DCT del segnale LoRa caratterizzato da $SF = 7$ e $BW=500\text{ kHz}$, in un intervallo di tempo non superiore a $50\text{ }\mu\text{s}$

Vale la pena notare che solo poche decine di coefficienti (che rappresentano meno del 5% dell'intero set) sono significativamente diversi da zero. Pertanto, il segnale può essere considerato localmente rado nel dominio DCT e recuperato attraverso un approccio di campionamento compressivo.

Per ottenere una rappresentazione sparsa del segnale di interesse a partire dai suoi campioni casuali, si possono seguire due approcci di ricostruzione principali, denominati basis pursuit e matching pursuit. Per quanto riguarda le prestazioni di ricostruzione, gli approcci BP si sono rivelati migliori di quelli basati su MP; al contrario, sono caratterizzati da un maggiore onere computazionale [85]. Per migliorare ulteriormente le prestazioni dell'MP, sono stati recentemente proposti in letteratura alcuni approcci che prevedono versioni modificate e potenziate, ovvero l'inseguimento ortogonale della corrispondenza [86], l'OMP regolarizzato [87], l'inseguimento del sottospazio [88] e l'inseguimento della corrispondenza a campionamento compressivo [89]. In particolare, OMP migliora l'efficienza della stima grazie a proiezioni ortogonali adeguate, mentre CoSaMP e SP sfruttano la tecnica del backtracking per migliorare continuamente la base delle funzioni di proiezione. ROMP riduce il costo computazionale selezionando più atomi a ogni iterazione.

Per quanto riguarda in particolare la proposta in esame, per risolvere il problema di recupero considerato e approssimare strettamente i coefficienti sparsi del segnale di interesse, è stato impiegato un approccio greedy. L'algoritmo adottato approssima un OMP con uno schema di ottimizzazione direzionale basato sul gradiente coniugato. La CG è una procedura piuttosto popolare che approssima la pesante fase di proiezione ortogonale in un numero di passi pari alla dimensione del problema. Tuttavia, la strategia qui impiegata è diversa dalla sua implementazione tradizionale, che si basa sull'uso di un solutore completo del gradiente coniugato per ogni nuovo elemento selezionato in un determinato passo della procedura di iterazione.

Al contrario, è stato adottato il metodo proposto in [90], denominato CGP, in quanto viene applicato un solo aggiornamento direzionale per ogni nuovo elemento dell'iterazione. Gli autori di [90] hanno, infatti, dimostrato che il CGP è più veloce dei classici metodi OMP con costi di memorizzazione inferiori, rendendolo più adatto a problemi di dimensioni maggiori pur mantenendo un buon livello di accuratezza, soprattutto nelle applicazioni di rilevamento compresso.

In dettaglio, l'approccio proposto può essere implementato attraverso le seguenti fasi:

- acquisizione casuale di M campioni del segnale LoRa secondo uno schema di campionamento quasi casuale;

- segmentazione del record acquisito in diversi sottoinsiemi di M_i campioni successivi, relativi a brevi intervalli di durata non superiore a $50 \mu s$;
- calcolo dei campioni N_i elaborando i campioni M_i attraverso l'algoritmo greedy adottato [83];
- recupero di un record lungo caratterizzato da N campioni collegando i fotogrammi ricostruiti.

Per maggiore chiarezza, le fasi principali del metodo proposto sono illustrate anche attraverso il diagramma di flusso riportato nella Fig. 35.

Il segnale acquisito può essere classificato con un algoritmo che sfrutta i classici strumenti di elaborazione del segnale utilizzando un numero inferiore di punti. In questo modo, l'approccio CS consente di ridurre il costo computazionale dell'algoritmo.

Task di classificazione

Un banco di prova adeguato a valutare le prestazioni e l'affidabilità del metodo proposto basato su CS consiste nel verificare la possibilità di eseguire con successo compiti di classificazione, ovvero di determinare automaticamente i parametri di configurazione del segnale LoRa ricostruito. A tal fine, è stato definito, implementato e testato un adeguato algoritmo di classificazione che opera sui segnali ricostruiti nel dominio del tempo.

Un generico segnale LoRa digitalizzato può contenere l'intero messaggio o solo alcune porzioni, a seconda dello specifico istante temporale di inizio dell'acquisizione e dei suoi parametri di configurazione. Per ottenere una classificazione affidabile, il metodo proposto richiede che nel frame acquisito siano digitalizzati almeno due simboli di preambolo, le cui traiettorie di frequenza istantanea coprano l'intera larghezza di banda nominale. Altri input richiesti dal metodo sono (i) la frequenza portante del segnale LoRa e (ii) la frequenza di campionamento nominale. I valori stimati di BW e SF del segnale LoRa ricostruito sono gli output dell'algoritmo di classificazione.

La procedura di classificazione si basa su tre fasi principali: (i) Rappresentazione tempo-frequenza; (ii) Bandwidth detection; (iii) Misura del tempo di simbolo.

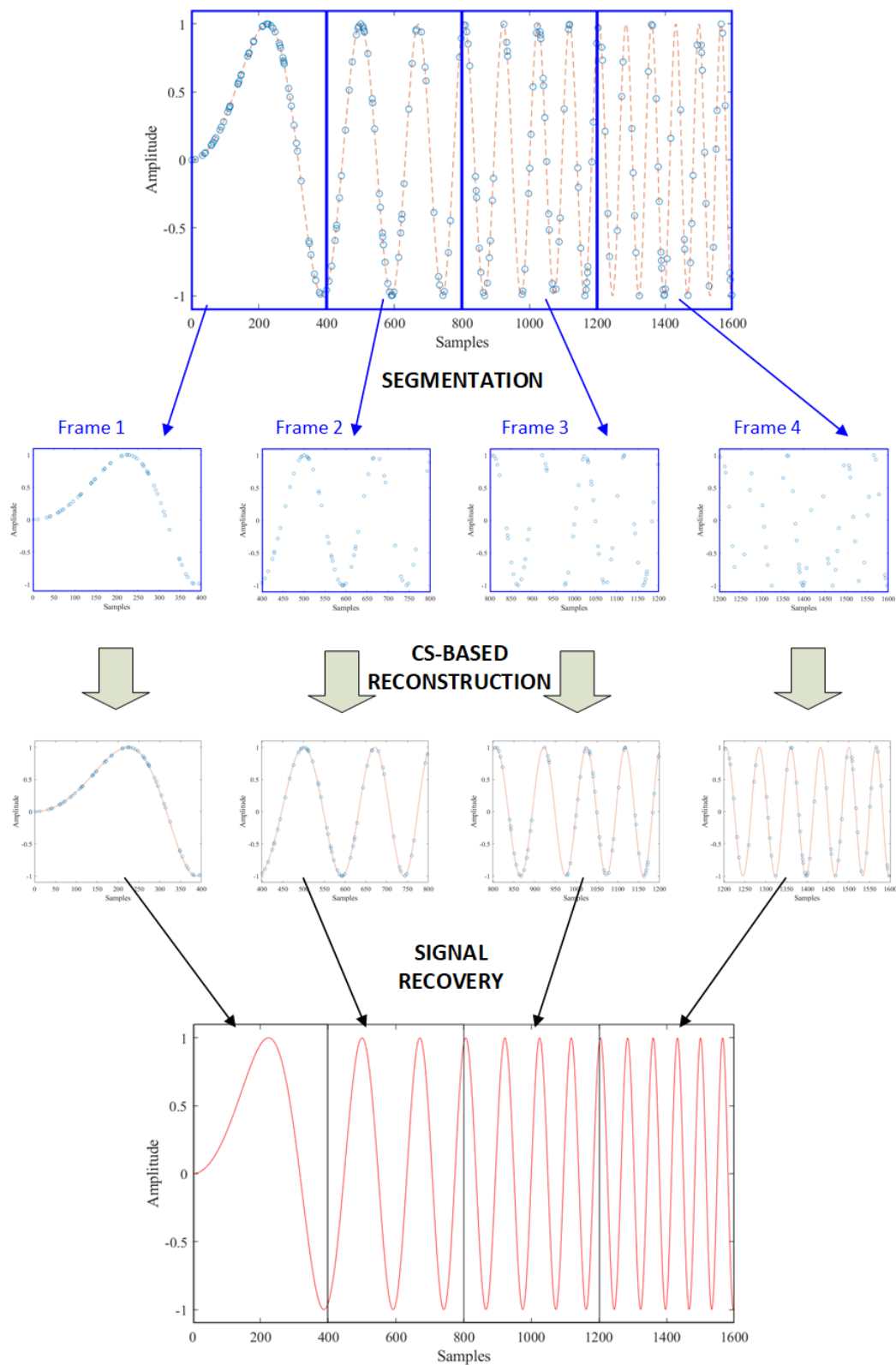


Figura 61 – Schema a blocchi del metodo di classificazione lora basato su CS

Rappresentazione tempo-frequenza

Il segnale nel dominio del tempo viene demodulato per ottenere la sua traiettoria istantanea in frequenza. La demodulazione viene eseguita mediante un tipico processo di demodulazione I-Q volto a rilevare la fase istantanea $\theta(t)$, da cui stimare la frequenza istantanea secondo ([91], [92]):

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (17)$$

Rilevamento della larghezza di banda

Il rilevamento della larghezza di banda viene eseguito sfruttando solo la porzione iniziale del segnale digitalizzato contenente i simboli di preambolo. A tal fine, la traiettoria della frequenza istantanea stimata viene filtrata per rimuovere gli artefatti dovuti al rumore impulsivo che influenza la fase istantanea e che viene amplificato dall'operazione di derivazione.

A tal fine, è stato adottato un efficiente filtro mediano non lineare ([93]-[96]); il filtro sostituisce ogni campione di segnale con il valore mediano calcolato su un insieme di suoi vicini, attenuando così l'effetto degli outlier della frequenza istantanea. Da un punto di vista matematico, siano u e v rispettivamente il segnale in ingresso e quello filtrato, k il tempo discreto e m l'ordine del filtro, cioè il numero di valori vicini considerati; il valore corrispondente $v(k)$ è dato da:

$$v(k) = \begin{cases} \text{median} \left[u\left(k - \frac{m-1}{2}\right), \dots, u(k), \dots, u\left(k + \frac{m-1}{2}\right) \right] \\ \text{if } m \text{ is odd} \\ \text{median} \left[u\left(k - \frac{m}{2}\right), \dots, u(k), \dots, u\left(k + \frac{m}{2} - 1\right) \right] \\ \text{if } m \text{ is even} \end{cases}^{(15)} \quad (18)$$

La regolazione dell'ordine del filtro m si rivela una questione cruciale. Valori troppo alti possono causare una perdita di dinamica nel segnale filtrato; al contrario, valori troppo bassi possono non riuscire a rimuovere i picchi indesiderati, con una conseguente sovrastima del BW.

Per quanto riguarda in particolare il metodo proposto, l'ordine del filtro è stato selezionato in base all'ampiezza dei picchi rilevati. Come mostrato nella Figura 62, i picchi (evidenziati da marcatori quadrati) sono sovrapposti alla traiettoria della frequenza istantanea stimata e la loro posizione può essere facilmente riconosciuta mediante un algoritmo di rilevamento dei picchi basato su una soglia.

Se la soglia è scelta in modo appropriato, alcuni picchi mostrano un valore di frequenza al di fuori dell'intervallo definito dalla larghezza di banda e sono chiaramente distinti dagli altri picchi relativi associati ai limiti della larghezza di banda. Il livello di overshooting dovuto ai picchi, indicato nella Figura 62 con δ , viene stimato facendo la differenza tra l'ampiezza del picco assoluto e il valore minimo tra i picchi relativi secondari.

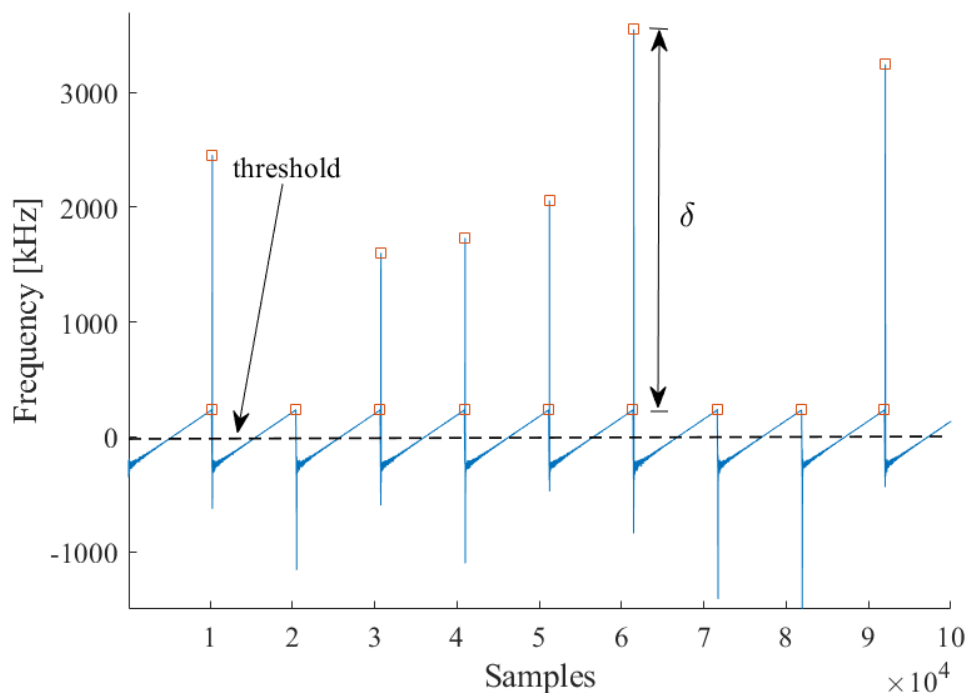


Figura 62 – Procedura per la rilevazione e rimozione di picchi artefatti

Per quanto riguarda la scelta dell'ordine del filtro m , è bene ricordare che il parametro BW è caratterizzato da un numero limitato di valori possibili (125, 250 e 500 kHz) e la procedura di classificazione deve sostanzialmente far coincidere la larghezza di banda stimata con uno di questi valori. In questo modo, se la prominenza δ dello spike è sufficientemente piccola, i suoi effetti sono trascurabili; al contrario, se δ è una percentuale rilevante del BW , i suoi effetti non possono essere trascurati.

L'ordine m è stato quindi scelto secondo un criterio che combina opportunamente l'overshoot δ e la lunghezza P della porzione di segnale sfruttata per svolgere il compito di classificazione secondo le seguenti espressioni:

$$m = \begin{cases} 0.01\%P & \text{if } \delta < 100\text{kHz} \\ 0.03\%P & \text{if } 100\text{kHz} \leq \delta < 1\text{MHz} \\ 0.45\%P & \text{if } \delta \geq 1\text{MHz} \end{cases} \quad (19)$$

Una strategia analoga consente di eliminare anche le oscillazioni negative della frequenza istantanea; per maggiore chiarezza, il segnale filtrato è mostrato nella Figura 63.

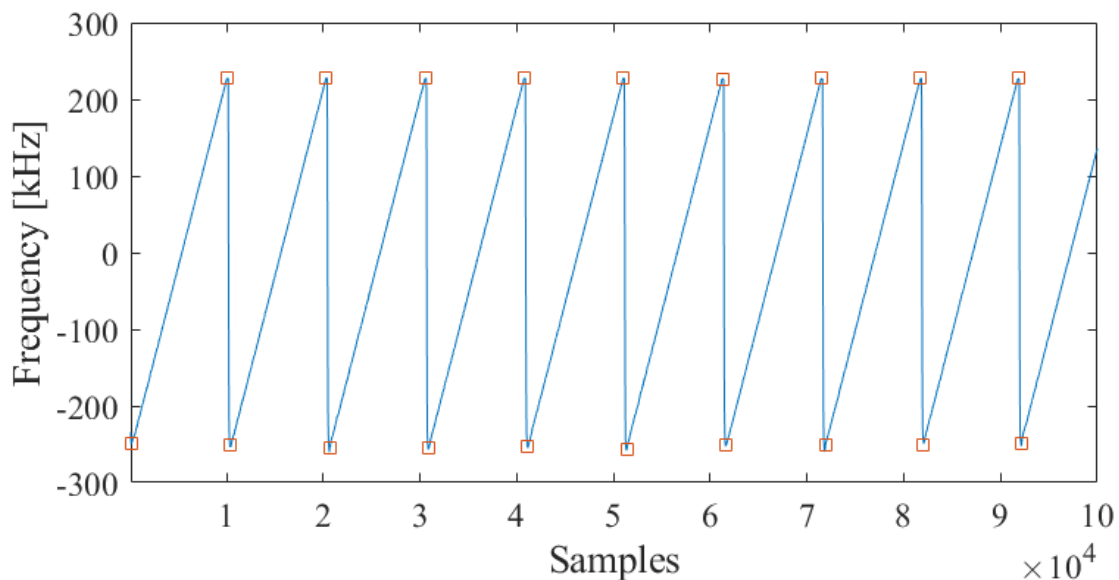


Figura 63 – Risultati dell'applicazione dell'algoritmo di Peak Detection a valle della rimozione degli artefatti dovuti al rumore

Una volta filtrato il segnale, viene applicato nuovamente l'algoritmo di rilevamento dei picchi (senza alcuna soglia) con l'obiettivo di individuare sia i picchi positivi che quelli negativi (evidenziati mediante marcatori quadrati nella Figura 63).

La media delle differenze tra i valori assoluti dei picchi positivi e negativi rappresenta la misura richiesta del BW; il valore ottenuto viene confrontato con le tre larghezze di banda consentite e il valore più vicino viene infine identificato come larghezza di banda del segnale LoRa in esame.

Misura del tempo di simbolo

Il tempo di simbolo è definito come il tempo trascorso tra due picchi consecutivi del preambolo e può essere facilmente stimato marcando opportunamente ogni picco. A questo scopo, viene sfruttato un ulteriore filtro mediano, il cui ordine è superiore a quello adottato nella fase di stima del BW. In questo modo, tutti i picchi vengono annullati, a scapito di un possibile smussamento della porzione utile del segnale. Tuttavia, l'obiettivo è la valutazione della posizione dei picchi sull'asse del tempo piuttosto che della loro ampiezza.

Una volta filtrato il segnale, l'algoritmo di rilevamento dei picchi viene applicato all'intero segnale, con una soglia pari al BW stimato. Vale la pena notare che l'approccio proposto è stato progettato per funzionare con successo su un segnale di ingresso costituito sia da una traccia completa del segnale (cioè comprendente tutti i sei up-chirps del preambolo) sia da una sua porzione non specificata (cioè comprendente solo una parte del preambolo). Pertanto, l'algoritmo di misura stima il tempo di simbolo T_s come media delle distanze temporali tra i picchi riconosciuti del preambolo. È stato verificato sperimentalmente che l'algoritmo fornisce risultati affidabili anche se la traccia di ingresso contiene un solo up-chirp.

Identificazione dello spreading factor

La conoscenza della larghezza di banda BW e del tempo di simbolo T_s consente di misurare il fattore di diffusione SF, mediante l'equazione (20). In particolare, SF viene valutato arrotondando al numero intero più vicino il risultato della seguente espressione:

$$SF = \log_2(T_s \cdot BW) \quad (20)$$

Le fasi procedurali dell'algoritmo di classificazione sono riassunte nella Figura 64.

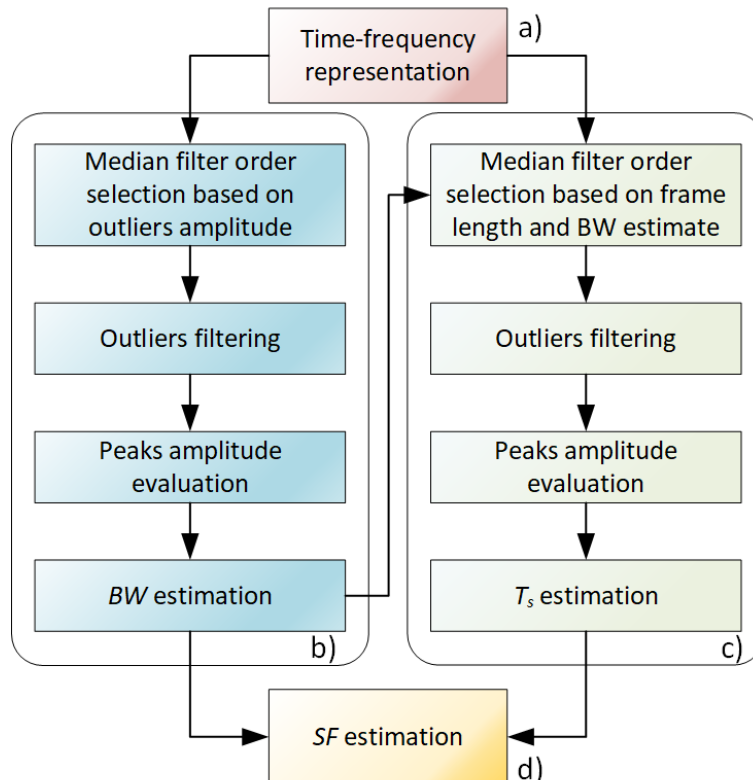


Figura 64 – Diagramma di flusso dell'algoritmo di classificazione proposto. a) Stimata della frequenza istantanea del segnale LoRa; b) misura del BW attraverso un'appropriata operazione di filtraggio mediano; c) ulteriore filtraggio mediano per la valutazione del T_s e d) stima finale del SF.

2.5.8.5 Verifica delle prestazioni del metodo proposto

Acquisizione del segnale

Per convalidare l'approccio CS proposto per la ricostruzione e la classificazione del segnale di Lora, è stato predisposto un apposito setup sperimentale, mostrato nella Figura 65. I segnali LoRa sono stati generati mediante una scheda ARM STMicroelectronics Nucleo L152RE Mbed a 32 bit e uno shield LoRa Semtech SX 1272. Lo shield LoRa è stato collegato alla scheda Nucleo per creare un nodo della rete LoRaWAN. Il nodo è stato configurato e controllato tramite interfaccia USB per mezzo di un Personal Computer che esegue la piattaforma ARM Mbed basata sul web. Una routine software programmata in linguaggio C è stata modificata, compilata e scaricata sulla piattaforma, consentendo così di configurare sul nodo i parametri LoRa, ovvero larghezza di banda, fattore di diffusione, tasso di codifica, numero di simboli di preambolo, velocità di bit, header esplicito o implicito, CRC, frequenza portante, potenza di trasmissione, ecc.

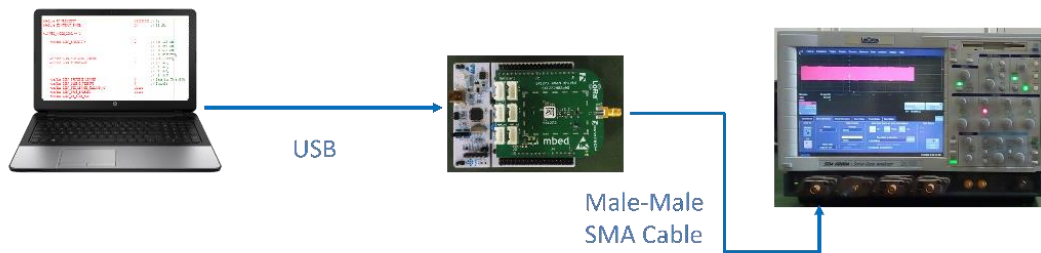


Figura 65 – Stazione automatica per la generazione e misurazione di segnali LoRa

Il connettore dell'antenna del nodo è stato collegato a un oscilloscopio digitale LeCroy SDA6000A tramite un connettore SMA maschio per acquisire il segnale LoRa generato. I test hanno preso in considerazione 36 realizzazioni di segnali LoRa, che rappresentano tutte le possibili combinazioni di BW e SF sia per il tasso di codifica più basso, 4/5, sia per quello più alto, 4/8. Gli altri parametri dei segnali sono stati impostati come: - il segnale è stato impostato come un'antenna. Gli altri parametri del segnale sono stati impostati come segue:

- Frequenza portante: 868 MHz
- Potenza di trasmissione: 14 dBm
- Lunghezza preambolo: 8
- CRC: abilitato
- Intestazione implicita: off

L'oscilloscopio è configurato con i seguenti parametri per tutte le acquisizioni:

- Scala verticale volt/divisione: 500 mV/div
- Scala orizzontale tempo/divisione: 20 ms/div
- Modalità di trigger: auto
- Frequenza di campionamento: 10 MSamples/s

La configurazione selezionata consente l'acquisizione di una finestra temporale di 200 ms. Alcune impostazioni dei parametri di Lora danno luogo a segnali di durata inferiore a 200 ms; di conseguenza, alcune porzioni del segnale acquisito non sono significative per la procedura di ricostruzione e classificazione. In questo caso, i campioni aggiuntivi irrilevanti vengono rimossi durante una fase di preelaborazione del segnale sul PC. Al contrario, i segnali caratterizzati da un SF più elevato e da un BW più basso con una durata superiore a 200 ms vengono acquisiti parzialmente. Infine, la frequenza di campionamento scelta è inferiore a quella richiesta dal criterio di Shannon Nyquist. Di

conseguenza, si verifica il fenomeno dell'aliasing e i campioni acquisiti sono di fatto repliche (alias) del segnale originale. In particolare, essendo f_c pari a 868 MHz, l'informazione del segnale LoRa viene recuperata osservando il suo alias centrato a 2 MHz. Inoltre, la frequenza di campionamento scelta è solitamente offerta su diverse piattaforme embedded già disponibili sul mercato, rendendo così possibile una futura implementazione su uno strumento autonomo ed economico.

Risultati della classificazione

Le prestazioni dell'algoritmo di ricostruzione e classificazione proposto sono state valutate in diverse condizioni di rumore. A tal fine, i segnali di prova sono stati corrotti numericamente sovrapponendo un rumore gaussiano a media zero di ampiezza nota. In particolare, sono state generate sequenze rumorose pseudocasuali in base a valori di SNR variabili nell'intervallo da 50 dB a -20 dB con un passo di -5 dB e aggiunte al segnale di ingresso. La deviazione standard del rumore (cioè la sua ampiezza al quadrato medio) è stata scelta pari a:

$$\sigma = V_{rms} \cdot 10^{\frac{-SNR}{20}} \quad (21)$$

dove V_{rms} è l'ampiezza del quadrato medio del segnale di ingresso.

Per ogni valore di SNR, 100 diverse realizzazioni di rumore sono state aggiunte al segnale di Lora in ingresso e il risultato è stato dato in input all'algoritmo di ricostruzione e classificazione. I risultati ottenuti sono riportati nella Figura 66, dove la percentuale di classificazioni corrette, per i segnali con CR=4/5, è evidenziata da una mappa di colori.

I risultati sono forniti in funzione dei valori di SNR e SF. Per ogni coppia SNR-SF, sono riportati sei valori percentuali; ogni SF è, infatti, associato a due righe: quella superiore è relativa alla percentuale di identificazione corretta di BW; quella inferiore alla percentuale di identificazione corretta di SF. Inoltre, i risultati sono riportati in tre colonne, corrispondenti ai tre diversi valori di BW. Per maggiore chiarezza, l'insero della Figura 66 mostra la disposizione dei risultati delle tre combinazioni di valori SNR-SF.

Osservando la mappa dei colori, si nota che la regione blu, dove la percentuale di classificazione corretta è vicina al 100%, si estende fino a SNR 0. Al diminuire di SNR, la percentuale di classificazione corretta peggiora drasticamente. È inoltre interessante osservare che per valori negativi di SNR l'algoritmo tende a sottostimare l'SF e la parte colorata in blu per SF=7 si estende

fino a -20 dB. Inoltre, per valori negativi di SNR e SF fino a 9, la percentuale di classificazione corretta è maggiore per la configurazione con BW pari a 250 kHz e 500 kHz che per 125 kHz; al contrario, per SF compresi tra 10 e 12, la percentuale di classificazione corretta è migliore per il caso BW pari a 125 kHz.

Il risultato più interessante, tuttavia, riguarda l'onere computazionale e il tempo di esecuzione. Infatti, i risultati ottenuti sono stati ottenuti con un numero di campioni pari al 15% di quelli richiesti da un approccio basato su un paradigma di campionamento convenzionale.

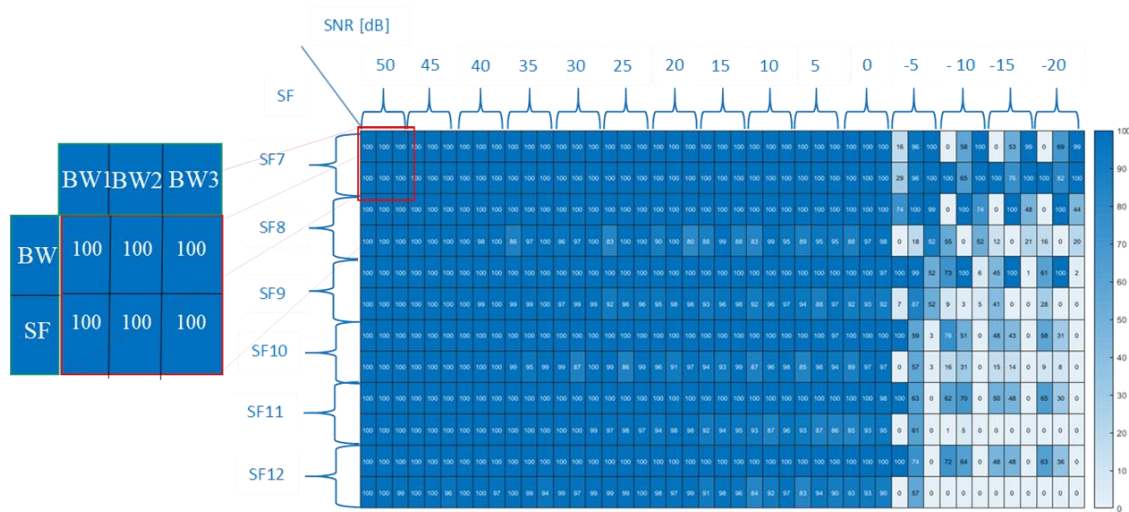


Figura 66 – Mappa a colori della percentuale di classificazione corretta per diversi valori di BW, SF e SNR

In conclusione, mediante un approccio di campionamento compressivo che rappresenta i segnali LoRa come segnali localmente sparsi in termini di funzioni coseno discrete. L'approccio proposto consente di registrare i segnali LoRa con risorse di memoria limitate. Il metodo corrispondente è stato implementato e validato mediante una piattaforma di prova per la generazione, la digitalizzazione e l'elaborazione digitale di segnali LoRa reali. Inoltre, è stato considerato un algoritmo di classificazione, progettato per operare sul segnale ricostruito, evidenziando la possibilità di stimare i parametri caratteristici dei segnali LoRa a partire da dati acquisiti in forma compressa.

2.6 Sistema di gestione e storage dei dati

La gestione dei dati e delle informazioni provenienti dal sistema di “data sourcing” (cioè: sensore/acquisizione/trasmissione) rappresenta un aspetto cruciale per i sistemi SHM. In linea generale, un sistema di gestione si deve occupare dell’esecuzione dei seguenti compiti:

- “database” per la conservazione (storage) temporanea o definitiva dei vari dati;
- modelli per lo storage sistematico e il recupero veloce dei dati;
- rapporti di dati per il recupero di informazioni di sintesi riguardo allo stato di salute della struttura;
- interfaccia per l’analisi e la comunicazione dei dati.

Il sistema di gestione dei dati è basato su una piattaforma di “data warehouse” generalmente costituita da:

- una console, per la proiezione dei dati e il controllo del server;
- un server ed un sistema di storage, entrambi adoperati per depositare, archiviare, recuperare, manipolare, i dati e le informazioni derivanti dal sistema di data sourcing.

Le operazioni di data warehouse sono comunemente eseguite mediante tools basati sull’utilizzo di database, tra cui RDBMS (Relational Database Management System). Nel paragrafo **Errore. L’origine riferimento non è stata trovata.**, si riporta una dettagliata trattazione degli aspetti più rilevanti relativi alle basi di dati e alla loro progettazione.

Negli ultimi anni, con la graduale diffusione della digitalizzazione nell’ambito delle costruzioni mediante strumenti quali il Building Information Modelling (BIM), è emersa l’opportunità di sfruttare ambienti digitali al fine di ottenere un elevato grado di fruibilità ed interoperabilità tra i diversi sistemi informativi esterni per la gestione dei dati di monitoraggio eterogenei (provenienti da settori differenti). Nel paragrafo 2.6.2, invece, si descrive una procedura di digitalizzazione delle informazioni nell’ambito della qualifica del sistema di monitoraggio a livello esecutivo e la sua applicazione ad un caso studio costituito da un’infrastruttura viaria esistente.

2.6.1 Basi di dati

Una base di dati o database può essere considerata come una raccolta di dati progettati in modo tale da poter essere utilizzati in maniera ottimizzata da differenti applicazioni e da utenti diversi. Si tratta di una collezione di dati correlati con le seguenti proprietà implicite:

- rappresenta un certo aspetto del mondo reale;

- è una collezione di dati coerenti con un certo significato;
- è progettata e popolata con dati con un certo significato intrinseco.

I sistemi di database sono stati sviluppati per semplificare lo sviluppo di applicazioni che fanno uso intensivo di dati di tipo strutturato, cioè dati che hanno per natura una struttura ripetitiva. Pertanto, essi si prestano ad essere un supporto ideale per la memorizzazione dei dati di un sistema di monitoraggio. Un database è costituito da informazioni permanenti organizzate secondo una struttura definita da un modello dati che rappresenta una situazione reale che si vuole automatizzare. Le informazioni che popolano un database, appartenenti a distinti livelli di astrazione, possono essere distinte in due casistiche diverse:

- i dati rappresentano le entità del sistema da modellare: in questo caso, le proprietà di tali entità sono descritte in termini di valori (di tipo numerico, alfanumerico ecc.) e i dati sono raggruppati o classificati in categorie in base alla loro struttura comune;
- le strutture (metadati) descrivono le caratteristiche comuni delle varie categorie di dati, quali i nomi e i tipi dei valori delle proprietà.

Generalmente, nei file tradizionali le informazioni sono organizzate in modo sequenziale; viceversa, in un database, in accordo con il modello dati, vengono stabilite relazioni tra le varie porzioni di informazioni. I dati devono essere organizzati con ridondanza minima, ossia non devono essere inutilmente duplicati per evitare spreco di risorse di memorizzazione e, soprattutto, per evitare l'onere della gestione di copie multiple che possono mettere a rischio la consistenza e l'affidabilità dei dati stessi. I dati, inoltre, devono essere utilizzabili contemporaneamente da più utenti, evitando che ognuno crei una copia propria degli stessi; deve, pertanto, esistere un'unica versione dei dati a cui gli utenti accedono secondo specifici diritti, prevedendo specifici accorgimenti che consentano di evitare che l'attività dei vari utenti generi conflitti per l'uso contemporaneo degli stessi dati.

Tra le peculiarità dei database, si ha che i dati contenuti al loro interno devono essere permanenti. Ciò implica non solo l'utilizzo di memorie di massa, ma anche l'applicazione di tecniche che preservino l'insieme dei dati in caso di malfunzionamento di un qualsiasi componente del sistema. Progettare una base di dati significa definire struttura, caratteristiche e contenuto: si tratta, come è facile immaginare, di un processo nel quale bisogna prendere molte decisioni strategiche e l'uso di opportune metodologie è fondamentale per la realizzazione di un prodotto di alta qualità. In particolare, è molto importante decidere il modo in cui i dati vengono conservati perché ciò determinerà successivamente anche il modo in cui i dati potranno essere estratti; ad esempio, potrebbe

capitare che non preoccupandosi dell'organizzazione dei dati all'interno degli archivi durante la progettazione, si abbiano difficoltà o complicazioni eccessive durante la fase del loro recupero.

2.6.1.1 Database relazionali

Storicamente i DBMS relazionali (RDBMS) furono i primi a essere basati su un modello sviluppato nel 1970 da Edward Codd presso l'IBM San José Research Laboratory. L'approccio adottato è basato sulla teoria matematica delle relazioni tra insiemi. Esso prescinde da specifiche tecniche realizzative e da considerazioni relative alla facilità di realizzazione e all'efficienza delle prestazioni. Le prime implementazioni risalgono agli anni compresi tra il 1977 e il 1983. L'indipendenza del modello da specifiche tecnologie informatiche, se da una parte ne ha frenato inizialmente l'applicazione, dall'altra ha costituito il suo punto di forza e ne ha permesso successivamente un'enorme diffusione su tutte le piattaforme e architetture.

L'uso di un modello matematico dei dati consente l'applicazione di linguaggi e metodologie formali per l'accesso ai dati. In particolare, le due metodologie su cui si basano i linguaggi per l'accesso ai dati di un database relazionale sono l'algebra relazionale e il calcolo relazionale. In base alla struttura logica esistono diversi tipi di database: gerarchico, reticolare, relazionale e ad oggetti. Il più utilizzato è quello relazionale e fu introdotto da Edgar F. Codd nel 1970. Il modello permette di pensare ai dati in termini di tabelle, righe e colonne e si basa sulle relazioni che si stabiliscono tra di loro. Ogni tabella contiene dei dati relativi ad un'entità, le colonne rappresentano i campi (proprietà dell'entità), mentre le righe le ricorrenze dell'entità.

Il modello relazionale definito da Codd con l'obiettivo di non duplicare le informazioni consiste in un insieme di tabelle che possono essere collegate tra loro tramite relazioni. Alla base del modello relazionale, c'è il concetto matematico di relazioni tra insiemi. Il modello relazionale presenta alcuni benefici:

- l'indipendenza sia fisica che logica dei dati;
- la rappresentazione logica non fa nessun riferimento a quella fisica;
- l'informazione è contenuta nei campi e non in strutture fisiche come i puntatori.

L'indipendenza dalla struttura fisica fa sì che modifiche alla rappresentazione fisica non comportino modifiche agli applicativi (uso di una struttura di accesso piuttosto che un'altra). L'indipendenza logica fa sì che modifiche alla rappresentazione logica non comportino modifiche alle applicazioni che operano sul database. L'indipendenza fisica dei dati è un aspetto molto importante perché permette che essi possano essere richiamati sia da diversi applicativi che da remoto. Nel caso di un sistema di monitoraggio in continuo una volta richiamati i dati da remoto sarà possibile processarli.

L'elemento cardine di questo modello di strutturazione dei dati è la tabella che può essere considerata una sorta di spazio dove viene effettuata la formalizzazione dei dati. Una tabella si compone di due elementi fondamentali organizzati secondo due dimensioni differenti:

- orizzontale: metadati - campi;
- verticale: dati - registrazioni.

I campi possono essere considerati attributi, metadati, ovvero quei dati che non fanno parte del contenuto vero e proprio del database ma servono a descrivere i singoli elementi nei quali sono suddivise le informazioni. I record (registrazioni di dati) costituiscono insiemi coerenti di dati resi significativi dalla struttura definita dai metadati. Ogni riga condividerà, quindi, la stessa struttura (metadati), che la informa e la mette in relazione con le altre righe; ogni riga può essere differente dalle altre ma avrà sempre la stessa struttura.

Una base di dati può essere utilizzata con due modalità: interattivamente o da programmi. La prima modalità è la più semplice e può essere padroneggiata rapidamente anche da non esperti. I calcolatori hanno fatto grandi progressi in questa direzione, in particolare con l'impiego di terminali grafici, ed hanno liberato gli utenti dalla dipendenza dai linguaggi di programmazione per generare facilmente report e semplici statistiche, a partire dai dati memorizzati. La seconda modalità, che consiste in un accesso ai dati da programmi scritti in un linguaggio di programmazione, è importante per l'esperto per l'automatizzazione di applicazioni che prevedono elaborazioni particolari sui dati oppure che debba disegnare interfacce specifiche per utenti non esperti.

Un esempio di linguaggio per l'uso interattivo sono gli operatori dell'algebra relazionale e il linguaggio SQL (Structured Query Language), che offre una sintassi per l'algebra relazionale che si è dimostrata molto semplice per non esperti. Il termine algebra è dovuto al fatto che sono previsti operatori che agiscono su relazioni e producono altre relazioni come risultato. L'algebra relazionale definisce gli operatori rilevanti nella selezione di dati rappresentati mediante il modello relazionale. La maggior parte dei comandi di interrogazione definiti dall'SQL costituisce la realizzazione di operazioni definite nell'algebra relazionale. Quest'ultima rappresenta pertanto il fondamento formale del linguaggio.

Gli operatori dell'algebra relazionale possono essere classificati in:

- operatori di base;
- operatori derivati.

Gli operatori di base permettono di realizzare tutte le operazioni principali di selezione di dati all'interno di uno schema relazionale; gli operatori derivati, presenti in molti sistemi relazionali, sono

derivabili dai primi mediante opportune operazioni algebriche. Molti sistemi relazionali, inoltre, forniscono dei costrutti aggiuntivi che realizzano operazioni che non fanno parte dell'algebra relazionale e che, in generale, non sono derivabili dagli operatori di base. In particolare, sono spesso utilizzati il complemento, le funzioni di aggregazione e la chiusura transitiva. Tutti gli operatori relazionali hanno la caratteristica comune di avere come argomenti delle relazioni (tabelle) e fornire come risultato altre relazioni (ancora tabelle).

Gli operatori di base sono descritti di seguito.

- *Proiezione*: data una tabella e un insieme di attributi, la proiezione restituisce una tabella con tutte le righe di quella di partenza, ma con le sole colonne identificate dagli attributi.
- *Selezione*: data una tabella e una condizione logica definita in base ai valori dei suoi attributi, la selezione restituisce una tabella con gli stessi attributi di quella di partenza, ma con le sole righe che soddisfano la condizione.
- *Prodotto o congiunzione*: date due tabelle, il loro prodotto restituisce una tabella le cui righe sono ottenute concatenando ogni riga della prima con tutte le righe della seconda.
- *Ridenominazione*: dati come argomenti una tabella e una sequenza di attributi che non appartengono a essa, la ridenominazione restituisce una tabella ottenuta dalla tabella di partenza cambiandone tutti gli attributi ordinatamente in quelli della sequenza di attributi data come argomento. Espresso in altri termini, la ridenominazione di una tabella in base a un insieme di nomi consente di ridenominarne ordinatamente le colonne assegnando loro tali nomi.
- *Unione di due tabelle*: date due tabelle con gli stessi attributi, l'unione restituisce come risultato una tabella contenente tutte le righe delle due tabelle considerate.
- *Differenza di due tabelle*: anche in questo caso le tabelle devono avere la stessa struttura; il risultato è una tabella che contiene tutte le righe della prima escluse quelle contenute nella seconda. In altre parole, la tabella restituita è uguale alla prima tabella epurata dalle righe uguali cioè contenenti gli stessi valori a righe presenti nella seconda tabella.

Gli operatori derivati sono descritti di seguito.

- *Giunzione (join) di due tabelle*. Date due tabelle A e B, e considerati due attributi distinti A1 di A e B1 di B, la giunzione restituisce una tabella contenente tutte le righe di A concatenate alle righe di B per cui i valori di A1 e B1 sono uguali, in cui sono eliminate le righe uguali in quanto ridondanti. La giunzione può essere ottenuta mediante gli operatori di base applicando il seguente procedimento:
 1. effettuare il prodotto tra le due tabelle A e B;

2. sulla tabella risultante eseguire la selezione delle righe in cui i valori degli attributi A1 e B1 sono uguali.

La giunzione viene anche indicata con il termine equi-giunzione (equi-join), per distinguerla dal caso in cui la condizione di selezione del punto 2 non sia definita mediante l'operatore di uguaglianza, ma sia una condizione nella forma $A1 \text{ op } B1$, dove op è un qualsiasi operatore di confronto ($>$, $<$, $\leq$ ecc.).

- *Giunzione naturale (natural join) di due tabelle:* date due tabelle A e B, aventi un insieme di attributi A1 comuni, la giunzione naturale restituisce una tabella contenente tutte le righe di A concatenate alle righe di B per cui i valori di A1 in A e in B sono uguali, in cui sono eliminati i dati ridondanti, ovvero le righe uguali e uno dei due insiemi di colonne corrispondenti ad A1. La giunzione naturale può essere ottenuta mediante gli operatori di base definiti precedentemente, applicando il seguente procedimento:
 1. effettuare la ridenominazione degli attributi di cui è composto A1 in A e in B, in modo da rendere distinti gli attributi uguali, ottenendo le tabelle A' e B';
 2. effettuare il prodotto tra le due tabelle A' e B';
 3. sulla tabella risultante dal punto precedente eseguire la selezione delle righe in cui i valori degli attributi ottenuti dalle ridenominazioni di A1 sono uguali;
 4. sulla tabella risultante dal punto precedente effettuare una proiezione di tutti gli attributi di A, e di quelli di B esclusi quelli contenuti in A1.
- *-Semi-giunzione (semi-join) di due tabelle:* date due tabelle A e B, aventi un insieme A1 di attributi comuni, la semi-giunzione restituisce una tabella contenente tutte le righe di A per cui i valori di A1 in A e in B sono uguali. La semi-giunzione può essere ottenuta effettuando una proiezione degli attributi di A sulla giunzione naturale di A e B.
- *- Giunzione esterna (external join) di due tabelle:* date due tabelle A e B, aventi un insieme A1 di attributi comuni, la giunzione esterna restituisce una tabella contenente:
 1. tutte le righe di A concatenate alle righe di B per cui i valori di A1 in A e in B sono uguali, in cui sono eliminati i dati ridondanti, ovvero le righe uguali e uno dei due insiemi di colonne corrispondenti ad A1;
 2. la concatenazione di tutte le righe di A con una riga di B contenente valori nulli;
 3. la concatenazione di tutte le righe di B con una riga di A contenente valori nulli.La giunzione esterna può essere ottenuta effettuando una unione della giunzione naturale di A e B e delle tabelle ottenute mediante il prodotto di ciascuna delle due tabelle con una riga dell'altra contenente valori nulli.

- *Intersezione di due tabelle:* date due tabelle con gli stessi attributi, l'intersezione restituisce come risultato una tabella contenente tutte le righe comuni alle due tabelle considerate.
- *Divisione di una tabella per un'altra tabella:* date due tabelle A e B, dove B ha un sottoinsieme degli attributi di A, la divisione di A per B restituisce come risultato una tabella contenente le righe che, per gli attributi comuni, presentano gli stessi valori in A e in B e le colonne di A corrispondenti agli attributi di A che non sono attributi di B.

Oltre al modello relazionale, particolarmente utile è diffuso nell'ambito della gestione dei dati di monitoraggio mediante database è il modello Entity-Relationship (Entità-Relazione E-R), elaborato originariamente da Peter Chen del Massachusetts Institute of Technology nel 1976. Lo scopo di tale modello è quello di permettere la descrizione dello schema concettuale di una situazione reale senza preoccuparsi dell'efficienza o della progettazione del database fisico. Esso è al contempo molto semplice e consente una rappresentazione espressiva delle realtà in esame. Inoltre, tramite un metodo assolutamente algoritmico, è possibile passare semplicemente da questo modello a quello relazionale. Lo schema entità-relazione ha una rappresentazione grafica che permette di avere immediatamente la visione globale dello schema concettuale del database. La rappresentazione grafica che si ottiene viene chiamata diagramma entità-relazione (Entity-Relationship Diagram – ERD).

Nello specifico, il modello ER è costituito da tre elementi: entità, relazioni ed attributi. Questi elementi vengono disposti su un diagramma secondo questo criterio: le entità vengono raffigurate con dei rettangoli, le relazioni si raffigurano con dei rombi, gli attributi con delle ellissi. I rettangoli, i rombi e le ellissi vengono collegati con delle linee. Il modello entità-relazione prevede come prima attività della progettazione concettuale l'individuazione delle entità. Le entità sono gli elementi del mondo reale e ognuna di esse è costituita da una serie di attributi. I set di entità possiedono delle proprietà, chiamate attributi, le quali associano ad ogni entità del set un valore appartenente al dominio dei possibili valori per quell'attributo. Di solito il dominio sarà un insieme di interi, numeri reali, stringhe di caratteri, valori booleani ma anche immagini, audio e video come nei più recenti database multimediali. È importante sottolineare che un attributo o un gruppo di attributi costituisce la chiave primaria di ogni entità. Si tratta di sceglierla tra gli attributi posti, oppure di creare un nuovo attributo, tipicamente un codice identificativo. Una relazione, invece, è un legame di tipo logico che coinvolge due o più entità. Le relazioni hanno un unico attributo esplicito, la cardinalità. In generale la cardinalità indica il numero di entità dell'insieme A che può essere associato ad ogni elemento di un insieme B. Sono moltissime le ambiguità che possono presentarsi nella decisione sulla cardinalità di una relazione. Bisogna cercare di sfruttare il modello ER evitando di ragionare in termini di

modello relazionale durante la fase iniziale di sviluppo. In generale non bisogna perdere di vista cosa deve fare la nostra applicazione a favore di come deve farlo. A questo scopo bisogna per prima cosa dedurre il diagramma ER completo in ogni sua parte e poi bisogna soffermarsi a lungo nel perfezionamento dello schema fino a quando non si è sicuri di essere il più vicini alla forma finale. In generale da un diagramma ER ben fatto discende uno schema relazionale senza difetti. Uno schema relazionale senza difetti rappresenta la parte principale di qualunque applicazione. Esso consente in primo luogo la stesura immediata del programma applicativo. In seconda istanza facilita migliorie ed estensioni da fare in seguito sul programma stesso, oltre che sullo schema dei dati.

Rispetto alle relazioni, come detto, “mettere in relazione” è l’elemento qualificante di un database relazionale. Cosa mettere in relazione, e soprattutto come, non è tuttavia intuitivo. Un altro elemento importante del modello relazionale è la capacità di proiettare le connessioni al di fuori delle singole tabelle per stabilire dei legami all’interno del database: più tabelle possono dunque essere messe in relazione, potenziando l’espressività dei singoli dati. Ci sono diversi tipi di relazione, tra cui le fondamentali sono:

- *uno a uno*: due tabelle sono in relazione uno a uno quando a ogni riga di una corrisponde una sola riga dell’altra e viceversa; grazie ad un elemento che qualifica univocamente ogni riga, si possono così unire le informazioni delle due tabelle grazie ad una chiave univoca;
- *uno a molti*: dove più righe di una tabella possono avere relazioni con più righe di un’altra tabella utilizzando sempre un campo comune, andando ad unire (join) le informazioni che le tabelle contengono;
- *molti a molti*: a ognuna delle righe di una tabella possono corrispondere molte righe in un’altra tabella e viceversa; risulta agevole l’utilizzo di una tabella di appoggio.

Per rendere meno problematiche le relazioni tra tabelle differenti conviene scindere le informazioni per essere contenute singolarmente in celle; un database dovrebbe essere progettato e articolato nelle relazioni che suddividono l’insieme della visione dei dati in una serie di tabelle che ne rendano veloce e pratico l’utilizzo evitando ridondanze e inutili join che sono causa di degradazione delle prestazioni del RDBMS (velocità manipolazione dati). Per stabilire una relazione tra tabelle di un database di un sistema di monitoraggio è utile inserire un campo con codice identificativo (ID) per poter caratterizzare maggiormente il dato. In Figura 67 si riporta un esempio di campo ID che funge da collegamento ad un’altra tabella.

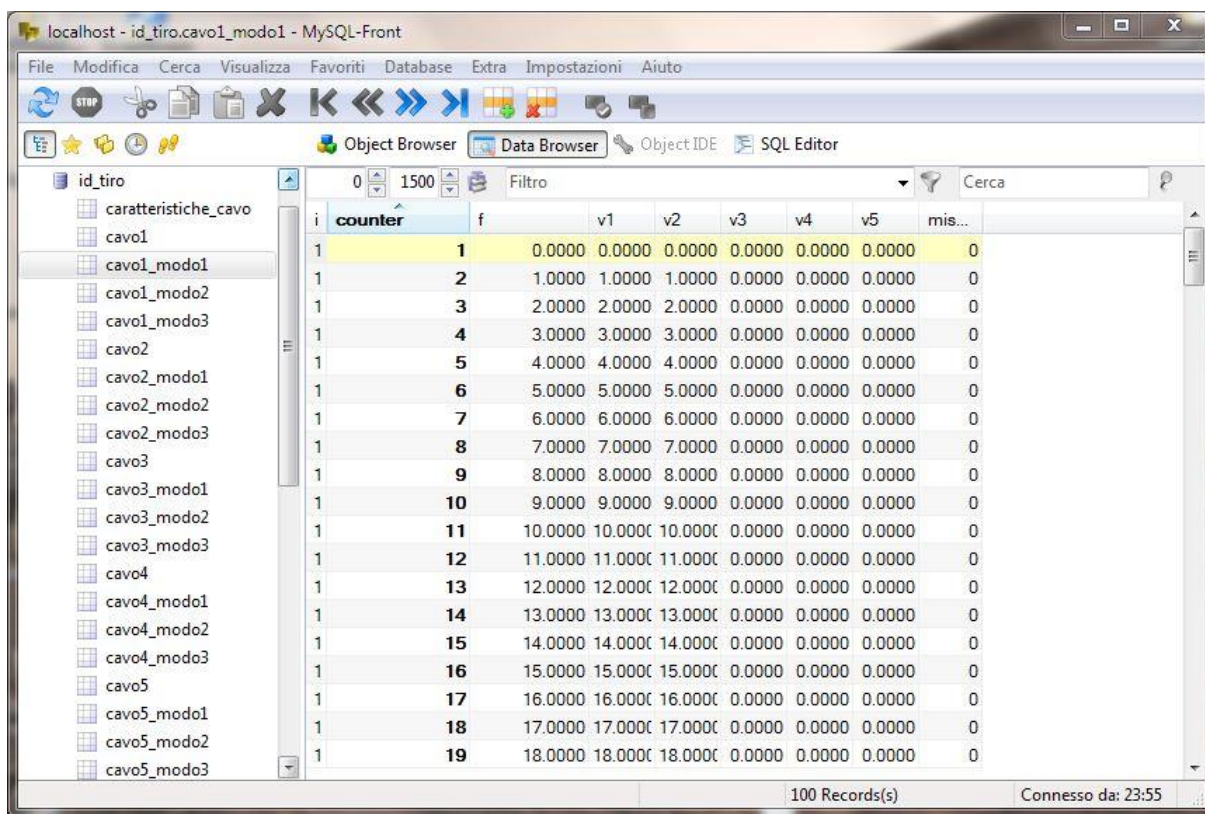
Id	counter	time_assoluto	T1	T2	T3	T1_2	T1_3	T2_3	missed1	missed2	missed3	missed4
1	366	2014-09-09 13:41:10	143284	136687	137711	145483	143981	135868	1	1	1	1
1	367	2014-09-09 13:41:11	143284	136687	137711	145483	143981	135868	1	1	1	1
1	375	2014-09-09 13:41:12	143284	136687	137711	145483	143981	135868	1	1	1	1
1	385	2014-09-09 13:41:13	143284	136687	137711	145483	143981	135868	1	1	1	1
1	389	2014-09-09 13:44:57	143284	136687	117494	145483	146508	152041	1	1	0	1
1	390	2014-09-09 14:04:52	143284	136687	124549	145483	145626	146398	1	1	0	1
1	391	2014-09-09 14:24:39	126052	136687	125692	122507	126097	145483	0	1	0	1
1	392	2014-09-09 14:44:39	126292	136687	126013	122828	126327	145226	0	1	0	1
1	393	2014-09-09 15:04:48	125961	136687	124550	122385	126137	146397	0	1	1	1
1	394	2014-09-09 15:24:34	126051	136687	124467	122506	126249	146463	1	1	0	1

Figura 67 – Esempio di relazione (ID) tra tabelle

Non esiste, in generale, una formula che, una volta applicata, consenta di definire automaticamente una struttura ottimale. Una buona progettazione dipende da molti fattori, non ultimo una buona esperienza sul campo, che consenta di comprendere più facilmente quale sia il rapporto ottimale tra dispersione dei dati e conseguenti prestazioni del server. Non è scontato l'assunto che lo spezzettamento delle informazioni, portato alle estreme conseguenze, sia la soluzione migliore per un database; spesso si finisce per avere troppe tabelle da gestire e quindi interrogazioni troppo complesse con conseguenti prestazioni degradate del server. Bisogna tenere bene a mente che in un database relazionale sono le relazioni ad assumere un ruolo fondamentale ed è compito del progettista scegliere quelle più adatte in base ai dati e alle situazioni. Progettare un database è un processo di distribuzione dei dati nelle differenti tabelle, mentre allo stesso tempo si intessono relazioni, incardinandole tra chiavi di volta che tengono insieme l'intera base di dati.

Una chiave è quel campo, o insieme di campi, i cui valori sono in grado di identificare univocamente un record all'interno di una tabella e allo stesso tempo deve essere composta da un numero limitato di attributi. Bisogna tener presente un principio di economicità che spinge a utilizzare insiemi ridotti di informazioni per gestire altre informazioni, per mantenere una discreta efficienza del sistema: una chiave composta da troppi campi rallenterebbe ogni operazione di lettura e scrittura sul database, dato l'alto numero di valori in gioco per identificare ogni singolo record. Le chiavi primarie rafforzano l'integrità dell'entità identificando univocamente una specifica istanza di un'entità. Una chiave primaria non può contenere valori nulli poiché per identificare una riga all'interno di una tabella è

necessario un valore che non sia indeterminato. La scelta della chiave primaria è dunque fondamentale per la coerenza del database e per la velocità di lettura e scrittura dato il numero considerevole di record. La soluzione a questo problema consiste nell'utilizzare chiavi surrogate, una chiave artificialmente introdotta che assicuri l'unicità dei valori nel campo: si può ad esempio inserire un campo ID costituito da numeri interi e incrementali in questo modo non si potranno mai avere due record con lo stesso campo ID. Altro vantaggio è che tale tipo di chiave è estremamente economica poiché risulta composto da un solo campo e quindi rende più veloci le operazioni sul database. In un sistema di monitoraggio dove i dati vengono scritti a elevate frequenze di campionamento è conveniente utilizzare come chiave primaria una di tipo surrogato grazie alla quale è possibile rendere univoco un record. In Figura 68 si riporta un esempio in cui il campo counter è auto incrementante e rappresenta la chiave primaria surrogata, in quanto gli altri campi non identificano univocamente il record.



i	counter	f	v1	v2	v3	v4	v5	mis...
1	1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	2	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	3	2.0000	2.0000	2.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	4	3.0000	3.0000	3.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	5	4.0000	4.0000	4.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	6	5.0000	5.0000	5.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	7	6.0000	6.0000	6.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	8	7.0000	7.0000	7.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	9	8.0000	8.0000	8.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	10	9.0000	9.0000	9.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	11	10.0000	10.0000	10.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	12	11.0000	11.0000	11.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	13	12.0000	12.0000	12.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	14	13.0000	13.0000	13.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	15	14.0000	14.0000	14.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	16	15.0000	15.0000	15.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	17	16.0000	16.0000	16.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	18	17.0000	17.0000	17.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	19	18.0000	18.0000	18.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0

Figura 68 – Esempio di relazione (ID) tra tabelle

Una chiave esterna può essere utilizzata per stabilire e applicare un collegamento tra i dati di due tabelle. La relazione tra chiave esterna e primaria pone un serio problema di integrità referenziale, e dunque alla consistenza stessa del database cui appartengono le tabelle messe in relazione. Per assicurare l'integrità referenziale tra tabelle in relazione, ogni campo di una chiave esterna deve contenere unicamente valori che si possono riscontrare nella chiave primaria della tabella in relazione. Questa corrispondenza consente di evitare anomalie di inserimento, aggiornamento e cancellazione. Tra le diverse tabelle la relazione non si stabilisce tra colonne con lo stesso nome ma tra campi con contenuto omogeneo. La chiave esterna è un insieme di attributi, o colonne, i cui valori corrispondono a quelli della chiave primaria della tabella a cui fanno riferimento.

2.6.1.2 Progettazione di un database

Progettare un database significa definirne struttura, caratteristiche e contenuto: si tratta di un processo nel quale bisogna prendere molte decisioni strategiche. Tuttavia, tale fase costituisce solo una componente del processo di sviluppo di un sistema informativo complesso e va quindi inquadrata in un contesto più ampio, quello del ciclo di vita dei sistemi informativi. Il ciclo di vita di un sistema informativo comprende, generalmente, le seguenti attività:

- *Studio di fattibilità*: per definire i costi delle varie alternative possibili e a stabilire le priorità di realizzazione delle varie componenti del sistema.
- *Raccolta e analisi dei requisiti*: consiste nella individuazione e nello studio delle proprietà e delle funzionalità che il sistema informativo dovrà avere e vengono stabiliti anche i requisiti software e hardware del sistema informativo.
- *Progettazione*: si può distinguere in progettazione dei dati e progettazione delle applicazioni. Nella prima si individua la struttura e l'organizzazione che i dati dovranno avere, nell'altra si definiscono le caratteristiche dei programmi applicativi. Le due attività sono complementari e possono procedere in parallelo o a cascata.
- *Implementazione*: consiste nella realizzazione del sistema informativo secondo la struttura e le caratteristiche definite nella fase di progettazione. Viene costruita e popolata la base di dati e viene sviluppato il codice dei programmi.
- *Validazione e collaudo*: serve a verificare il corretto funzionamento e la qualità del sistema informativo in tutte le condizioni operative.
- *Funzionamento*: in questa fase il sistema informativo diventa operativo e richiede solo operazioni di gestione e manutenzione.

Progettare un database, strutturare i dati in differenti tabelle, decidere quali campi devono essere creati non è un procedimento meccanico. Non è detto che lo spezzettamento delle informazioni in più tabelle sia la soluzione ottimale, avere troppe tabelle da gestire e interrogare potrebbe portare a

prestazioni ridotte del database. Quindi bisogna capire bene a cosa servirà il database, quali saranno le informazioni e i relativi metodi di manipolazione. Nel database relazionale sono proprio le relazioni ad assumere un ruolo fondamentale e tra i dati c'è la possibilità di tracciare molteplici percorsi. La progettazione è quindi un processo di distribuzione dei dati fra differenti tabelle creando relazioni grazie alle chiavi che tengono insieme l'intera base di dati e costituiscono delle cerniere logiche sulle quali si articolano le relazioni tra le tabelle.

La progettazione di un database si articola in tre fasi fondamentali, ciascuna delle quali si riferisce a un diverso livello di astrazione nella rappresentazione dei dati e delle relazioni tra essi. Le fasi riconosciute fondamentali nella progettazione di un database sono le seguenti:

- progetto concettuale;
- progetto logico;
- progetto fisico.

La scomposizione in fasi del processo di progettazione ha lo scopo di separare le diverse attività di risoluzione di problemi e di garantire la possibilità di modificare le soluzioni adottate ai livelli inferiori senza dover riprogettare quanto definito nei livelli superiori. A ciascuna fase di progettazione corrispondono specifici modelli per la rappresentazione dei dati, ovvero tecniche per la rappresentazione degli aspetti rilevanti della realtà da modellare, definite da strumenti e vincoli specifici. Nella progettazione di un database si possono individuare:

- analisi del problema e dei requisiti;
- progettazione concettuale (modello E-R);
- progettazione logica (schema logico)
- progettazione fisica e implementazione;
- realizzazione delle applicazioni.

I primi tre step corrispondono alla modellazione dei dati, le ultime due a quella funzionale. Con l'analisi preliminare si cerca di capire il dominio dell'applicazione, cioè quali informazioni devono essere salvate e in che modo esse sono manipolate. Il modello concettuale descrive quello che deve essere rappresentato, quello logico come sono organizzati i dati. Con la modellazione quindi si progettano le tabelle del database, con quella funzionale s'implementano le tabelle e si creano le funzioni che accedono ai dati. Nel progetto fisico viene stabilito come le strutture a livello logico debbano essere organizzate negli archivi e nelle strutture del file system: esso dipende quindi non solo dal tipo di DBMS utilizzato, ma anche dal sistema operativo e in ultima istanza dalla piattaforma hardware del sistema che ospita il DBMS.

È pertanto il livello di progettazione in cui si può far uso del minor livello di astrazione, dovendo rispettare i vincoli tecnici imposti dal sistema ospite. Grazie al modello E-R si possono rappresentare graficamente tutti gli oggetti che fanno parte di un database in modo che il flusso delle informazioni possa essere seguito e verificato; esso verrà poi utilizzato per creare il database fisico.

È ovvio che, in un database ben progettato, lo schema fisico può essere modificato senza alterare quello logico e senza richiedere una ridefinizione dei sottoschemi. Questa indipendenza è nota come indipendenza fisica dei dati, di cui già si è detto in precedenza. Ciò implica che le modifiche all'organizzazione del database fisico possono alterare l'efficienza dei programmi applicativi, ma non sarà mai necessario riscrivere tali programmi solo perché lo schema fisico ha modificato l'implementazione dello schema logico.

L'uso del database può rendere necessario modificare lo schema concettuale, per esempio aggiungendo informazioni su diversi tipi di entità o altre informazioni su entità già esistenti. Lo schema concettuale può subire molte modifiche, senza coinvolgere i sottoschemi esistenti, mentre altri tipi di variazione allo schema concettuale possono essere apportati solo ridefinendo la corrispondenza tra sottoschema e schema concettuale. Ancora una volta non sono necessari variazioni ai programmi applicativi. L'unico tipo di variazione dello schema concettuale che non si riflette in una semplice ridefinizione della corrispondenza col sottoschema si verifica quando vengono cancellate alcune informazioni del sottoschema. Naturalmente tali variazioni richiederanno la riscrittura o l'eliminazione di alcuni programmi applicativi.

Il reperimento e l'analisi dei requisiti di una applicazione sono attività difficilmente standardizzabili perché dipendono molto dall'applicazione considerata. La conoscenza astratta riguarda i fatti generali che descrivono: (i) la struttura della conoscenza concreta; (ii) le restrizioni sui valori possibili della conoscenza concreta e sui modi in cui essi possono evolvere nel tempo (vincoli d'integrità); (iii) le regole per derivare nuovi fatti da altri noti. I vincoli d'integrità dinamici definiscono delle condizioni sul modo in cui la conoscenza concreta può evolvere nel tempo.

Per raccolta dei requisiti si intende la completa individuazione dei problemi che il sistema da realizzare deve risolvere e le caratteristiche che tale sistema dovrà avere. Per caratteristiche del sistema si intendono sia gli aspetti statici (i dati) che gli aspetti dinamici (le operazioni sui dati). I requisiti vengono inizialmente raccolti in specifiche espresse in linguaggio naturale e, per questo motivo, spesso ambigue e disorganizzate. L'analisi dei requisiti consiste nel chiarimento e nell'organizzazione delle specifiche dei requisiti. Si tratta ovviamente di attività fortemente

interconnesse: l'attività di analisi inizia con i primi requisiti ottenuti per poi procedere di pari passo con attività di raccolta.

L'astrazione è uno degli aspetti fondamentali perché ci permette di creare dei modelli su cui in seguito vengono costruite le applicazioni. La fase di analisi serve a modellare il problema e quindi adottare una soluzione tecnica. Un modello di dati consiste in una rappresentazione astratta delle strutture dei dati di un database. La modellazione serve a tradurre i dati dal punto di vista di un utente a quello del database. Esistono due tipologie di modellazione:

- modello Entità-Relazione (ER)
- modello a Oggetti.

La prima operazione nella costruzione di un database è di analizzare le informazioni raccolte nella fase di analisi per costruire un modello di base. In particolare, si procederà a: (i) classificare gli oggetti come entità o attributi; (ii) identificare e definire le relazioni tra entità; (iii) nominare e definire entità e attributi. Lo scopo di una siffatta analisi è quindi la definizione del tipo di dato da trattare e di chiarire la corretta interpretazione dei fatti descritti. Solo quando sono state individuate e comprese le necessità del caso si può passare a definire i principali aspetti del modello E-R.

Appare opportuno, in questa fase, fornire una descrizione più ampia delle fasi fondamentali del progetto di una base di dati.

Obiettivo della fase di progettazione concettuale è la rappresentazione completa (formale) della realtà di interesse (informale) ai fini informativi, in maniera indipendente da qualsiasi specifico DBMS e quindi senza tenere conto degli aspetti implementativi. Tale rappresentazione, detta schema concettuale, è la rappresentazione più astratta, cioè più vicina alla logica umana, nella definizione di dati e relazioni. I modelli dei dati usati nella progettazione concettuale vengono definiti modelli semantici; attualmente il più diffuso e noto tra essi è il modello ER, che, come detto, introduce una rappresentazione grafica dello schema concettuale. Il modello ER prevede come prima attività della progettazione concettuale l'individuazione di oggetti concreti o astratti rilevanti per il sistema informativo, e la loro classificazione in insiemi omogenei detti *entity set*. Graficamente un *entity set*, o entità, viene rappresentato mediante un rettangolo. Le entità sono gli oggetti principali su cui vengono raccolte le informazioni e servono a rappresentare graficamente un concetto, concreto o astratto, che nei database relazionali si traduce in una tabella. Le proprietà caratteristiche di ciascuna entità vengono descritte mediante gli attributi. Ciascun attributo è caratterizzato da un nome e da un dominio, l'insieme dei valori che può assumere. Possiamo distinguere fra attributi elementari e attributi composti; questi ultimi sono costituiti da sotto-sequenze di valori. Il modello prevede la

rappresentazione di vincoli d'integrità i quali descrivono le regole che soddisfano gli oggetti della realtà. Le dipendenze logiche o associazioni di interesse informativo tra i dati da rappresentare vengono espresse nello schema ER mediante relazioni tra le corrispondenti entità.

La fase di progettazione logica del database ha lo scopo di tradurre lo schema concettuale espresso mediante un modello semantico in una rappresentazione mediante un modello logico dei dati che consiste in uno schema realizzato in funzione delle caratteristiche del sistema di gestione del database che si vuole utilizzare. Si tratta di uno schema logico in grado di descrivere, in maniera corretta ed efficace, tutte le informazioni contenute nello schema ER prodotto nella fase di progettazione concettuale. Non è una semplice traduzione da un modello ad un altro perché, prima di passare allo schema logico, lo schema ER va strutturato per soddisfare due esigenze: quello di “semplificare” la traduzione e quella di “ottimizzare” il progetto. La semplificazione dello schema si rende necessaria perché non tutti i costrutti del modello ER hanno una traduzione naturale nei modelli logici. Per esempio, mentre un'entità può essere facilmente rappresentata da una relazione nel modello relazionale (avente gli stessi attributi dell'entità), per le generalizzazioni esistono varie alternative. Inoltre, mentre la progettazione concettuale ha come obiettivo la rappresentazione accurata e naturale dei dati di interesse dal punto di vista del significato che hanno nell'applicazione, la progettazione logica costituisce la base per l'effettiva realizzazione dell'applicazione e deve tener conto, per quanto possibile, delle sue prestazioni: questa necessità può portare a una ristrutturazione dello schema concettuale che renda più efficiente l'esecuzione delle operazioni previste. Pertanto, è necessario prevedere sia un'attività di riorganizzazione, sia un'attività di traduzione (dal modello concettuale a quello logico). Poiché la riorganizzazione può essere in buona misura discussa indipendentemente dal modello logico, è utile di solito articolare la progettazione logica in due sub-fasi:

- *ristrutturazione dello schema ER*: è una fase indipendente dal modello logico scelto e si basa su criteri di ottimizzazione dello schema e di semplificazione della fase successiva;
- *traduzione verso il modello logico*: fa riferimento ad uno specifico modello logico (ad esempio, modello relazionale) e può includere un'ulteriore ottimizzazione che si basa sulle caratteristiche del modello logico stesso.

I dati di ingresso della prima fase sono lo schema concettuale prodotto nella fase precedente e il carico applicativo previsto, in termini di dimensione dei dati e caratteristiche delle operazioni. Il risultato che si ottiene è uno schema ER ristrutturato, che non è più uno schema concettuale nel senso stretto del termine, in quanto costituisce una rappresentazione dei dati che tiene conto degli aspetti realizzativi. Questo schema e il modello logico scelto costituiscono i dati di ingresso della seconda fase, che produce lo schema logico della nostra base di dati. In questa seconda fase è possibile

effettuare verifiche della qualità dello schema (la normalizzazione) ed eventuali ulteriori ottimizzazioni mediante tecniche basate sulle caratteristiche del modello logico. Un modello logico dei dati è la tecnica di organizzazione e accesso ai dati utilizzata da specifiche categorie di DBMS. A differenza dello schema concettuale, lo schema logico dipende quindi strettamente dal tipo di DBMS utilizzato, e in particolare dal suo modello logico dei dati (gerarchico, reticolare e relazionale). Un ulteriore compito della progettazione logica è di individuare all'interno dello schema logico del database, le parti che sono rilevanti per le singole applicazioni; queste parti vengono definite viste o anche schemi esterni o sottoschemi.

Nell'ambito del progetto di una base di dati, la fase finale è costituita dalla progettazione fisica, che, ricevendo in ingresso lo schema logico di una base di dati e le caratteristiche del sistema scelto, produce in uscita lo schema fisico del database, costituito dalle effettive definizioni delle relazioni e soprattutto delle strutture fisiche di memorizzazione utilizzate, con i relativi parametri. Nella progettazione fisica viene stabilito come le strutture definite a livello logico devono essere organizzate negli archivi e nelle strutture del file system. Essa dipende quindi non solo dal tipo di DBMS utilizzato, ma anche dal sistema operativo e in ultima istanza dalla piattaforma hardware del sistema che ospita il DBMS. È pertanto il livello di progettazione in cui si può far uso del minor livello di astrazione, dovendo rispettare i vincoli tecnici imposti dal sistema ospite. La fase di implementazione corrisponde alla realizzazione fisica del database che può comportare la modifica dello schema logico in funzione dell'organizzazione fisica dei dati e la realizzazione delle procedure per soddisfare le varie esigenze del progetto.

L'attività di progettazione fisica di una base di dati relazionale prevede, oltre alle scelte relative alle strutture fisiche, la definizione di molti parametri, che vanno dalle dimensioni iniziali dei file alle possibilità di espansione, dalla contiguità di allocazione alla quantità e alle dimensioni delle aree di transito per scambio di informazioni tra memoria principale e secondaria.

La maggior parte delle scelte da effettuare nel corso della progettazione fisica dipende in effetti dallo specifico sistema di gestione utilizzato, e quindi risulta difficile fornire una panoramica completa. Sono qui riportate solo le linee principali, che possono però essere considerate sufficienti in presenza di basi di dati di dimensioni non enormi o con carichi di lavoro non particolarmente complessi.

Si assuma che il DBMS a nostra disposizione preveda solo file non ordinati, con possibilità di definizione di indici. In questo contesto, ignorando gli altri parametri, la progettazione fisica può essere ricondotta ad una attività di individuazione degli indici da definire su ciascuna relazione. Definiti gli indici, si può sperimentare sul campo il comportamento dell'applicazione: se le

prestazioni risultano insoddisfacenti, si possono aggiungere altri indici, procedendo però con grande attenzione, in quanto l'aggiunta di un indice comporta un aggravio del carico per far fronte alle operazioni di modifica. Talvolta, inoltre, il comportamento del sistema è imprevedibile, e l'aggiunta di indici non altera la strategia di ottimizzazione delle interrogazioni, risultando del tutto inefficace. È buona norma, dopo l'aggiunta di un indice, verificare che le interrogazioni ne facciano effettivamente uso. Per questo motivo, l'attività di scelta degli indici nell'ambito del progetto fisico delle basi di dati relazionali è svolta spesso in modo empirico, con un approccio per tentativi; più in generale, l'attività di regolazione del progetto fisico consente spesso di migliorare le prestazioni della base di dati.

Il modello relazionale è evidentemente basato sul concetto di relazione. Secondo la definizione, la relazione è un qualunque sottoinsieme del prodotto cartesiano di una lista di domini (insiemi). Un dominio non è altro che un elenco di valori, mentre il prodotto cartesiano è l'elenco ottenuto da tutte le coppie che è possibile formare avendo due elenchi di valori. In particolare, la relazione può coincidere con la tabella di un qualunque database, così come la colonna o attributo coincide con il campo di una tabella. La base matematica del modello relazionale ha permesso che sia stato possibile formalizzare una vera e propria algebra relazionale che è alla base del linguaggio SQL e dei procedimenti di calcolo ed ottimizzazione del sistema di database relazionale. Una volta che si dispone del diagramma ER è quasi automatica la sua conversione nel modello relazionale:

- per ogni entità si crea una tabella con la sua chiave primaria;
- per ogni relazione binaria 1:n si crea la chiave esterna nella seconda tabella;
- per ogni relazione m:n si crea la tabella associazione.

È buona regola seguire anche alcune norme come le seguenti convenzioni di denominazione degli oggetti:

- far precedere il nome di una tabella dal prefisso `tbl`;
- far precedere il nome di una chiave dal prefisso `Id`;
- disporre le chiavi come primi campi di una tabella, la primaria prima delle eventuali esterne;
- a parte il prefisso chiamare una tabella con lo stesso nome dell'entità; lo stesso di-casi per la corrispondente chiave primaria;
- per una chiave esterna usare lo stesso nome della chiave primaria che rappresenta.

Se si seguono queste semplici regole si otterrà un modello relazionale più espressivo. In-fatti ogni tabella che rappresenta l'entità avrà lo stesso nome della sua chiave primaria (a parte il prefisso).

Ogni tabella mostrerà esplicitamente la relazione diretta ad un'altra per il nome di quest'ultima (a parte il prefisso) inserita tra i primi campi.

Per evitare sistemi di dati si possono applicare procedimenti di normalizzazione. Il primo e più semplice modo di evitare ridondanza è la scelta accurata del tipo dei campi. In questa occasione vale la pena di ricordare che, a differenza dei primi sistemi di database basati sui campi a lunghezza fissa, i moderni sistemi di database relazionale utilizzano solo lo spazio effettivamente usato per cui, ad esempio, un campo località posto ad una dimensione di 50 caratteri utilizza 50 byte di spazio nel caso peggiore e 0 byte nel migliore. Di conseguenza l'uso di vincoli troppo restrittivi per le dimensioni dei campi di testo ha un effetto modesto sul risparmio di spazio, ma possono portare conseguenze spiacevoli per l'utilizzatore. Non c'è invece nessuna ragione per usare un numero con la virgola se siamo sicuri di usare valori interi, come ad esempio quelli da 0 a 256.

Attraverso la normalizzazione si eliminano le incoerenze e la ridondanza dei dati. Questo processo codificato da Codd si compone di una serie di regole chiamate forme normali, ed è cumulativo, nel senso che ogni stadio successivo porta a una maggiore semplificazione delle relazioni. Questo processo di semplificazione non deve però compromettere la dipendenza funzionale tra i dati o la perdita di essi, in modo che nulla del complesso iniziale vada perduto alla fine del processo di normalizzazione. Le forme normali sono sette ma nella progettazione di un database relazionale non si scende oltre la terza per garantire la coerenza dei dati e delle relazioni, mentre al di sopra si avrebbero dati sparsi in diverse tabelle a discapito della gestione e velocità del database.

Nella prima forma normale si focalizza l'attenzione sulla quantità di informazioni raccolte in ogni colonna: infatti, ogni attributo deve contenere informazioni atomiche, cioè devono essere presenti solo elementi significativi elementari. In questa fase vengono eliminate le informazioni ripetute, e viene individuata la chiave primaria rendendo le altre colonne dipendenti da essa. Gli elementi ripetitivi vengono inseriti in altra tabella, successivamente si realizza un'altra tabella che funge da raccordo mettendo in relazione le due tabelle precedenti.

La seconda forma normale riguarda le tabelle in cui la chiave primaria è composta (più attributi) e stabilisce che i valori dei rimanenti campi non devono dipendere dai valori di un sotto insieme della chiave primaria. Quindi se la chiave primaria è composta da quattro campi, i rimanenti campi della tabella non devono dipendere solo da uno, due o tre campi della chiave primaria ma da tutti e quattro: infatti, non sono ammesse dipendenze parziali. I dati che dipendono solo parzialmente dalla chiave composta verranno inseriti in una seconda tabella, e la chiave primaria corrisponderà alla colonna dalla quale dipendono.

La terza forma normale si utilizza quando si hanno delle dipendenze funzionali transitive, ossia quando i valori assunti dalle celle di una colonna dipendono da quelli di un'altra colonna che a loro volta dipendono dalla chiave primaria. Questa situazione porta a una ripetizione di dati ed è quindi necessario ridistribuire le relazioni: si rimuove la colonna che dipende in maniera transitiva dalla chiave primaria e si crea una nuova tabella con la colonna dipendente e la colonna che funge da tramite di transizione.

2.6.1.3 Database Management Systems

I software che permettono di interagire con una base di dati mediante linguaggio SQL prendono il nome di Database Management Systems (DBMS). Il DBMS è un sistema software con scopi generali che facilitano il processo di definire, manipolare, e costruire una base di dati. Un DBMS è capace di gestire una grande quantità di dati, fornire l'accesso ai dati con un linguaggio di interrogazione, nonché una certa protezione dei dati, consentire accessi multipli al database. Prima dello sviluppo dei DBMS l'approccio che veniva applicato al problema dell'archiviazione prevedeva l'uso diretto delle strutture del file system (Figura 69a). Nella soluzione file system, le applicazioni accedono direttamente agli archivi, quindi ognuna deve conoscere la struttura interna degli archivi e le relazioni tra i dati e deve evitare la duplicazione degli stessi. Inoltre, la non volatilità dei dati e la gestione degli accessi contemporanei di più applicazioni agli archivi, viene relegata a strati software non specializzati per tali compiti, quali il sistema operativo.

La caratteristica saliente che differenzia un sistema per la gestione di database (DBMS) è la presenza di un componente specializzato a tale ruolo (Figura 69b). La Figura 69b mostra come le applicazioni rivolgono al DBMS le proprie richieste di accesso alla base di dati, il quale gestisce i dati svincolando le applicazioni da tale onere. Si ottiene così un triplice scopo: da una parte le funzionalità di gestione del database sono raggruppate in un unico insieme, dall'altra le applicazioni risultano alleggerite e quindi più veloci da realizzare e, soprattutto, nessuna potrà effettuare operazioni scorrette sul database.

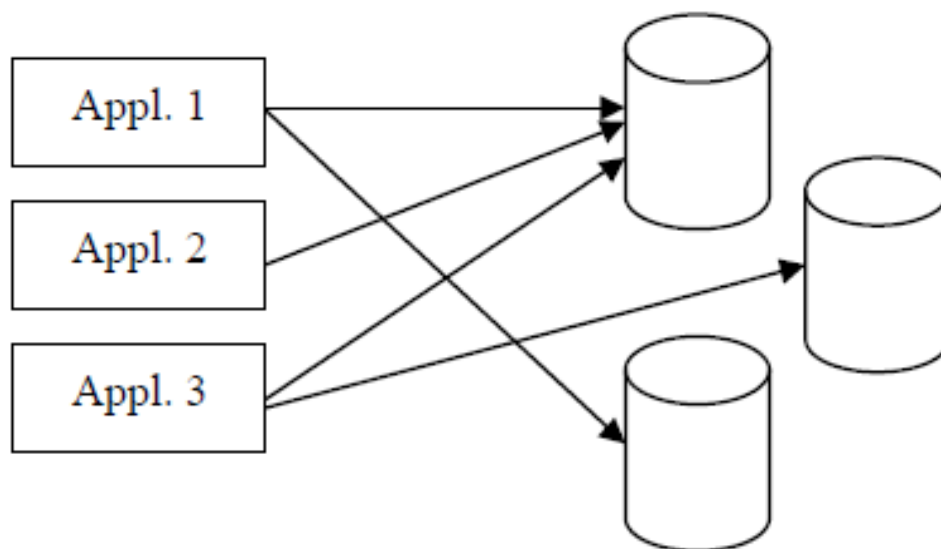
Un DBMS gestisce grandi quantità di dati, persistenti e condivisi e deve garantire:

- la consistenza dei dati;
- la sicurezza: il database non si deve danneggiare;
- la segretezza con la gestione degli accessi;
- l'integrità del dato (conservazione senza perdite).

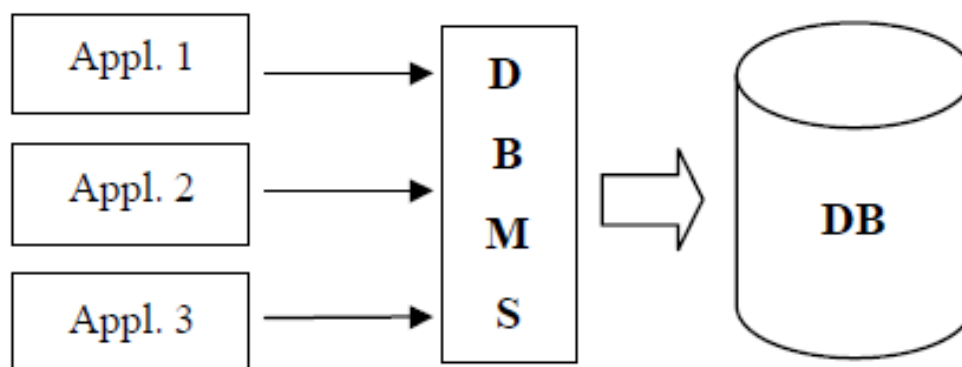
Inoltre, esso deve fornire tre livelli di protezione:

- autenticazione dell'utente mediante password;

- autorizzazione, con cui si assegnano i diritti all'utente per le risorse a cui può avere accesso;
- auditing, con l'adozione di mezzi idonei a garantire l'integrità delle informazioni.



(a)



(b)

Figura 69 – Approccio “file system” e approccio “DBMS”

2.6.2 La digitalizzazione per la gestione dei dati di monitoraggio in ambiente BIM

Le sfide connesse a un'approfondita conoscenza delle opere richiedono, oggi, un approccio marcatamente multidisciplinare e digitale. Tale tematica acquisisce grande rilevanza anche nel campo della digitalizzazione, integrazione e gestione dei dati nell'ottica della sicurezza e del monitoraggio delle infrastrutture esistenti. Diretta conseguenza di una corretta conoscenza ottenuta attraverso tali modalità operative e attraverso l'attuazione di diverse metodologie è l'elevata mole di dati, eterogenei e di diversi formati, che permette di raggiungere una visione complessiva e integrata del patrimonio infrastrutturale esistente, ma che al tempo stesso deve essere opportunamente organizzata e gestita. Per far fronte a tale sfida è stata definita una procedura basata su un approccio sistemico mettendo a punto un workflow capace di raccordare e gestire i multi-data che vanno dai risultati del rilievo geometrico e architettonico a quelli dell'analisi storica, dai dati dei sensori alla caratterizzazione materica dei materiali, e ancora dalla digitalizzazione delle informazioni alla rappresentazione tridimensionale dei manufatti e al collegamento topologico (Figura 70).

Per testare e validare la procedura progettata è stato individuato come *pilot* l'area interna dell'Appennino abruzzese che è caratterizzata dalla presenza di particolari condizioni geomorfologiche date dalla coesistenza di montagne e valli fluviali, tra le quali quella del fiume Aterno: uno dei principali bacini idrici della regione Abruzzo. Il primo step ha previsto la messa a punto di un sistema informativo su base GIS 2D per il censimento delle infrastrutture esistenti, database implementato per ogni opera e collegato a specifici cataloghi tematici, anche essi definiti nel corso del lavoro per rispondere alle diverse esigenze nell'ambito della gestione e dell'utilizzo di tali informazioni da parte delle Pubbliche Amministrazioni e dei professionisti coinvolti a vario titolo nel processo di gestione delle infrastrutture esistenti (Figura 71).

A partire dalla ricognizione sul campo e dall'implementazione del database GIS è stato possibile analizzare i dati e differenziare le strutture individuando una particolare tipologia di ponti sulla quale approfondire le ricerche nell'ambito della digitalizzazione, dell'integrazione e dalla gestione dei dati. La tipologia individuata è quella dei ponti ad arco in muratura, con particolare attenzione a quelli storici ancora in uso e integrati all'interno della rete viaria esistente. La scelta è ricaduta su questi ponti storici in muratura poiché necessitano di particolare attenzione in quanto continuano a rispondere a sollecitazioni diverse, legate soprattutto all'aumento di carico rispetto al periodo di progettazione e costruzione.

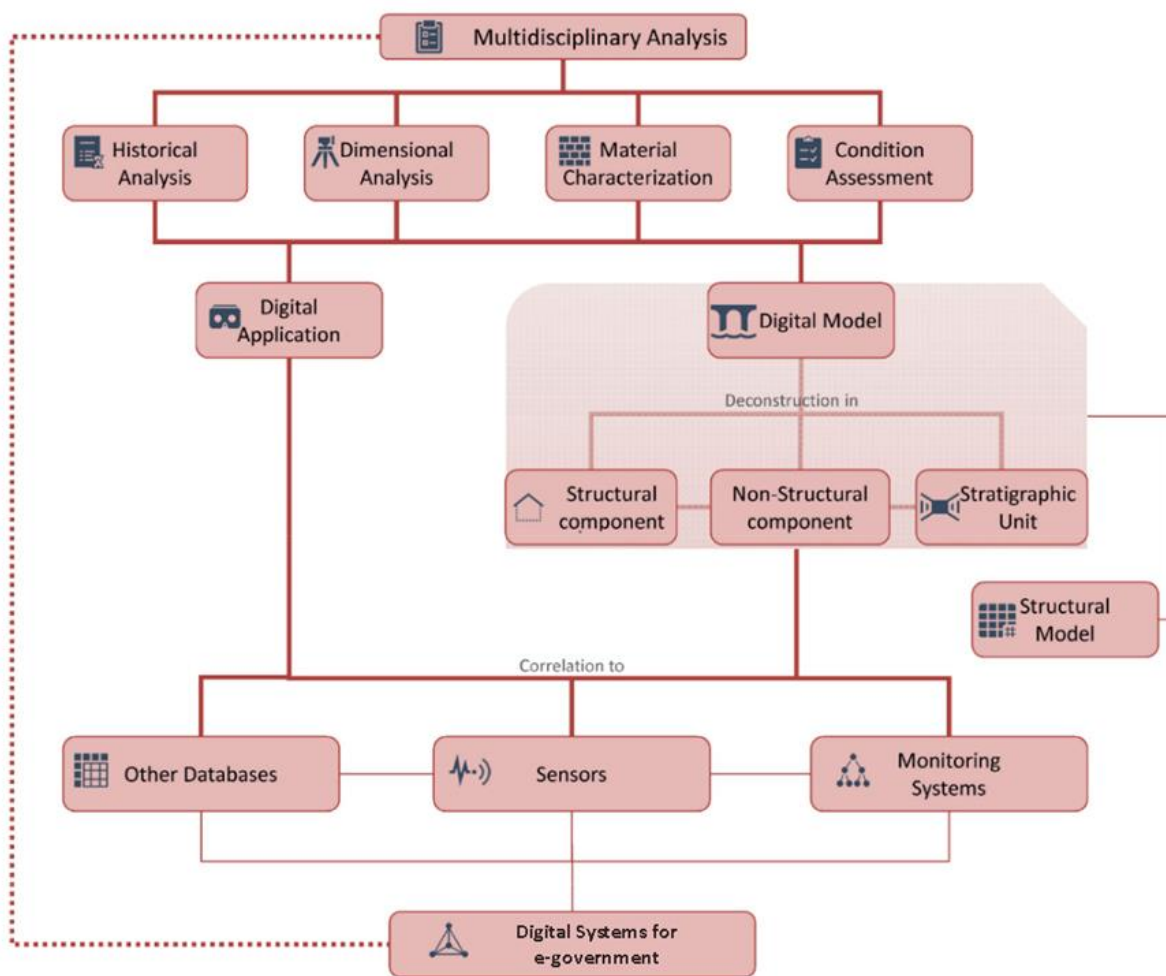


Figura 70 – Workflow per lo sviluppo di sistemi digitali per la gestione e analisi dei multi-data

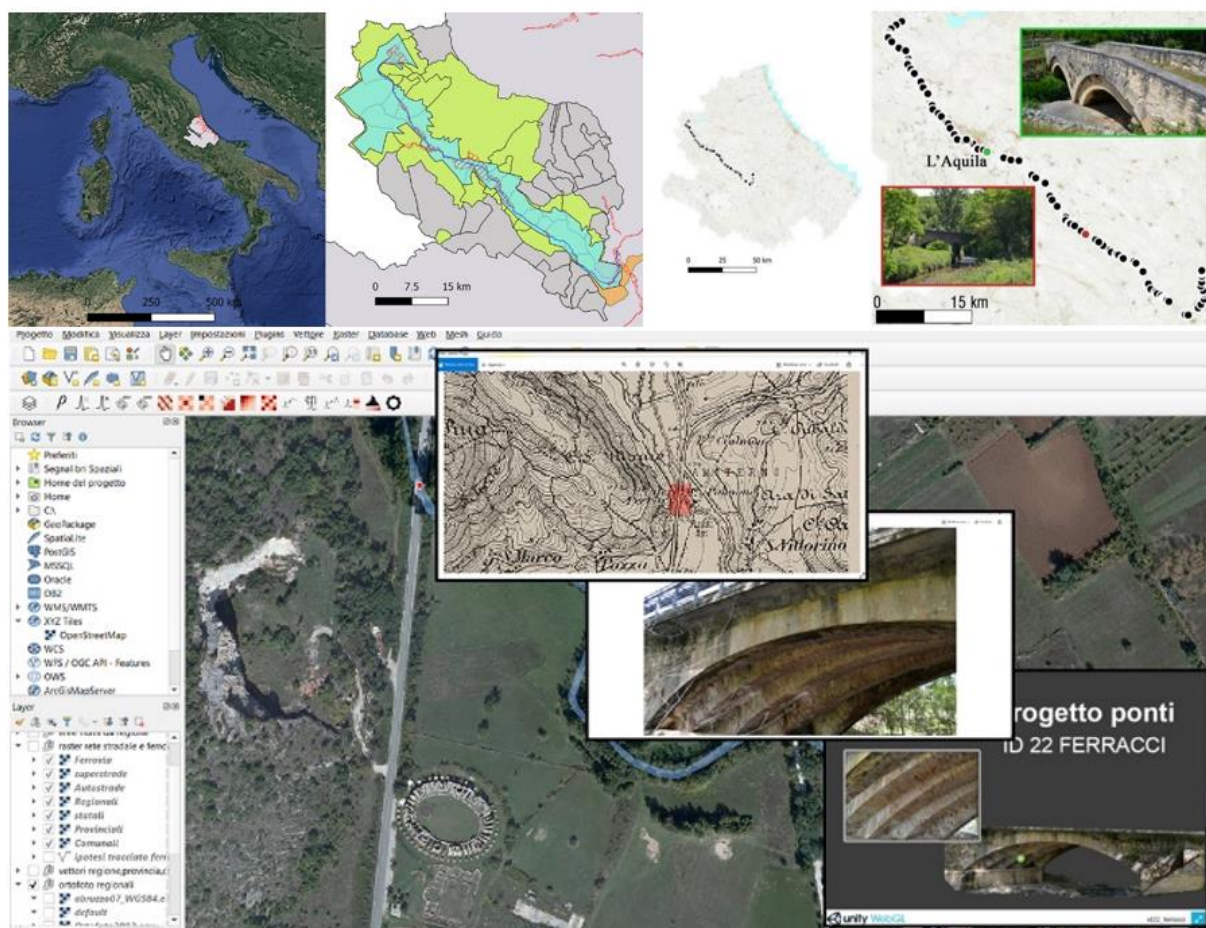


Figura 71 – Sistema informativo cartografico su base GIS

Gli interventi riscontrati su questi manufatti riguardano principalmente le modifiche avvenute nel corso del tempo, anche storiche, in base alle mutate necessità legate in particolare all'evoluzione dei trasporti con interventi finalizzati all'adeguamento puntuale, quale ad esempio l'ampiamiento della carreggiata o il rifacimento del piano stradale con materiali moderni e, in alcuni casi, con sistemi di rinforzo delle strutture. Pertanto, è necessario mettere in atto azioni volte alla manutenzione e sicurezza di queste strutture attraverso un monitoraggio costante dello stato di salute non solo con l'ausilio dei sensori ma anche con ispezioni visive reiterate nel tempo.

Queste infrastrutture di collegamento, soprattutto quando inserite all'interno del sistema stradale e ferroviario ancora in uso e quindi con ancora un ruolo strategico e funzionale, sono allo stesso tempo parte integrante del patrimonio costruito che presenta particolari esigenze in merito alla salvaguardia e conservazione, nell'ottica della tutela non solo materiale ma anche del valore culturale (Figura 72).



Figura 72 – Alcuni ponti storici ad arco in muratura che consentono l'attraversamento del fiume Aterno

A differenza delle infrastrutture moderne, per le quali sono disponibili informazioni progettuali, dati tecnici sui materiali e sulle tecnologie costruttive adottate, per i ponti storici, spesso costruiti a partire dalle regole dell'arte e su criteri empirici, bisogna incentivare procedure conoscitive integrate capaci di reperire informazioni sulla loro edificazione e/o sugli interventi manutentivi e sui ripristini che hanno subito nel tempo. Pertanto, la fase di conoscenza delle opere è stata integrata con analisi mutuata da altre discipline come l'applicazione del metodo stratigrafico delle murature utilizzato dalla disciplina dell'archeologia dell'architettura, che integra i dati provenienti dalle fonti documentali con quelli desumibili dalle tracce materiali visibili sul manufatto. Attuare un approccio di questo tipo ha richiesto uno sforzo aggiuntivo per uniformare i lessici degli attori coinvolti nel processo di conoscenza e per definire procedure condivise e strumenti, anche metodologici, in grado di assicurare la raccolta e gestione dei dati. Infatti, i dati scaturiti dall'approccio integrato sono stati sistematizzati e uniformati per garantirne corretta integrazione, attraverso processi di digitalizzazione grazie alla definizione di strumenti digitali per la documentazione e gestione capaci di supportare le fasi progettuali volte alla manutenzione o comunque a fornire una maggiore consapevolezza sulle azioni da intraprendere nell'ottica della sicurezza.

2.6.2.1 Definizione di strumenti catalografici per integrare e gestire i dati delle analisi tematiche

A partire dall'analisi degli strumenti normativi e catalografici disponibili per le infrastrutture e per le opere del patrimonio costruito, e in accordo con questi, sono stati definiti e poi implementati appositi cataloghi digitali, ricorrendo all'utilizzo di fogli Excel, database Access e moduli online, per la gestione dei multi-data. In particolare, è stata condotta un'analisi approfondita sulle "Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti" emanate dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti e approvate nel mese di dicembre 2020, che prevedono un approccio multilivello per prevenire i rischi e fornire un supporto nella gestione della sicurezza dei ponti esistenti [97]. Le principali fasi della procedura delle linee guida sono rappresentate dal censimento e dall'ispezione visiva delle strutture, grazie alle quali è possibile conoscere il numero di strutture presenti sul territorio e le loro caratteristiche principali, sia in relazione alla geometria e agli elementi strutturali che al loro stato di conservazione, e formulare quindi un giudizio oggettivo sulle effettive condizioni dell'opera.

La scheda di Livello 0, predisposta per il censimento dei ponti, rappresenta lo strumento conoscitivo basilare per espletare efficacemente le funzioni legate alla gestione di tali strutture e per le sue caratteristiche è assimilabile agli strumenti catalografici predisposti per la tutela e valorizzazione del patrimonio storico e culturale. Tuttavia, poiché l'obiettivo principale delle Linee Guida già menzionate è quello di definire una procedura valida per valutare la sicurezza dei ponti esistenti, gli

aspetti concernenti la tutela, e più in generale la conservazione, nelle schede del Ministero sono marginali. Considerando però che i manufatti oggetto della ricerca sono testimonianze architettoniche di importanza storico-documentale e paesaggistico-ambientale e in quanto tali devono essere tutelati e valorizzati come parte del nostro patrimonio, è necessario valutare e registrare tutte le criticità che si riscontrano nella fase di conoscenza tanto da prevedere il ricorso ad appositi sistemi schedografici in aggiunta alle schede previste dalle linee guida (Figura 73). Tali sistemi schedografici sono integrati in un database aperto capace di dialogare sia con il sistema informativo GIS grazie ad appositi campi iper-link che permettono l'accesso, oltre che ai cataloghi tematici, alle gallerie fotografiche e ai modelli digitali. Infatti, questo database integra i dati presenti nella scheda di censimento delle Linee Guida con i campi presenti nelle schede di catalogazione predisposte dall'Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione (ICCD) e dall'Istituto Superiore per la Conservazione e il Restauro (ISCR) che sono di supporto alla conoscenza e documentazione del patrimonio costruito, dei vincoli esistenti e dei rischi cui il patrimonio è esposto (Sistema Vincoli in Rete e Carta del Rischio). A tal proposito sono stati definiti appositi cataloghi tematici (Figura 74) tra i quali il catalogo digitale SURvey and CoNDition AssessmEnt catalogue (SUNDAE), sviluppato a partire dallo standard catalografico predisposto dall'Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione per l'inventario e la catalogazione delle fotografie, finalizzato a fornire un supporto nella valutazione delle condizioni dello stato di conservazione delle strutture storiche a partire dalle immagini accessibili online, ovvero di quelle rese disponibili dagli utenti su blog, social network e strumenti di web mapping ad accesso aperto (sistemi di crowdsensing).

Scheda ispezione visiva

Scheda descrittiva di ispezione

Livello 1

Tecnico rilevatore

La tua risposta

Data ispezione

GG MM AAAA

/ /

Tipologia di fondazione

☐ Murature
☐ Pile in alveo
☐ Non nota

Elementi critici Nota: Si definiscono elementi critici gli elementi particolarmente soggetti ai fenomeni di degrado e i cui eventuali malfunzionamenti possono incidere significativamente sul comportamento strutturale globale del pozzo, ovvero gli elementi o le condizioni per i quali la presenza di uno stato di d-

Scheda ispezione visiva

Scheda di difettosità

gonfi ad arco in muratura

Tecnico rilevatore

La tua risposta

Data ispezione

GG MM AAAA

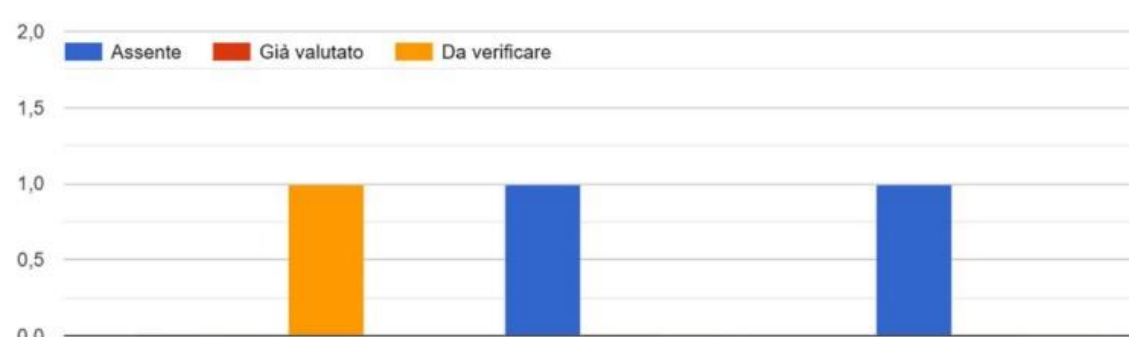
/ /

Spalla destra

	Estensione K1 (0,2)	Estensione K1 moderata (0,5)	Estensione K1 elevata (1)	Intensità K2 lieve (0,2)	Intensità K2 moderata (0,5)	Intensità K2 elevata (1)	Fotogr.
Fessure orizzontali	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fessure verticali	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fessure diagonali	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Macchie di

Informazioni geomorfologiche generali



Fenomeno	Stato
Fenomeni erosivi e di alluvionamento	Da verificare
Fenomeni franosi	Assente
Rischio sismico	Assente

Figura 73 – Rielaborazione delle schede ministeriali (Livello 0) in moduli online e relativo grafico generato automaticamente per l'analisi dei dati

USM	TIPO	DESCRIZIONI	TIPOLOGIA	FASE	DATAZIONE	STATO DI CO	RELAZIONI
1	positiva	muratura regol	Tipo II	2	Ante X secolo	discreto	copre 42; coper
2	positiva	muratura costit	Tipo III	3	X-XI secolo	discreto	copre 42 e 1; cc
3	positiva	muratura costu	Tipo IV	4	XII-XIII secolo	discreto	coperto da 22 e
4	positiva	muratura costu	Tipo IV	4	XII-XIII secolo	discreto	coperto da 25; i
5	positiva	muratura costu	Tipo III	3	X-XI secolo	discreto	coperto da 10; i
6	positiva	muratura costit	Tipo III	3	X-XI secolo	buono	copre 42 e 1; cc
7	positiva	muratura costit	Tipo III	3	X-XI secolo	discreto	copre 7; coper
8	positiva	muratura costit	Tipo III	3	X-XI secolo	buono	copre 8; coper
9	positiva	muratura costit	Tipo III	3	X-XI secolo	discreto	copre 2; coper
10	positiva	muratura costit	Tipo III	3	X-XI secolo	discreto	copre 10; coper
11	positiva	muratura costu	Tipo IV	4	XII-XIII secolo	buono	copre 11 e 12; c
12	positiva	cantonale d'ang	Tipo V	5	XVI-XVIII secolo	cattivo	coperto da 21; c
13	positiva	cantonale d'ang	Tipo IV	4	XII-XIII secolo	discreto	Coperto da 32; i
14	positiva	risarcimento di	Tipo VII	7	XX secolo	buono	riepie -35; si ap
15	positiva	risarcimento di	Tipo VII	7	XX secolo	buono	riepie -35; si ap
16	positiva	cantonale d'ang	Tipo VI	6	XX secolo	discreto	copre 17; coper
17	positiva	muratura costit	Tipo VI	6	XX secolo	buono	copre 18, 3 e 6;
18	positiva	muratura costit	Tipo VI	6	XX secolo	discreto	copre 6 e 22; cc
19	positiva	risarcimento de	Tipo VII	7	XX secolo	discreto	copre 25, 21, 22
20	positiva	risarcimento mi	Tipo VII	7	XX secolo	discreto	riepie -43; si c
21	positiva	muratura costit	Tipo V	5	XVI-XVIII secolo	buono	coperto da 22; i

Figura 74 – Alcune schermate dei sistemi schedografici messi a punto

Un altro catalogo definito ancora in accordo con le direttive dell'ICCD, è quello archeologico, che permette di registrare le tracce materiali (Unità Stratigrafiche) risultato delle azioni distruttive e costruttive che hanno contribuito alla definizione della forma e dello stato attuale delle opere analizzate, associandole a una cronologia relativa, e poi assoluta, che permette di ricostruire una scansione temporale relativa alle vicende che hanno interessato l'opera analizzata.

Per garantire una maggiore interoperabilità e cooperazione tra i diversi strumenti, tale sistema permette di gestire e raccogliere anche i risultati delle ispezioni visive e del monitoraggio strutturale acquisiti con sensori. Altro punto di forza delle schede catalografiche sopradette organizzate nel database aperto è quello di dialogare, oltre che con il sistema informativo su base cartografica (nativo GIS ma compatibile con modalità *user-friendly* come quello MAPS), con le rappresentazioni tridimensionali dei manufatti. Proprio a queste repliche digitali è stato affidato il ruolo di raccordo, con la raccolta e condivisione delle informazioni, sfruttando le potenzialità gestionali e la versatilità dei modelli parametrici. A partire dall'acquisizione del dato dimensionale, attraverso l'integrazione

digitale dei risultati del rilievo strumentale con i dati scaturiti dalle analisi archeologica, architettonica e strutturale è possibile avere un quadro esaustivo dello stato di fatto dell'opera, implementando appositi modelli digitali.

2.6.2.2 Modelli parametrici HBrIM (Heritage/Historical Building bridge Information Modelling)

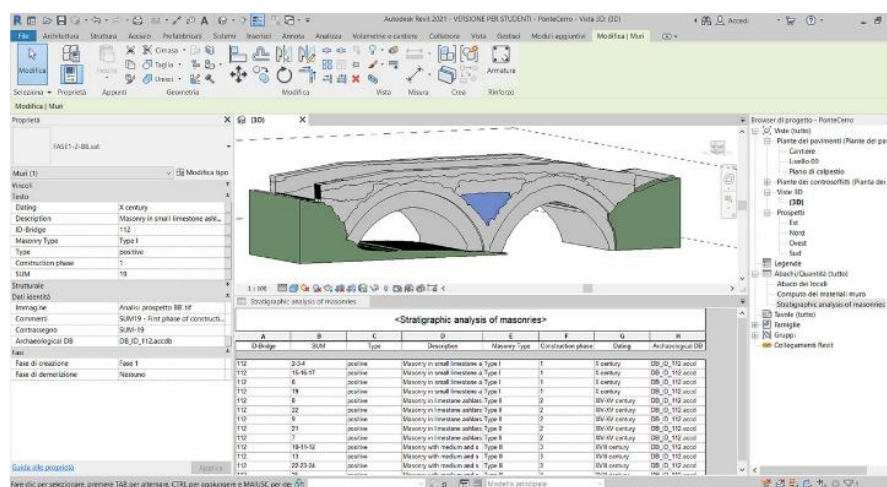
Per creare repliche digitali dei manufatti reali è stato individuato come favorito l'ambiente BIM (Building Information Modelling) che permette, oltre a rappresentare tridimensionalmente le geometrie e le forme metricamente corrette dei manufatti, di gestire molteplici dati in ambiente digitale. I modelli tridimensionali delle infrastrutture sviluppati in ambiente parametrico facilitano e favoriscono la digitalizzazione delle informazioni e l'integrazione con altri sistemi di gestione dati. Prima di approntare la modellazione è necessario acquisire le peculiarità geometriche-formali che diventano la base per sviluppare i successivi step del workflow operativo e si integrano, completandole, con le altre modalità di acquisizione sopradette. A tal proposito le tecniche di rilievo strumentale integrato (attraverso l'ausilio di sistemi image-based e range-based attivi e passivi correlati tra loro con il supporto dei sistemi di riferimento GNSS) risultano essere funzionali in termini di precisione e accuratezza del dato e ottimali per la creazione di repliche digitali.

Prima di approntare la modellazione parametrica di alcuni manufatti tra quelli censiti è stata espletata una accurata fase di progettazione degli elementi costruttivi relativi ai ponti ad arco in muratura, sulla base delle caratteristiche semantiche delle infrastrutture andando a individuare i più comuni componenti strutturali e non che si riscontrano nelle infrastrutture storiche. Tutti gli elementi costituenti sono stati definiti dal punto di vista geometrico, costruttivo e storico andando a caratterizzare i parametri di ogni specifica famiglia.

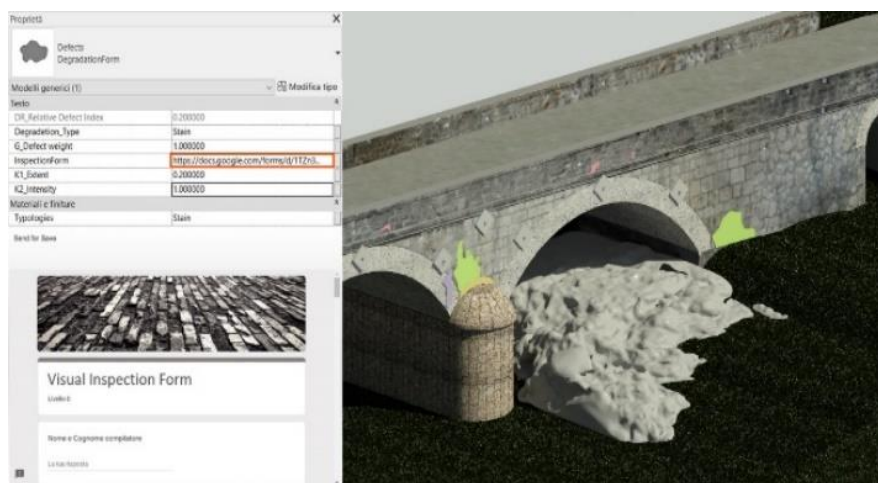
Si è inoltre deciso di modellare i manufatti approfondendo la rappresentazione digitale delle Unità Stratigrafiche individuate, che rispondono a interventi materiali avvenuti nel corso del tempo in funzione delle diverse fasi di costruzione e danneggiamento del manufatto nonché dei materiali e delle tecniche costruttive adottate, e delle forme di degrado che affliggono le murature e le infrastrutture in generale (Figura 75).

Inoltre, attraverso la creazione di specifici parametri si è verificato che è possibile correlare il modello tridimensionale a database relazionali rappresentativi delle informazioni archeologiche e architettoniche. Per la realizzazione dei modelli digitali sono state utilizzate due differenti procedure entrambe valide a partire dalle osservazioni sopradette: la prima ha previsto l'ottimizzazione di modelli precedentemente realizzati di tipo NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) per la loro importazione nell'ambiente parametrico; la seconda la realizzazione dei modelli, a partire dalla

nuvola di punti, direttamente nel software parametrico. Nel primo caso, le polisuperfici che caratterizzano i modelli NURBS possono essere adattate e importate singolarmente attraverso il formato ACIS SAT, all'interno delle specifiche famiglie (Muri, Solai, Topografia) del software di modellazione parametrica, all'interno del quale sono stati definiti i parametri specifici degli elementi costituenti il ponte, nonché alcuni parametri di tipo che consentono di correlare il modello ai database relazionali e ai cataloghi messi a punto (Figura 76). Attraverso questa procedura sono stati importati anche i dati relativi agli interventi storici che hanno interessato l'infrastruttura nel corso del tempo, rappresentando anche una fase di crollo storico attraverso la modellazione solida e un video ricostruttivo.



(a)



(b)

Figura 75 – Esempio di scomposizione archeologica delle murature con collegati i dati (a); esempio di modellazione delle forme di degrado con il collegamento alle informazioni (b)

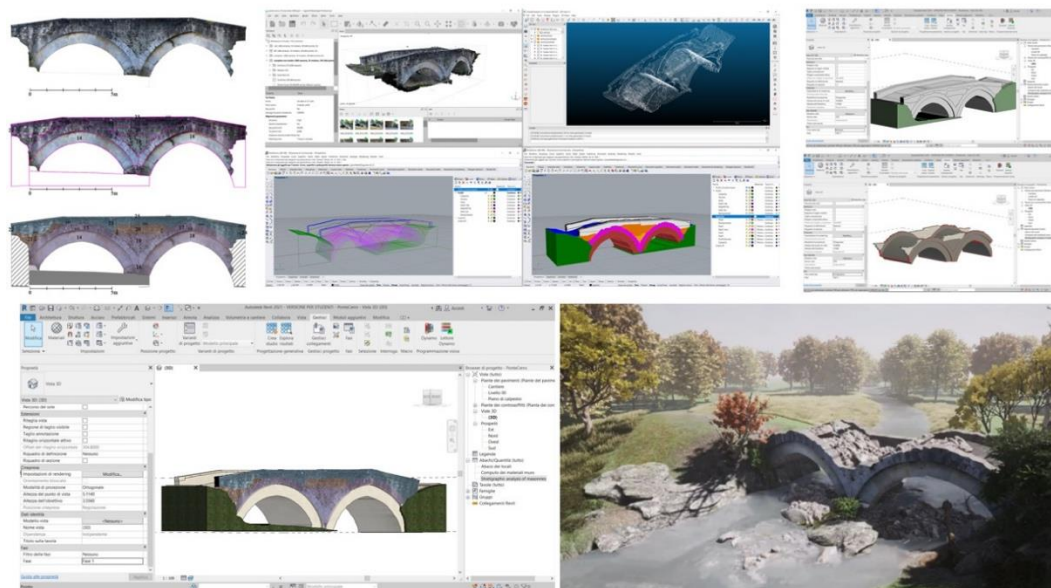


Figura 76 – Modellazione NURBUS di un'infrastruttura storica, import nell'ambiente parametrico e gestione dei dati inerenti gli interventi desunti dall'analisi archeologica delle murature, con un frame del video ricostruttivo di un crollo storico

Il secondo dei metodi testati ha visto la realizzazione delle repliche digitali direttamente nell'ambiente parametrico attraverso la procedura Scan-to-BIM, ovvero a partire dalla nuvola di punti acquisita mediante il rilievo strumentale integrato. Anche in questo caso è stata effettuata una scomposizione semantica degli elementi costituenti i ponti ad arco in muratura sulla base delle caratteristiche costruttive, strutturali, geometriche e tipologiche. Tale scomposizione ha portato alla creazione di librerie di elementi parametrici (Figura 77), facilmente adattabili alle diverse strutture esistenti, capaci di facilitare la gestione dei dati e la correlazione con differenti sistemi informativi, supportando le operazioni di gestione e di monitoraggio finalizzate al miglioramento della sicurezza e salvaguardia dei manufatti.

Inoltre, per quanto concerne la rappresentazione parametrica delle forme di degrado si è optato per la modellazione di elementi che fossero rappresentativi dei difetti per i quali sono stati definiti i parametri di difettosità (coefficiente di estensione e intensità, peso attribuito ai singoli difetti) coerentemente con le Linee Guida per la sicurezza dei ponti esistenti (Figura 78). Infine, per gestire in modo coerente e unitario tutte le informazioni connesse alle ispezioni visive sono stati definiti due differenti parametri che consentono di correlare il modello alla scheda di censimento e a quella di ispezione dei ponti, archiviate in un cloud, finalizzato a renderle accessibili a tutti i professionisti coinvolti nei processi di analisi e valutazione per la conservazione delle infrastrutture storiche.

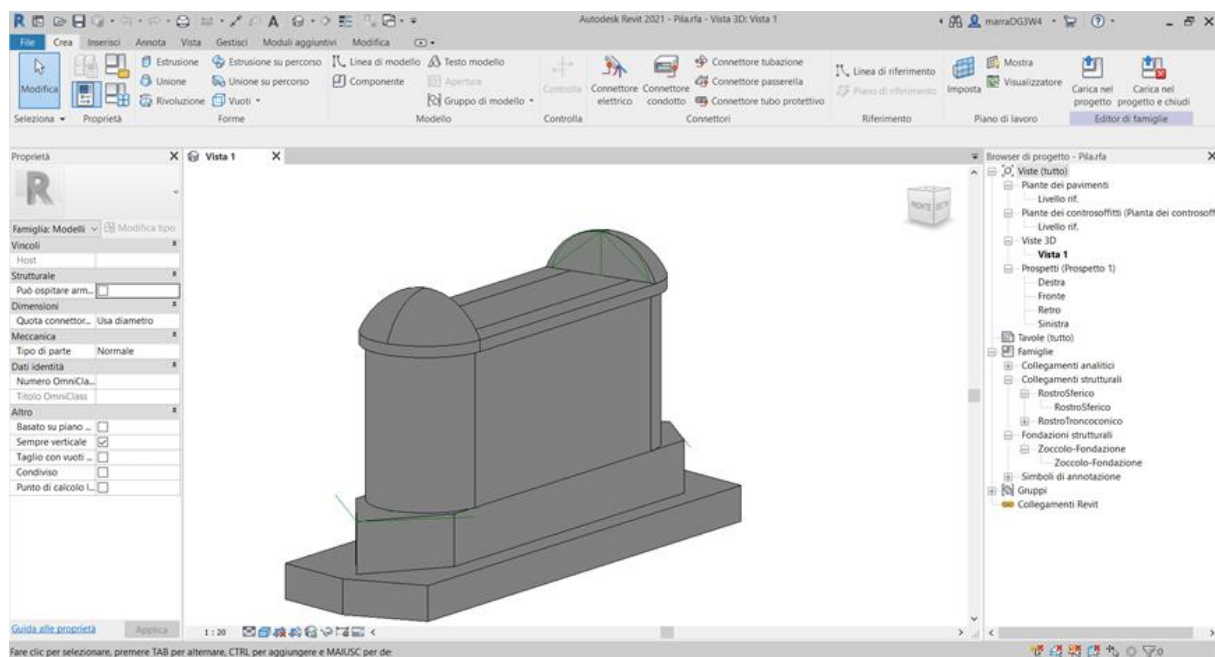


Figura 77 – Esempio di modellazione del sistema costruttivo rostro-pila e fondazione

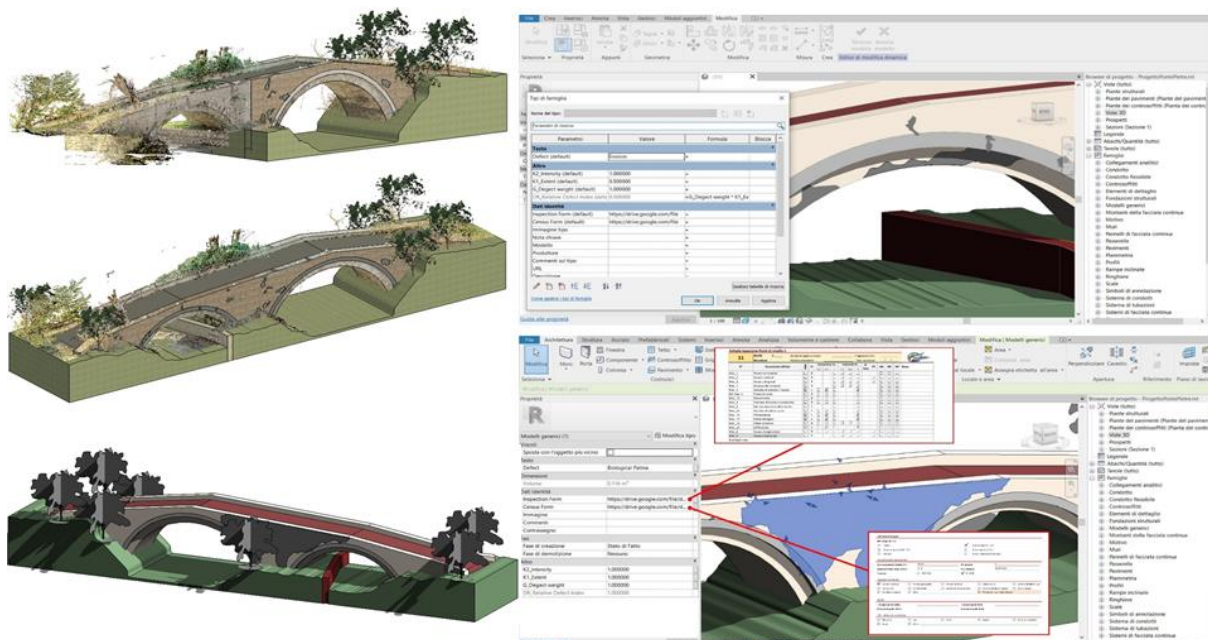


Figura 78 – HBrIM di un'infrastruttura storica con le forme di degrado e le schede per il calcolo dell'indice di difettosità

Le sperimentazioni citate hanno permesso di creare modelli parametrici di infrastrutture storiche a partire dai risultati derivanti dall'analisi archeologica delle murature e rappresentativi dello stato di conservazione delle strutture per migliorarne la comprensione, al fine di supportare i processi di valutazione delle prestazioni strutturali e di gestione delle infrastrutture.

A tal proposito, per garantire la sicurezza del patrimonio infrastrutturale il modello digitale può essere collegato a un sistema di monitoraggio attraverso lo sviluppo di un sensore virtuale. Nello specifico, per correlare le informazioni provenienti dalle campagne di monitoraggio ai modelli tridimensionali rappresentativi delle infrastrutture storiche è stata modellata, in ambiente parametrico, una famiglia che fosse in grado di rappresentare gli accelerometri comunemente utilizzati nell'ambito del monitoraggio dinamico, nello specifico un accelerometro force balance (Figura 79). In fase di modellazione sono stati creati gruppi di parametri condivisi, alcuni rappresentativi delle specifiche e caratteristiche geometriche del sensore, altri invece che consentono di mettere in relazione il modello digitale con i dati acquisiti in campo dai singoli sensori e di conseguenza al sistema di monitoraggio, sintetizzando i risultati finali delle prove condotte, che si rendono disponibili in ambiente di modellazione mediante un collegamento a un cloud esterno.

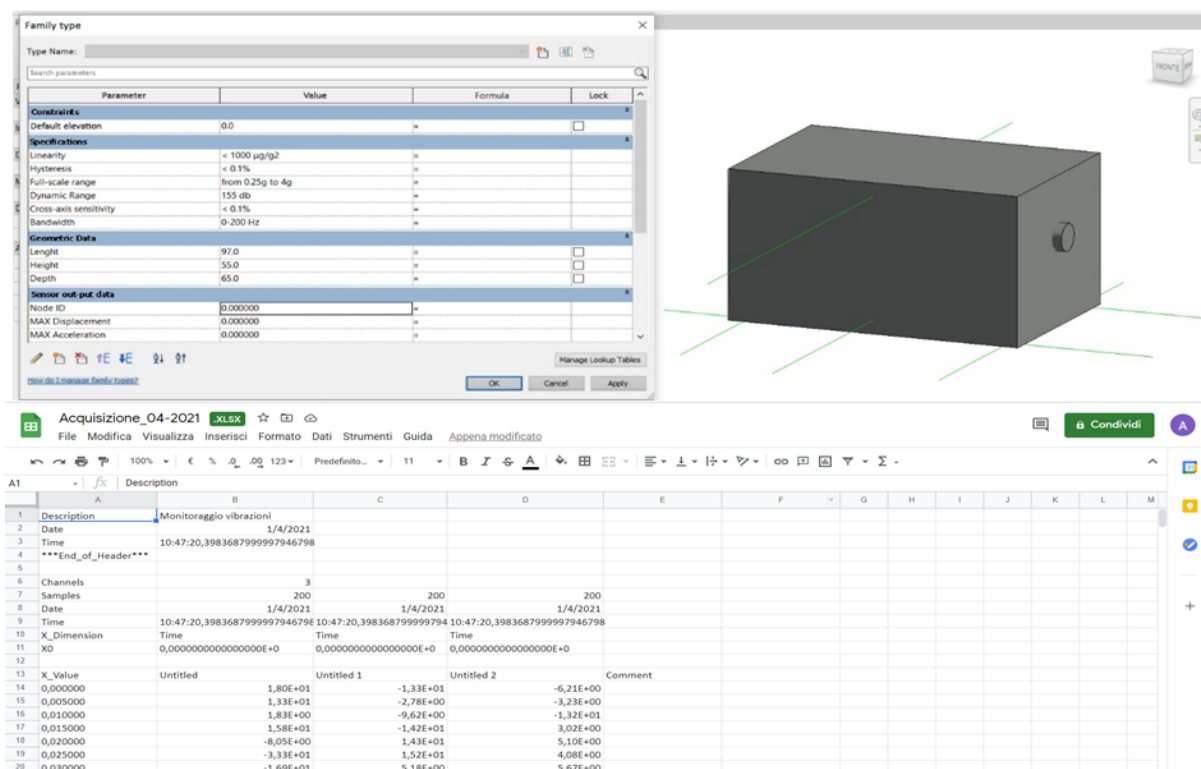


Figura 79 – Modellazione di un sensore virtuale e correlazione con i dati del monitoraggio per l'analisi e la gestione dei dati rilevati

I modelli parametrici così strutturati si prestano a essere strumenti utili e vantaggiosi per supportare le ispezioni periodiche ordinarie e per valutare lo stato di fatto delle infrastrutture storiche. A tal proposito infine sono state messe a punto procedure finalizzate a integrare questi modelli parametrici in sistemi digitali complessi ma allo stesso tempo facilmente accessibili.

2.6.2.3 Sistema informativo integrato: un Virtual Tour per la gestione e fruizione dei dati

La procedura implementata ha consentito di definire un Sistema Informativo Integrato, in ambiente virtuale, che facilita l'interoperabilità tra i diversi attori coinvolti nei processi di conoscenza, conservazione e gestione, nonché l'accesso e lo scambio dei multi-data superando i limiti imposti dai diversi formati. Il Sistema Informativo Virtuale proposto e sviluppato sulla base della tecnologia VR, nello specifico Virtual Tour, supporta e facilita l'ispezione in remoto delle infrastrutture e l'accesso ai dati già prodotti (Figura 80).

Infatti, in ambiente digitale, attraverso il collegamento di panorami sferici a 360° e a opportuni hotspot posizionati nella scena digitale è possibile consultare contenuti aggiuntivi, come foto di particolari ad alta risoluzione, informazioni storiche, rilievi, i cataloghi già definiti, se implementati per la struttura in esame o implementabili se si tratta della prima ispezione, così come compilare la scheda di ispezione rielaborata sulla base di quella proposta dalle Linee Guida (Figura 81). Inoltre, questo strumento permette la gestione dei dati derivati da studi multidisciplinari e analisi diagnostiche e la fruizione di questi in diversi formati, come i modelli tridimensionali, a partire dalla nuvola di punti fino ai modelli digitali fotogrammetrici e HBIM fruibili grazie al collegamento con piattaforme esterne (Figura 82). Attraverso il collegamento all'HBrIM dell'infrastruttura è possibile accedere alle informazioni già note per una corretta lettura e analisi del manufatto, ma anche incrementarle con l'aggiunta di annotazioni collegate topologicamente alle singole parti del modello digitale.

L'ambiente virtuale così progettato si presenta come un hub capace di immagazzinare i dati eterogenei scaturiti dalle analisi multidisciplinari e come uno strumento di diagnostica non distruttiva che favorisce le ispezioni dei ponti in remoto, rendendole più veloci, economiche e ripetibili. Questi sistemi informativi virtuali sono in grado di supportare non solo i processi di documentazione e di condivisione delle informazioni ma anche quelli di diagnostica, monitoraggio e gestione del patrimonio costruito storico. Grazie a questo strumento, infatti, i decisori e i project manager possono procedere a ispezioni visive periodiche e in remoto delle infrastrutture e gestire efficacemente i dati

raccolti, e aggiornabili nel tempo, per definire le azioni da intraprendere in maniera predittiva. Infatti, i dati raccolti all'interno del VT possono essere organizzati in tempi brevi e in funzione dei risultati delle analisi espletate da tecnici specialisti, fornendo un supporto agli stakeholder e ai decisor maker grazie agli scenari che riproducono lo stato di fatto dei manufatti e possibili soluzioni che posso essere presentate all'interno del VT. Inoltre, l'efficacia del sistema proposto risiede non solo nella sua capacità in qualità di strumento di diagnostica non distruttiva ma anche nella trasferibilità ad altre tipologie di manufatti poiché scalabile e facilmente replicabile.

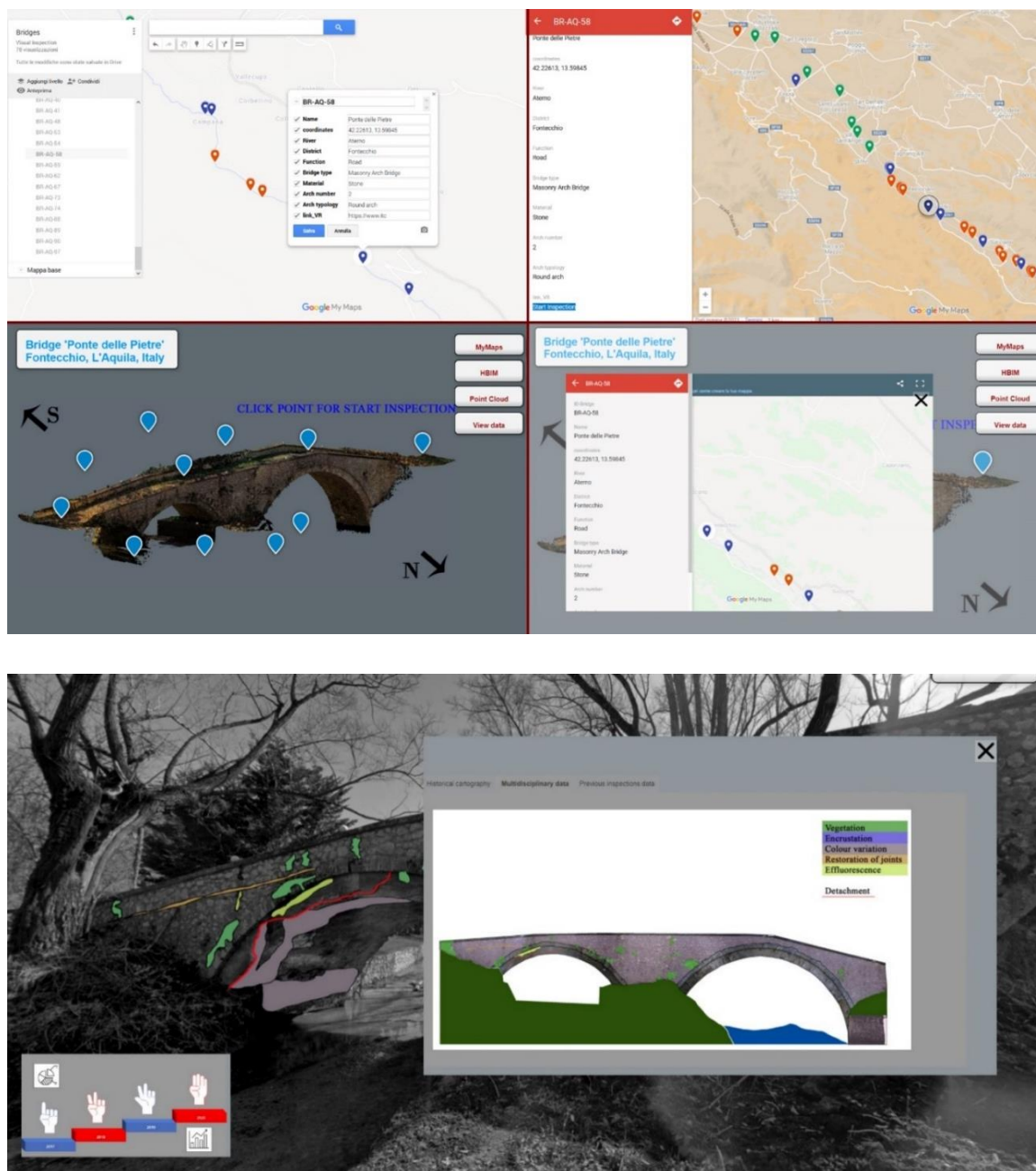


Figura 80 – Il Virtual Tour per la gestione dei dati delle infrastrutture storiche. Visualizzazione dei dati georeferenziati e visualizzazione delle forme di degrado

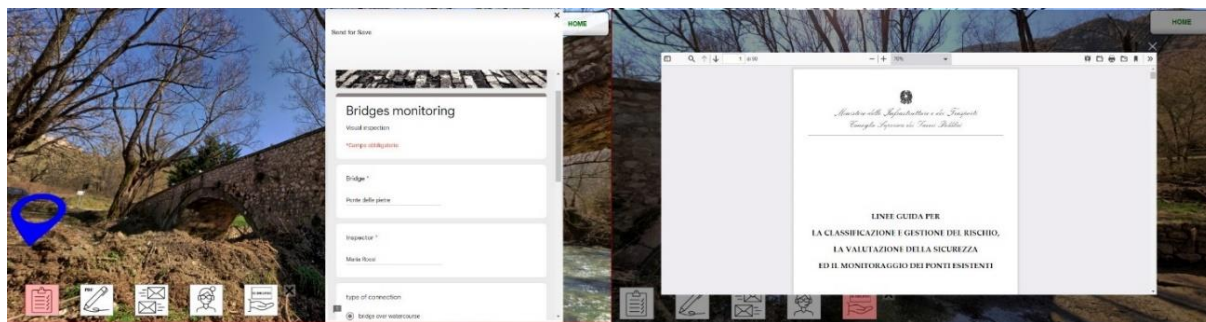


Figura 81 – Ispezione virtuale in remoto con la compilazione delle schede di livello 0 previste dalle Linee Guida ministeriali

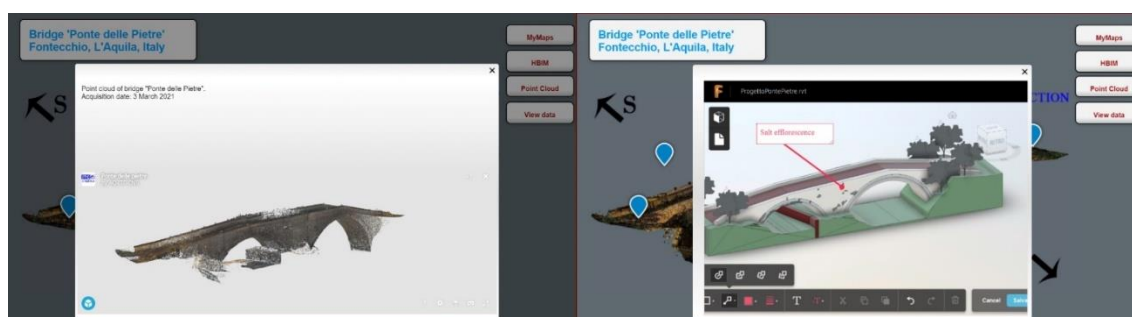


Figura 82 – Collegamento all'interno del sistema virtuale del modello fotogrammetrico e del modello HBrIM di una infrastruttura storica

L'approfondita conoscenza dei manufatti è volta a facilitare la gestione del patrimonio infrastrutturale da parte degli enti territoriali per attuare misure di manutenzione ordinaria e straordinaria. In quest'ottica la documentazione e registrazione delle molteplici informazioni a partire dall'ispezione dei manufatti è un atto indispensabile, e altrettanto importante è l'uniformazione dei linguaggi e facilitare l'accesso ai dati. A tal proposito, il processo d'indagine condotto ha portato a definire una procedura operativa, scalabile e replicabile, per la conoscenza delle infrastrutture, applicando le metodiche di diverse discipline e finalizzando le attività volte alla registrazione e gestione dei dati.

Per facilitare le operazioni di analisi e raccordare le diverse expertise coinvolte nel processo di conoscenza multidisciplinare è importante definire procedure operative e strumenti che siano in grado innanzitutto di gestire il vasto patrimonio infrastrutturale storico presente sul nostro territorio. Il sistema virtuale messo a punto, attraverso l'integrazione di strumenti digitali e utilizzando le potenzialità dei repository online, facilita le operazioni di ispezione visiva per la valutazione dello

stato di fatto delle opere e garantisce la gestione dei dati rendendoli accessibili ai professionisti e agli stakeholder chiamati a progettare interventi per la manutenzione e conservazione.

2.7 Elaborazione dei dati e diagnosi strutturale

Il processo di analisi dei dati di monitoraggio è quella fase in cui i dati collezionati vengono studiati nel dettaglio, e vengono quindi distinti, elaborati e sintetizzati, al fine di determinare le informazioni più utili all'identificazione di problemi chiave e trend nel comportamento strutturale, fino a giungere a puntuali conclusioni mediante l'utilizzo di metodi di analisi statistica [2]. Più nel dettaglio, nel campo del monitoraggio strutturale, l'analisi e l'elaborazione dei dati raccolti può consentire di:

- studiare i modelli statistici di carichi, effetti ambientali, risposta strutturale;
- identificare la correlazione tra differenti variabili e i modelli ad esse relativi;
- determinare le proprietà fisiche della struttura.

L'elaborazione dei dati può essere distinta, generalmente, in qualitativa o quantitativa, ed è costituita da tre step: analisi conoscitiva dei dati, selezione del modello e analisi di inferenza. Rispetto alla sorgente dei dati, l'analisi può essere classificata come segue:

- analisi dei dati di monitoraggio di carichi e condizioni ambientali;
- analisi dei dati di monitoraggio della risposta globale della struttura;
- analisi dei dati di monitoraggio della risposta locale;
- analisi dei dati di monitoraggio della prestazione strutturale e della sua evoluzione.

Considerando, invece, il tipo di metodo di analisi, è possibile riconoscere i seguenti casi:

- identificazione di dati normali o anomali;
- individuazione e ripristino di dati mancanti o errati;
- analisi semplificata dei dati (data smoothing, data filtering, data baseline, ecc.);
- analisi dei dati nel dominio del tempo (analisi di serie temporali, filtro di Kalman, ecc.);
- analisi dei dati nel dominio delle frequenze (fast FFT transform, analisi spettrale, ecc.);
- analisi dei dati nel dominio tempo-frequenza (trasformata wavelet, short-term Fourier transform, trasformata di Hilbert-Huang, etc.)
- statistical pattern analysis;
- analisi big-data (data mining, data fusion, data compression, data reduction, ecc.)
- analisi dei dati basata su algoritmi di intelligenza artificiale (machine learning, deep learning, reinforcement learning, ecc.).

A valle dell'elaborazione e dell'analisi dei dati di monitoraggio, è importante e necessario procedere con l'identificazione e la valutazione delle condizioni della struttura a livello locale e/o globale mediante i vari possibili parametri strutturali. Questi ultimi possono essere distinti in statici (tra cui: distribuzioni di deformazione/tensione, rigidezza, carichi, forze interne, condizioni di vincolo, ecc.) e dinamici (quali, ad esempio, frequenze modali, fattore di smorzamento, coordinate e forme modali, ecc.). La valutazione delle condizioni strutturali sarà poi la base per la diagnosi, e la successiva prognosi, di eventuali prestazioni degradate della struttura. Spesso, gran parte dei parametri strutturali può essere misurata direttamente. Tuttavia, non di rado, ci si trova di fronte alla necessità di doverli derivare.

Con riferimento a metodi di identificazione dei parametri modali, rispetto al tipo di elaborazione dati, essi possono essere suddivisi in: (i) metodi di identificazione nel dominio delle frequenze; (ii) metodo di identificazione nel dominio del tempo; (iii) metodo di identificazione nel dominio tempo-frequenza. Il metodo nel dominio delle frequenze prevede la conversione dei dati di monitoraggio ottenuti nel dominio del tempo al dominio delle frequenze e, quindi, l'identificazione dei parametri modali della struttura. Tra le procedure più frequentemente adoperate si possono ricordare: Peak Picking, Decomposizione nel dominio delle frequenze (FDD), Enhanced FDD, Least-squares Complex FD. Il metodo nel dominio del tempo consente di identificare direttamente variazioni dei parametri modali o comunque basati sulla risposta strutturale nel dominio del tempo. Tra le metodologie maggiormente diffuse è possibile ricordare: Natural Excitation Technique, Random Decrement Function, Eigensystem Realization Algorithm, Ibrahim Time Domain method, Time series model. Quando i segnali nel tempo o nelle frequenze non sono stazionari, si procede con analisi nel dominio tempo-frequenza e si adoperano sovente tecniche come: short-term Fourier transform, trasformata di Hilbert-Huang, trasformata wavelet.

Per quanto riguarda i parametri strutturali di tipo statico, i parametri più rilevanti per valutare le prestazioni della struttura sono legati alla deformazione (inflexione, drift di piano, rotazione, tilt, ecc.), ai carichi statici (perdita di pretensione negli elementi pretesi, azioni termiche, ec.), ai carichi dinamici (pesi di veicoli in transito o “weigh-in-motion”, carichi da vento, azioni sismiche, ecc.).

2.7.1 Tecniche di elaborazione per il calcolo del drift di piano

Con riferimento alle strutture civili sottoposte ad azioni sismiche, uno dei parametri più rilevanti per valutare le prestazioni della struttura è la misura o il calcolo del drift di piano, a partire dagli spostamenti relativi tra due piani consecutivi, in quanto esso è spesso direttamente correlabile alla condizione strutturale, come riportato a titolo di esempio in Figura 83.

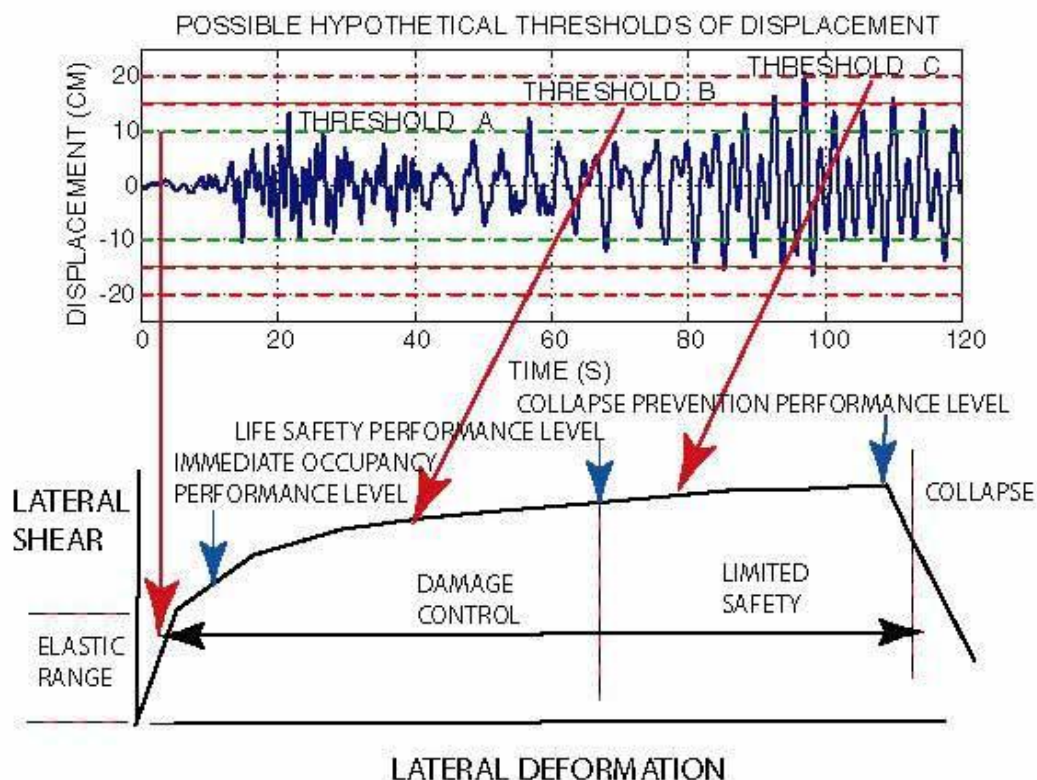


Figura 83 – Correlazione tra serie temporale degli spostamenti misurati e la performance strutturale [98]

Misurare gli spostamenti su di una struttura reale risulta molto complicato rispetto alle prove eseguite in laboratorio. Una metodologia per la stima diretta degli spostamenti delle strutture prevede l'utilizzo di sensori GPS. Fino a poco tempo fa, l'uso del GPS è stato limitato alle strutture con lunghi periodi di vibrazione ($T > 1$ s), come ad esempio gli edifici alti, perché tali sistemi hanno una frequenza propria nell'ordine di 10-20 Hz. Attualmente, è possibile reperire in commercio sensori GPS con frequenza propria fino a 50 Hz. La precisione di tali strumenti è di ± 1 cm in orizzontale e ± 2 cm in verticale. Con l'utilizzo di GPS, tuttavia, la misura degli spostamenti è possibile al solo impalcato di copertura. Il drift di piano stimato è quindi una media dei drift di piano dell'intero edificio. I dati provenienti dal sensore sono correlati con la performance della struttura secondo i criteri di progettazione delle strutture basati sul performance-based design.

In alternativa all'utilizzo dei sensori GPS, è possibile procedere al calcolo (indiretto) degli spostamenti mediante due diverse metodologie: (i) metodi basati sull'accelerazione e (ii) metodi basati sulle deformazioni. I primi prevedono l'integrazione delle accelerazioni, che può avvenire nel

dominio del tempo o nel dominio delle frequenze. I secondi si basano sulla tecnica della doppia integrazione.

Per i sistemi basati sulle accelerazioni, gli accelerometri devono essere strategicamente posizionati sulla struttura per facilitare la misurazione in tempo reale della risposta strutturale effettiva, che a sua volta viene utilizzata per calcolare gli spostamenti e, quindi, i drift di piano come indici di danno e indicatori di allerta. Sebbene sarebbe preferibile distribuire gli accelerometri ad ogni livello ed in ogni direzione, nella pratica ciò non è possibile non solo per i costi di installazione ma anche per l'elevato onere computazionale derivante dalla doppia integrazione.

I sistemi SHM che prevedono il calcolo degli spostamenti a partire da misure di accelerazione si basano su una serie di accelerometri posizionati strategicamente sulla struttura. I dati provenienti dai sensori vengono acquisiti mediante hardware di acquisizione che provvede al loro campionamento ed alla conversione analogico-digitale. Risulta fondamentale impostare correttamente la frequenza di campionamento del segnale. Generalmente, per strutture civili frequenze di campionamento di 100-200 Hz risultano idonee allo scopo. I dati sono altresì filtrati per eliminare armoniche spurie e disturbi elettrici. A questo punto, si procede con il calcolo degli spostamenti (ai vari impalcati, nel caso di edifici multipiano) mediante, ad esempio, il metodo della doppia integrazione delle accelerazioni. Di seguito si analizza il problema della doppia integrazione a partire dalla registrazione delle accelerazioni.

2.7.1.1 Doppia integrazione delle accelerazioni

Di seguito si analizza il problema della doppia integrazione a partire dalla registrazione delle accelerazioni. Indicando con $a(t)$ l'accelerazione misurata, la velocità può essere calcolata come riportato in Eq. (22):

$$v(t) = v(0) + \int_0^t a(\tau) d\tau = v(0) + \int_0^t \frac{d^2 x(\tau)}{d\tau^2} d\tau \quad (22)$$

dove $v(t)$ è la velocità al tempo t , $v(0)$ è la velocità iniziale, $a(\tau)$ la velocità al tempo $t = \tau$ e $x(\tau)$ lo spostamento al tempo $t = \tau$. Il termine di spostamento è dato dall'integrazione della velocità $v(t)$:

$$x(t) = x(0) + \int_0^t v(\tau) d\tau = x(0) + v(0)t + \int_0^t \int_0^t a(\tau) d\tau dt \quad (23)$$

dove $x(0)$ è lo spostamento iniziale. Se lo spostamento derivante dall'accelerazione misurata e le condizioni iniziali sono definiti come nell'Equazione (23), la stima dello spostamento può essere rappresentata come segue:

$$x(t) = \beta(t) + \gamma(t) \quad (24)$$

$$\beta(t) = \int_0^t \int_0^t a(\tau) d\tau dt \quad (25)$$

$$\gamma(t) = x(0) + v(0)t \quad (26)$$

Se si assumono le condizioni iniziali pari a zero, la risposta in termini di spostamento è definita solamente dall'integrale del segnale delle accelerazioni - Equazione (25) -. Nel caso in cui si trascurino condizioni iniziali non nulle, gli spostamenti calcolati sono affetti da errore. In ogni caso, le misure di accelerazione sono generalmente affette da errori del data logger e da errori dovuti alle procedure di analisi dei dati misurati. Le misure devono pertanto essere eseguite scegliendo con cura sistema di acquisizione e accelerometri, e determinando un'adeguata impostazione per la frequenza di campionamento. Occorre inoltre tener presente che varie tecniche di elaborazione del segnale, che si rendono necessarie per la rimozione del rumore, possono diminuire l'affidabilità dello spostamento stimato.

Per valutare l'influenza delle condizioni iniziali sulla stima dello spostamento per successive integrazioni dell'accelerazione, è possibile creare un segnale artificiale in termini di spostamento. In particolare, si costruiscono due segnali, uno pseudo-statico ed uno dinamico (si veda Figura 84). Le caratteristiche principali dei due segnali utilizzati sono riportati in Tabella 13. Come noto, la risposta pseudo-statica è la componente statica della risposta totale dello spostamento, mentre la componente dinamica consiste in una serie di termini dipendenti dal tempo. Dal segnale di spostamento così ottenuto (Figura 84) è possibile ricavare, tramite doppia derivazione, il segnale in accelerazione (Figura 85).

Tabella 13 – Segnali artificiali per il calcolo degli spostamenti.

Descrizione	Segnale 1	Segnale 2
Frequenza campionamento (Hz)	1024	1024
Ampiezza (mm)	0.2	1
Frequenza (Hz)	30	2

A partire dal segnale in accelerazione è possibile ricavare la risposta in termini di spostamento mediante l'Eq. (3). Se la velocità iniziale non è determinata accuratamente, però, si commettono errori sistematici nella stima degli spostamenti a partire dal segnale accelerometrico. Come evidenziato dell'Eq. (3), infatti, l'errore del termine di spostamento iniziale nell'equazione dello spostamento calcolato viene accumulato durante l'integrazione, dando luogo a una deriva nel risultato, come illustrato in Figura 86, in cui sono riportate le serie temporali degli spostamenti calcolate con differenti condizioni iniziali. Quindi, lo spostamento iniziale può essere facilmente calcolato se si conosce la velocità iniziale. Se, invece, velocità iniziale e spostamento iniziale non nulli sono trascurati, si generano errori nel processo di integrazione che danno luogo alla deriva del segnale, con conseguente errore sull'ampiezza dello spostamento misurato [35]. In Figura 87 si nota l'errore che si commette quando non vengono definite correttamente le condizioni iniziali. Generalmente, tali errori possono essere superati attraverso il filtraggio oppure misurando la velocità iniziale. Il percorso che porta dalle misure di accelerazione agli spostamenti, come riportato in Figura 88 contiene diverse fasi di elaborazione inclini all'errore. I principali passi descritti includono: doppia integrazione numerica, condensazione statica e, se necessario, interpolazione. Questo particolare ordine delle operazioni non è obbligatorio o necessariamente ottimale. Ottenere spostamenti mediante doppia integrazione delle accelerazioni comporta diverse fasi di elaborazione del segnale delicate e talvolta soggettive come: correzione della linea di base del segnale, zero padding e filtraggio. Diverse agenzie internazionali che implementano programmi di monitoraggio sismico hanno sviluppato delle linee guida per quanto riguarda gli step da seguire per elaborare le accelerazioni registrate sul terreno o su strutture [100]. Il primo passo consiste nel migliorare la qualità complessiva del segnale. Questo risultato si ottiene con alcune sottofasi ben consolidate che includono la correzione della linea di base del segnale e il filtraggio passa-basso. A causa di circostanze inevitabili (ad esempio, fluttuazioni della temperatura) i dati grezzi sono affetti da rumore e spesso da offset. L'offset iniziale può essere eliminato sottraendo la media del segnale dall'intera registrazione. Il filtraggio passa-basso viene applicato per ridurre

l'ampiezza del rumore tipicamente presente all'interno di una banda a frequenza maggiore. Sebbene si tratti di un'operazione meno delicata del filtraggio passa-alto, il vantaggio del filtro passa-basso è quello di aumentare il rapporto segnale rumore. Il suo utilizzo deve essere bilanciato con l'inevitabile diminuzione di ampiezza del segnale.

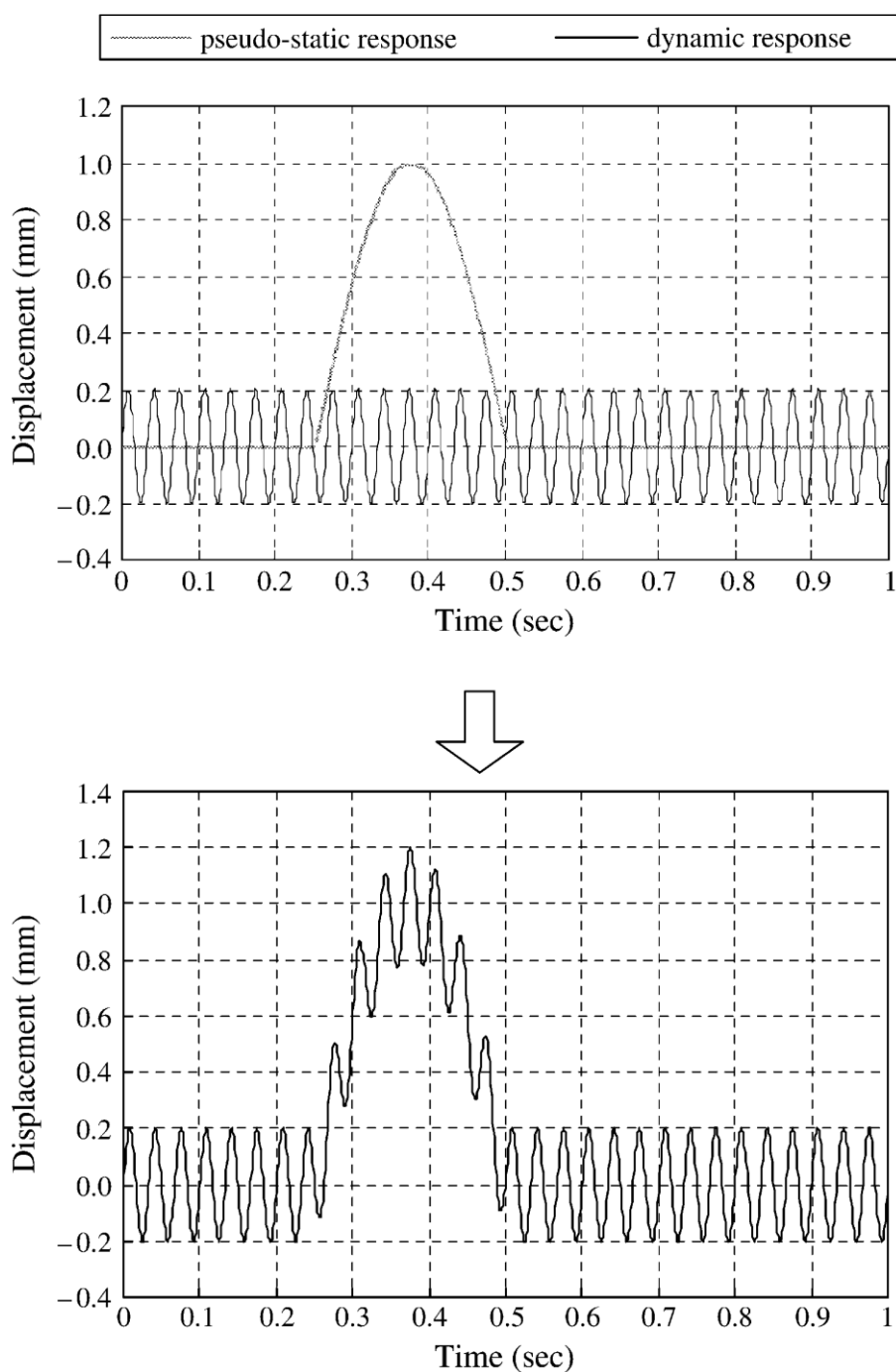


Figura 84 – Segnale artificiale in termini di spostamento [99].

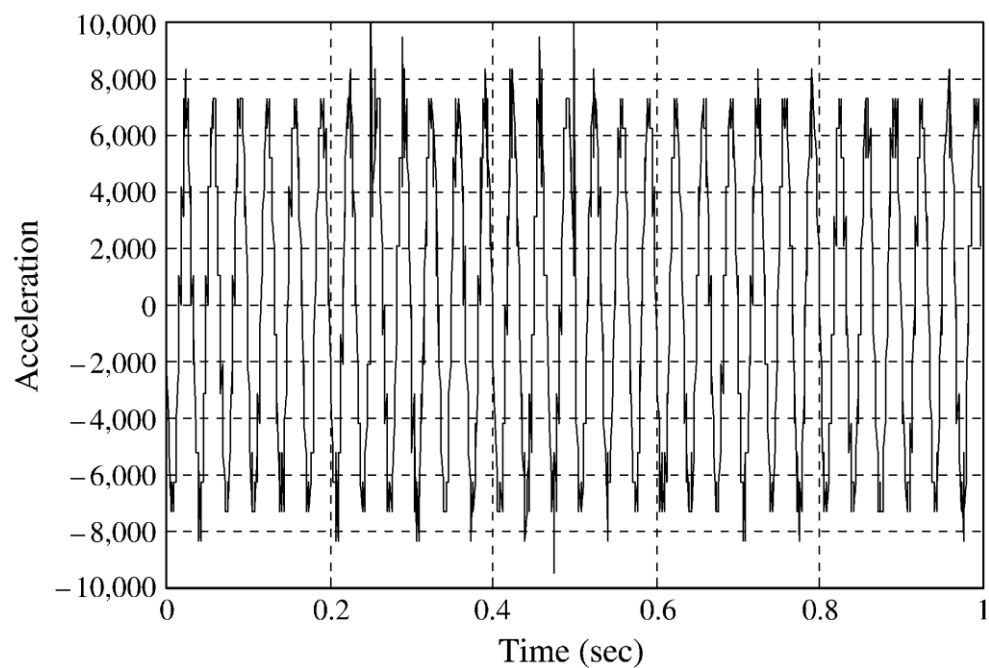


Figura 85 - Segnale in accelerazione ottenuto per doppia derivazione degli spostamenti [99].

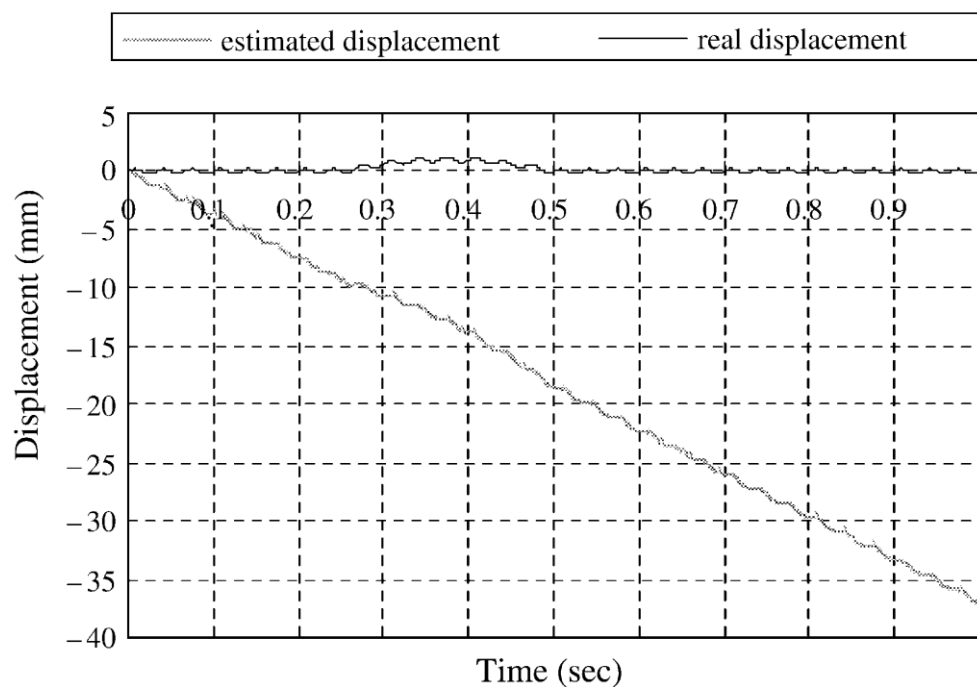


Figura 86 - Confronto tra gli spostamenti stimati e misurati [99].

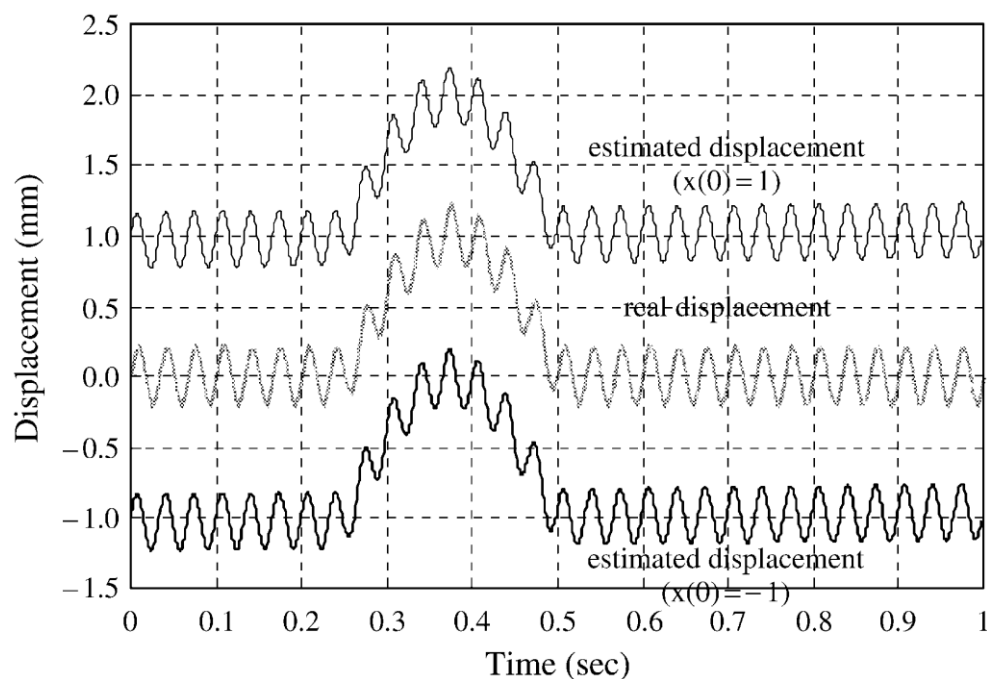


Figura 87 - Errore nella stima delle condizioni iniziali [99].

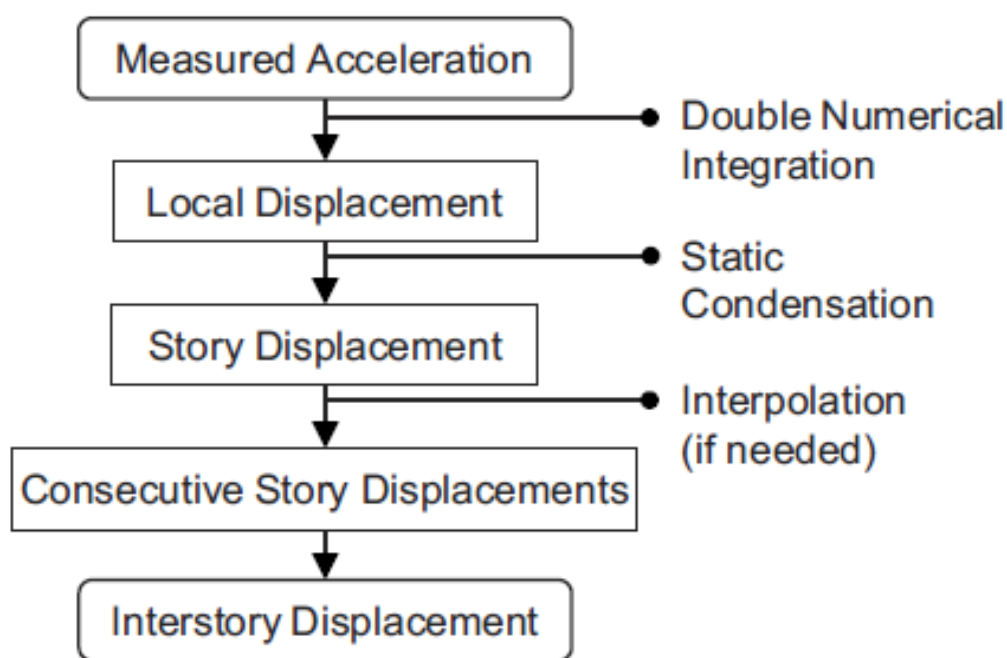


Figura 88 - Elaborazione del segnale: dalla misura delle accelerazioni all'interstory drift.

Il filtraggio passa-alto è probabilmente lo step più importante per il trattamento dei dati strong motion. In preparazione al filtraggio, le estremità dei segnali vengono condizionate aggiungendo un tampone di zero per poi utilizzare il filtro. In generale, i tipi di filtro ed altri parametri come ordine e frequenza di taglio sono scelti per tentativi a seguito di ispezioni visive degli spostamenti ottenuti. È necessario porre particolare attenzione nella scelta del filtro, in quanto si possono introdurre ritardi di fase che possono falsare la sincronizzazione tra i vari segnali. Per evitare ritardi e garantire la sincronizzazione dei canali, i dati possono essere filtrati due volte considerando il segnale originale e quello invertito, in modo da annullare il ritardo di fase.

Un'altra possibile soluzione è quella di utilizzare identici filtri per tutti i canali dell'intero sistema. Tuttavia, il filtraggio ottimale è alquanto soggettivo e dipende da segnale a segnale.

Per valutare l'entità di tali problemi è possibile analizzare i dati ottenuti da [101] utilizzando una tavola vibrante soggetta a serie temporali lineari e non lineari. L'input è stato rilevato mediante l'utilizzo di tre differenti tipologie di accelerometri presenti in commercio e da cui sono stati ricavati, tramite doppia integrazione, i valori degli spostamenti. Lo scopo del test è quello di dimostrare come le procedure di elaborazione dei dati sono sensibili al singolo segnale acquisito e come, a parità del segnale acquisito, si ottengono differenti risultati al variare della tipologia di sensori. Gli accelerometri utilizzati sono un accelerometro force-balance, un accelerometro MEMS ed uno piezoelettrico.

Come osservato in precedenza, il primo passo di post processing mira a migliorare la qualità del segnale rimuovendo la media e applicando un filtro passa-basso. La Figura 89a mostra i primi secondi delle accelerazioni misurate (senza la rimozione della media) e la corrispondente ampiezza del rumore RMS (con la media rimossa) prima e dopo l'applicazione di un filtro passa-basso Butterworth di ordine 4 a 25 Hz. Si noti la differenza nella qualità del segnale per i differenti sensori.

Il migliore risulta il segnale ottenuto dall'accelerometro force-balance con un RMS iniziale di 421 μg , e di 58 μg dopo il filtraggio.

Come anticipato, l'ampiezza del rumore è legata anche a fattori di natura elettrica e meccanica. Diminuendo la frequenza di taglio diminuisce anche l'ampiezza RMS del rumore; oltre un certo limite, tuttavia, si assiste anche ad una riduzione dell'ampiezza del segnale. In Figura 89b è mostrato un ingrandimento del segnale con differenti frequenze di taglio, da cui si evince come, con frequenza di filtraggio di 10 Hz, si ha una riduzione dell'ampiezza del segnale che non può essere trascurata, mentre una frequenza di 25 Hz ben si presta alla rimozione del rumore.

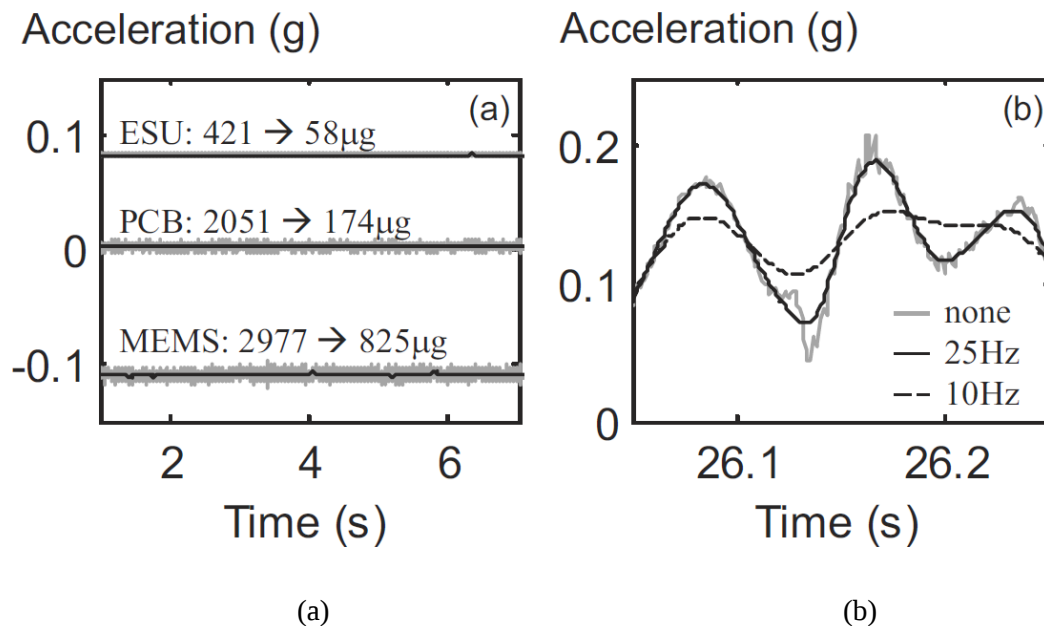


Figura 89 – Accelerazione vs tempo: (a) ampiezza RMS dell'accelerazione misurata; (b) ingrandimento del segnale misurato con differenti frequenze di filtraggio [101].

Il passo successivo è l'applicazione del filtro passa-alto per rimuovere le componenti delle accelerazioni che portano alla deriva delle velocità e degli spostamenti a seguito dell'integrazione (Figura 90). I dati delle accelerazioni sono stati trattati mediante l'utilizzo di un filtro passa-alto Butterworth di ordine 4. In questo caso la selezione della frequenza di taglio del filtro è più diretta in quanto è possibile eseguire un confronto con gli spostamenti misurati, confronto che difficilmente è possibile nella realtà.

In Figura 91 è mostrato il rapporto segnale-rumore (SNR) delle serie temporali degli spostamenti. L'accelerometro force-balance fornisce il più alto rapporto segnale-rumore (circa 40 dB, il che equivale ad un'ampiezza dell'errore che è poco più dell'1%). L'accelerometro MEMS raggiunge i 20 dB con un'ampiezza dell'errore del 10% del segnale. Le frequenze di taglio nominali variano da 0.1 a 0.3 Hz e sembrano essere inversamente proporzionali all'ampiezza dell'errore, come si può notare dalla Figura 91b che mostra la trasformata di Fourier dei dati filtrati e non filtrati.

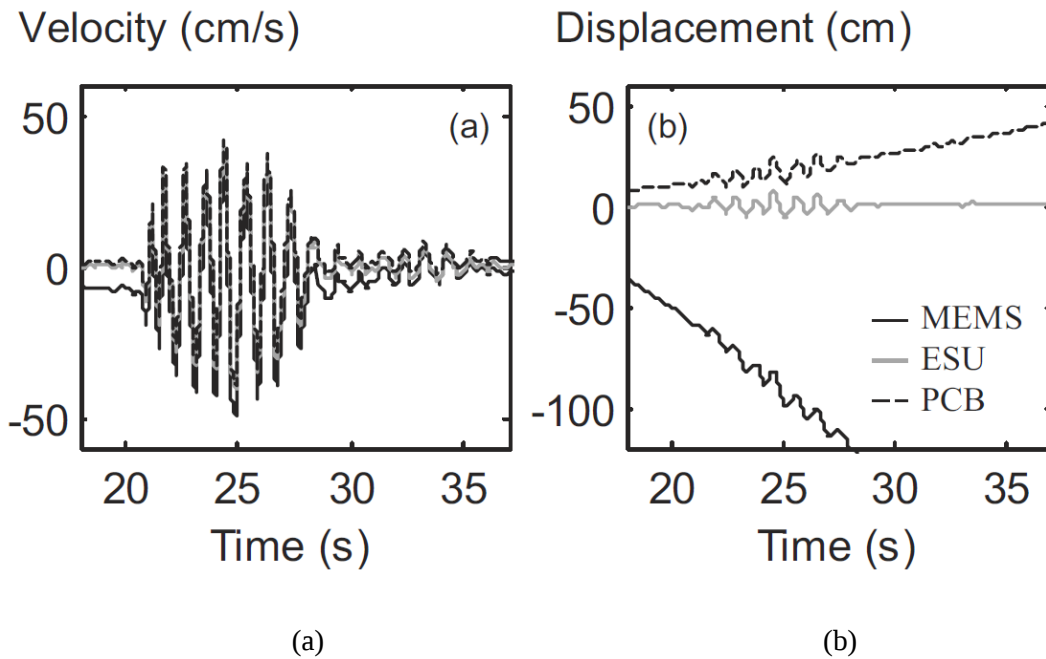


Figura 90 - (a) Velocità; (b) serie temporali degli spostamenti a partire dalle accelerazioni [101].

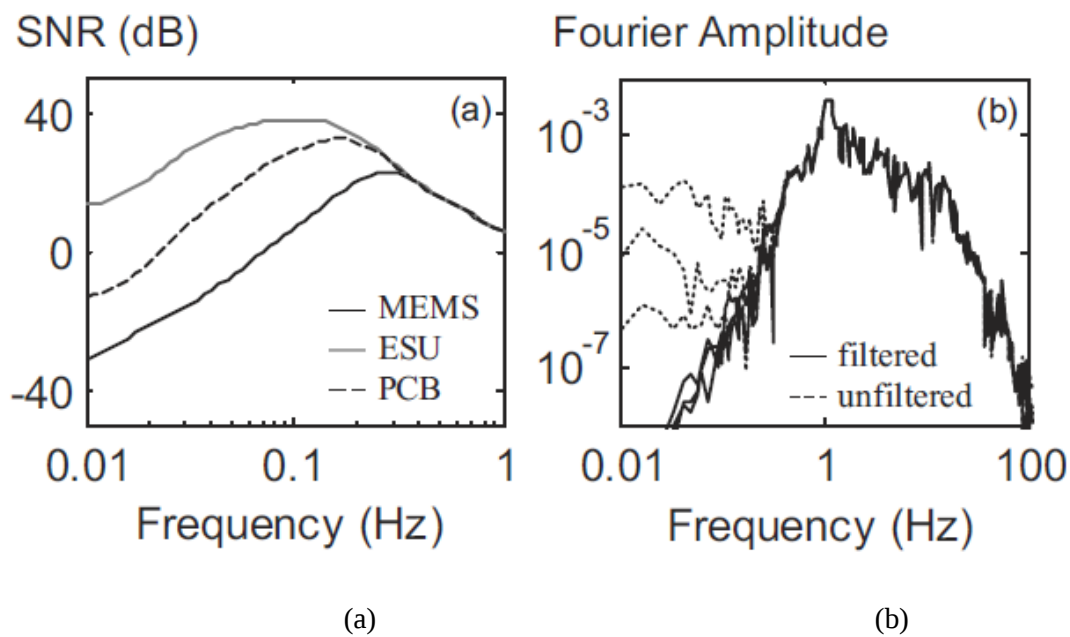


Figura 91 - (a) Frequenza di taglio ottimale; (b) trasformata di Fourier tra dati filtrati e non filtrati [101].

La differenza assoluta tra le serie temporali degli spostamenti misurate e quelle ottenute mediante doppia integrazione delle accelerazioni e filtraggio passa-alto è mostrata in Figura 92. L'errore degli

spostamenti varia tra l'1 e il 4% per il caso lineare (Figura 92a) e tra il 12 e il 15% per il caso non lineare (Figura 92b). Questo aumento di errore nel picco degli spostamenti per il caso non lineare è allarmante. Gli spostamenti ottenuti da accelerazioni misurate, infatti, possono essere affetti da gravi errori quando la risposta del sistema è non lineare. Infine, è possibile valutare la qualità dei dati ottenuti in base al sensore utilizzato, la cui scelta dipende essenzialmente dalle differenti esigenze applicative.

Trascurando i problemi delle risposte non lineari e considerati accettabili gli spostamenti derivanti dalle accelerazioni del sistema lineare, il passo successivo è il calcolo del drift di piano, che può richiedere la condensazione statica e l'interpolazione verticale dei dati. Tali questioni si pongono, in particolar modo, per edifici scarsamente strumentati.

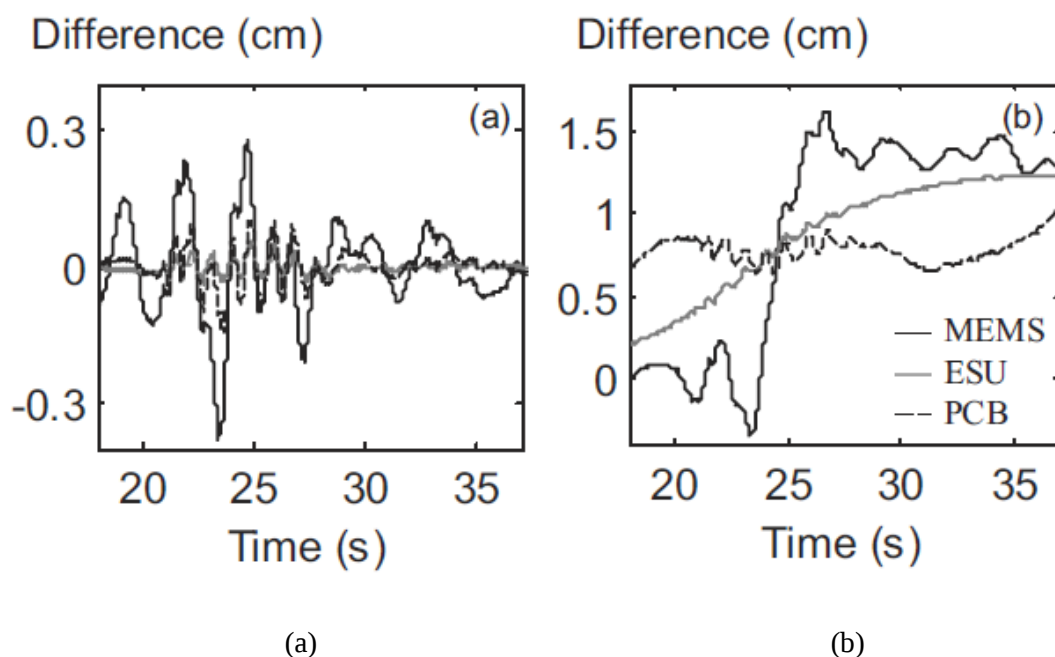


Figura 92 - (a) Differenza assoluta tra segnale misurato e calcolato: (a) lineare, (b) non lineare [101].

2.7.1.2 Strutture scarsamente strumentate

Quando si studia il comportamento dinamico di una struttura l'assunzione di diaframma rigido semplifica notevolmente i calcoli, come noto. Effettuando questa ipotesi, infatti, i gradi di libertà (GDL) di un sistema si riducono a tre per ciascun piano (Figura 11): due traslazioni ortogonali (u_0 e v_0) e una torsione (θ_0). Definendo gli spostamenti dell'impalcato secondo i 3 gradi di libertà, u_0 , v_0 e

θ_0 , la relazione che lega questi agli spostamenti degli altri punti dell'impalcato che considereremo coincidenti con le posizioni dei sensori, è definita dalla seguente equazione:

$$u_i = u_0 - y_i \theta_0 \quad e \quad v = v_0 + x_i \theta_0 \quad (27)$$

dove x_i e y_i sono le coordinate dell' i -esimo punto rispetto al punto per cui sono definiti gli spostamenti dell'impalcato. Quindi, per determinare l'Interstory Drift partendo dalle misure di accelerazione, sono necessari un minimo di sei canali posizionati su due o tre piani consecutivi.

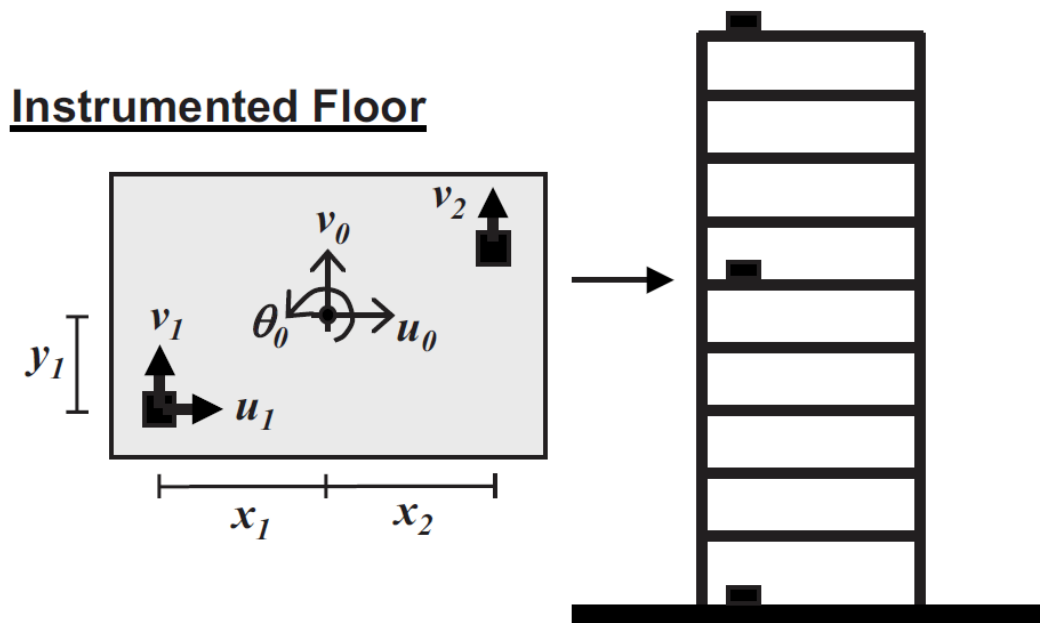


Figura 93 - Esempio di edificio scarsamente strumentato [101].

L'impiego di un numero limitato di sensori comporta due problemi principali: (i) non si riescono a definire accuratamente i GDL della struttura; (ii) viene a mancare la componente verticale.

Un tentativo di valutare l'errore nella stima dell'interstory drift derivante da queste problematiche è stato effettuato in [102]. Vengono proposte due tipologie di interpolazione, lineare o cubica, allorché si hanno a disposizione pochi sensori. Generalmente, l'interpolazione lineare è adatta per gli edifici isolati e per livelli interrati, mentre l'interpolazione cubica risulta maggiormente adatta per i piani

fuori terra, in particolar modo per gli edifici alti. In [102] si utilizza l'interpolazione per creare un canale virtuale in corrispondenza di quei piani in cui si hanno solamente due sensori da cui ottenere una storia delle accelerazioni virtuale. Questi canali virtuali sono collocati sulla medesima verticale dei canali installati ai diversi livelli. Per verificare tale approccio, un sensore realmente installato è stato sostituito con un sensore virtuale ed i dati ottenuti sono stati messi a confronto. I risultati forniti, tuttavia, evidenziano alcune inaccuratezze, in particolare ad elevate frequenze.

Nel caso ideale di una struttura che non presenti alcun modo torsionale, possono essere impiegati solamente due sensori nelle due direzioni ortogonali. In realtà una risposta torsionale è generalmente attesa in quanto il baricentro delle masse non coincide mai perfettamente con quello delle rigidezze, anche in presenza di una struttura formalmente simmetrica. Dato che la stima del baricentro delle masse non è mai esatta in condizioni reali, gli attuali codici di progettazione ne tengono conto modificando la sua posizione del 5%.

In presenza di manifeste irregolarità si riscontrano significativi effetti torsionali. Secondo quanto riportato in ASCE 7-05 (American Society of Civil Engineers), un'irregolarità torsionale è presente se l'interstory drift agli estremi degli edifici è 1.2 volte il valore medio; tale rapporto può elevarsi a 1.4 in caso di estrema irregolarità. L'interstory drift medio è valutato come media dei valori misurati lungo due estremi e nella stessa direzione. La valutazione della presenza di irregolarità torsionali consente di introdurre un termine correttivo che tiene conto dell'ampiezza della torsione (A_t). Se v_{1m} e v_{2m} denotano la massima risposta dei canali v_1 e v_2 , come in Figura 94, e v_{2m} è maggiore di v_{1m} , l'ampiezza della torsione è formalmente definita come:

$$A_t = v_{2m}/(v_{1m} + v_{2m})/2 \quad (28)$$

Ne consegue l'importanza di porre particolare attenzione nel posizionamento dei sensori, dato che un loro disallineamento comporta un errore nella stima delle risposte torsionali. Si supponga, ad esempio, di voler valutare l'effetto del disallineamento di un canale. Si consideri un sistema più semplice di quello riportato in Figura 93, recante soli due canali, v_i e v_2 (si omette la componente trasversale u). Utilizzando l'Equazione (28) si può calcolare la torsione dell'impalcato θ , come:

$$\theta_0 = (v_2 - v_1)/(x_2 - x_1) \quad (29)$$

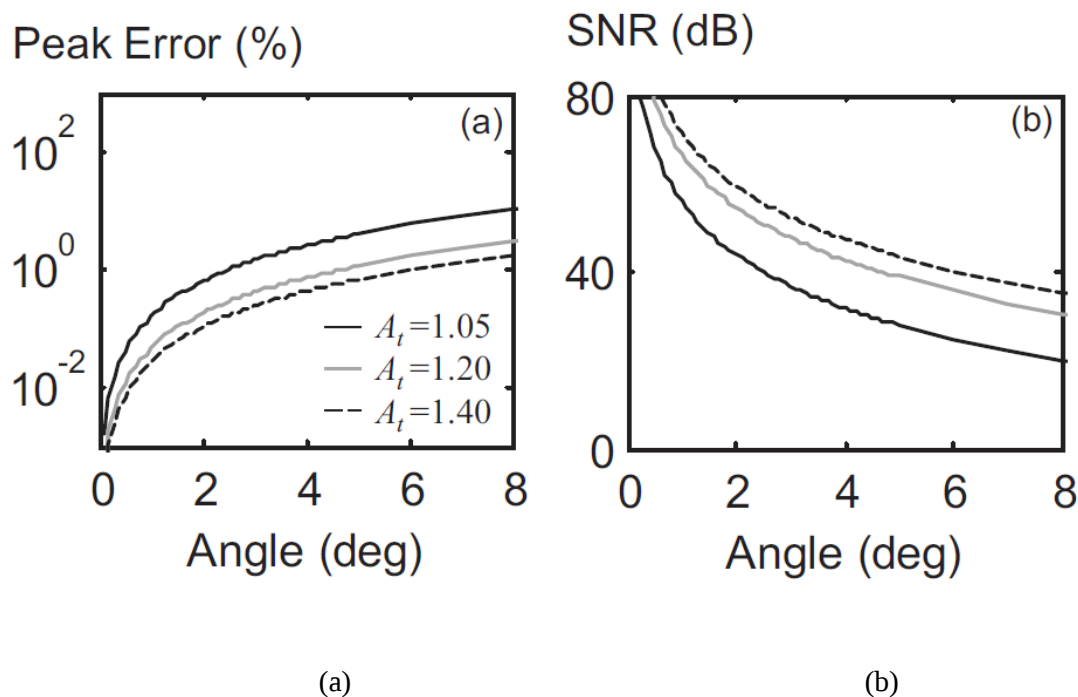


Figura 94 - Errore in termini di valore di picco (a) e SNR (b) per differenti risposte torsionali considerando un disallineamento dei sensori [101].

I dati di risposta sono stati simulati per un canale e ricavati per l'altro in base alla quantità di torsione specificata dal parametro A_t dell'Equazione (28). Si noti che se A_t è uguale ad 1 non vi è alcuna torsione perché lo spostamento registrato da un canale è uguale alla media dei due canali. Qualsiasi disallineamento di un canale (ad esempio, il canale v_2) di un angolo α rispetto alla posizione nominale si traduce in un valore leggermente inferiore a quello misurato: più precisamente, il fattore di riduzione è pari a $\cos(\alpha)$.

Le Figura 94a e Figura 94b riportano, rispettivamente, l'influenza del disallineamento sull'errore di picco e sul rapporto segnale-rumore (SNR) per un semplice sistema armonico caratterizzato da due canali, di cui uno disallineato, e per tre differenti ampiezze di A_t . I risultati rappresentati sono stati ottenuti con differenti serie temporali. I grafici dimostrano che, per tipiche ampiezze di torsione ed un angolo limitato di disallineamento, l'errore che si commette è tollerabile, mentre esso diventa significativo per piccole ampiezze di risposta torsionali. Ad esempio, una tolleranza nell'allineamento di 2° limita l'errore di picco all'1% e determina un SNR maggiore di 40 dB per risposte torsionali con $A_t > 1.05$. Tuttavia, anche se non espressamente affermato in questo studio, occorre tener conto anche dell'influenza della sensibilità trasversale del sensore sui risultati.

In sintesi, il monitoraggio del drift di piano in strutture scarsamente strumentate presenta due problemi principali. Per quanto riguarda il calcolo degli spostamenti occorre garantire l'installazione di almeno tre canali, di cui uno ortogonale e gli altri due paralleli e distanti tra loro in modo da ottenere i tre GDL della struttura. Risposte armoniche simulate dimostrano che disallineamenti di 2° sono tollerabili. Utilizzando più di tre canali si ha una ridondanza che non migliora il calcolo degli spostamenti. Se la strumentazione non è disponibile per tutti gli impalcati, l'errore indotto dall'interpolazione può essere sostanziale anche per i piani immediatamente vicini agli impalcati strumentati. Dati gli svantaggi associati al calcolo degli spostamenti tramite doppia integrazione delle accelerazioni e le ulteriori problematiche concernenti l'utilizzo di un ridotto numero di sensori, è possibile prendere in considerazione metodi alternativi per la valutazione dell'interstory drift. Di seguito si descrivono delle metodologie alternative, distinte rispettivamente in metodologie a contatto e senza contatto. Una sintesi dei vantaggi e svantaggi per ciascuna metodologia è riportata in **Tabella 14**.

Tabella 14 – Riepilogo delle metodologie per la misura dell'Interstory Drift.

Approccio		Vantaggi	Svantaggi
Doppia integrazione delle accelerazioni		Tecnologia robusta; discreta facilità di installazione	Richiede più sensori su più impalcati; l'elaborazione del segnale può essere soggettiva; inaffidabile con spostamenti non lineari
Misure a contatto	LVDT	Misura diretta degli spostamenti	Difficile installazione; richiede hardware aggiuntivo; inaffidabile per piccole ampiezze
	Fibra ottica	Cavi integrati	Difficile da riparare dopo l'installazione
Misure senza contatto	GPS	Facile installazione	Solo spostamenti del tetto; interferenze nelle aree urbane; necessità di stazione di riferimento
	Video/immagine	Facile installazione	Richiede l'elaborazione delle immagini; richiede frame di riferimento; bassa risoluzione.
	Fotoelettrico (trasversale diretta)	Discreta installazione	Tecnologia costosa; range limitato
	Fotoelettrico (distanza assiale)	Facile installazione	Bassa risoluzione

2.7.1.3 Metodi alternativi: misure a contatto

Il metodo più semplice per ottenere un Interstory Drift consiste nel misurare lo spostamento assoluto ad ogni piano utilizzando un sensore di spostamento, come un LVDT (Linear Variable Displacement Transducer). Questo, tuttavia, richiede un sistema di riferimento rigido che è impraticabile per l'implementazione su casi reali. Un'alternativa per calcolare gli spostamenti relativi può essere quella di collegare, tramite l'utilizzo di un cavo posto in diagonale, un sensore LVDT posizionato a terra con il nodo dell'impalcato superiore (Figura 95).

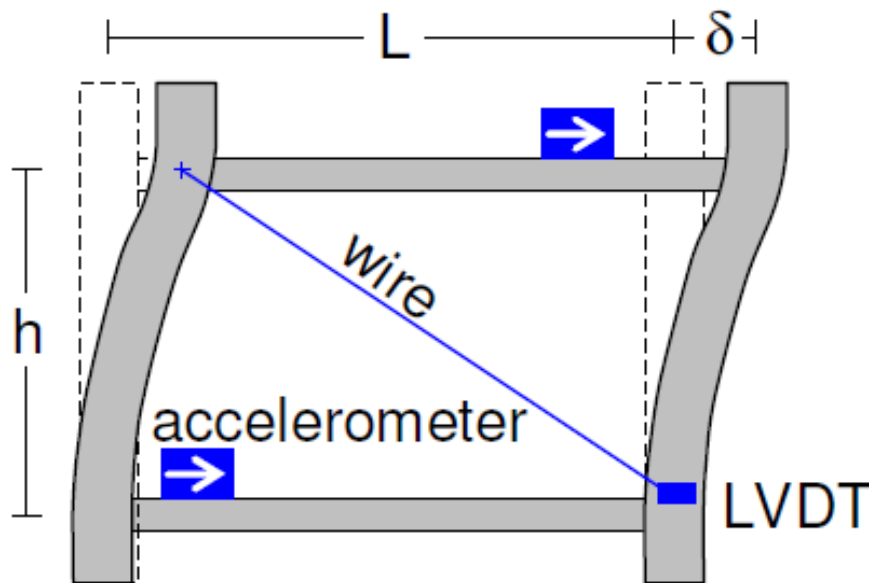


Figura 95 - Schema di misura con l'utilizzo di sensori LVDT [103].

Se le estremità del cavo sono libere di ruotare, l'Interstory Drift può essere calcolato a partire dalla misura dell'accorciamento o allungamento (ΔD) del cavo e della sua lunghezza iniziale (D), come:

$$IDR = (\Delta D \cdot D) / (h \cdot L) \quad (47)$$

dove L è l'interasse tra le colonne, h l'altezza interpiano e IDR l'Interstory Drift Ratio. Questo approccio funziona bene per prove in laboratorio con modelli in scala, mentre risulta meno efficace per edifici reali. Inoltre, questa tecnica fornisce solo lo spostamento del sensore nel piano. Infine,

risulta poco pratica nel caso di edifici in cui si registra la presenza di persone e/o di numerose pareti divisorie.

Di seguito si riporta un breve confronto, eseguito su di un edificio in cemento armato di quattro piani, tra gli spostamenti misurati tramite LVDT e quelli stimati tramite accelerometri [104].

I sensori LVDT hanno un problema noto come offset costante a tratti (Figura 14). Una possibile causa di questo problema potrebbero essere piccoli slittamenti meccanici all'interno dell'apparato di misurazione. Ad esempio, una piccola rotazione dell'intera configurazione potrebbe generare una misura fittizia di accorciamento o allungamento. Altro problema legato all'impiego degli LVDT è il rilassamento del cavo: l'utilizzo di molle che lo rendono pre-teso, tuttavia, comporta un ritardo nei valori di picco.

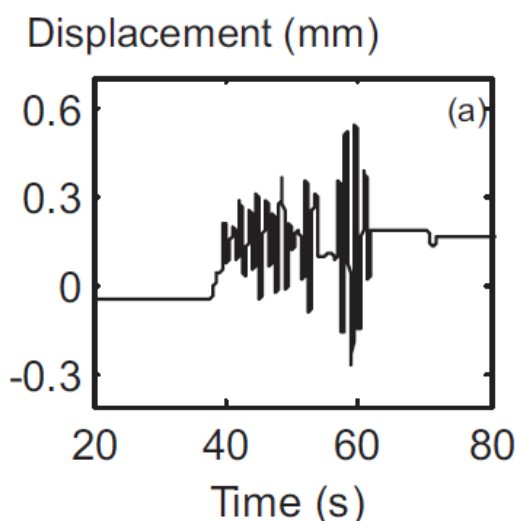


Figura 96 - Offset variabile manifestato da un sensore LVDT durante un test di misura [101].

L'interstory drift calcolato con gli LVDT (d_I) è confrontato con quello ottenuto tramite doppia integrazione numerica di segnali accelerometrici misurati da un sensore vicino (u_I) al livello del pavimento della copertura, come mostrato in Figura 97.

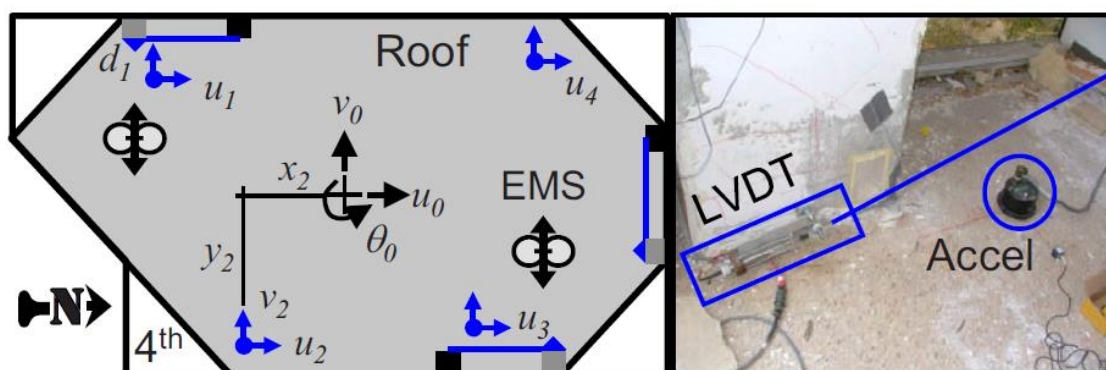


Figura 97 - Disposizione dei sensori [101].

La Figura 98a mostra il confronto per una risposta transitoria a bassa ampiezza, da cui emerge un errore di picco del 22% e un SNR di 9 dB, mentre, la Figura 98b mostra due confronti ad ampiezze moderate (0.25% e 0.08% di drift) in regime permanente che corrispondono ad errori di picco, rispettivamente, del 5.8% e 1.4%, e a SNR di 24.4 dB e 20.2 dB. Si nota come per piccole risposte in ampiezza, la deriva associata agli LVDT è inferiore rispetto a quella ottenuta per effetto dell'integrazione delle accelerazioni; il contrario accade per le ampiezze maggiori. Inoltre, si nota un leggero ritardo nella risposta a piccole ampiezze.

Un altro metodo con contatto per ottenere spostamenti strutturali include l'utilizzo di fibre ottiche. Esse sono sensibili alle deformazioni e vengono generalmente annegate all'interno di elementi strutturali in calcestruzzo. Esempi di utilizzo delle fibre ottiche per il monitoraggio strutturale sono riportati in ([105], [106]). Numerosi ponti e strutture alte sono attualmente monitorati con l'utilizzo di fibre ottiche. Tuttavia, la letteratura offre limitati riscontri positivi all'impiego delle fibre ottiche per il calcolo del drift di piano, essenzialmente a causa delle grandi dimensioni, dell'eterogeneità del materiale e di ambienti ostili [105].

In sintesi, anche se le misure dirette degli spostamenti relativi sembrano piuttosto semplici, i dati sono affetti da problemi di interazione meccanica associati alle superfici di contatto e da interazione dinamica. Per tale motivo vanno sempre più diffondendosi le applicazioni basate su trasduttori di spostamento senza contatto.

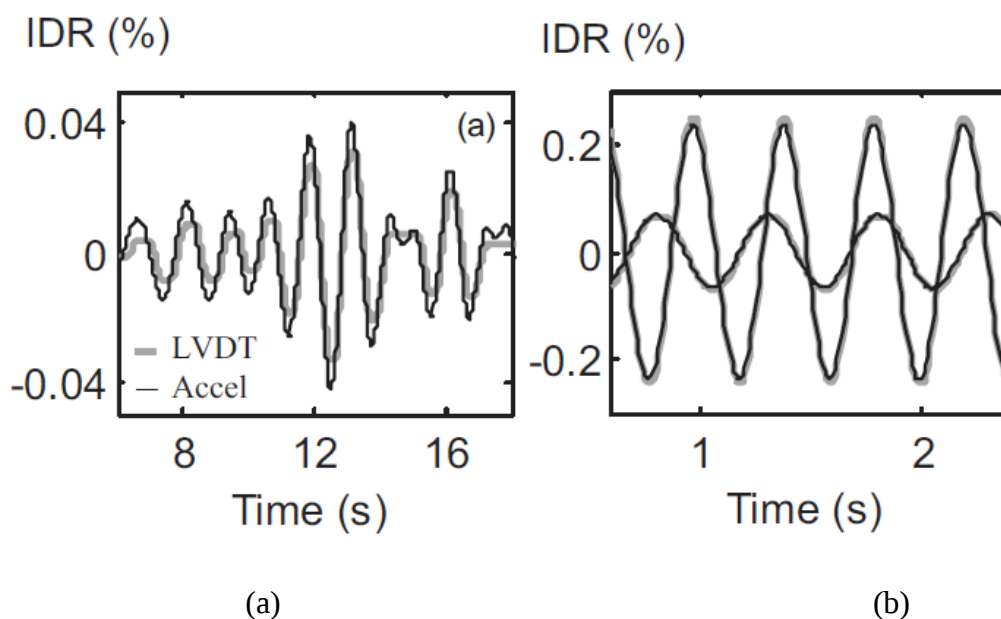


Figura 98 - Confronto degli spostamenti relativi di piano ottenuti tramite doppia integrazione delle accelerazioni e per misura diretta mediante LVDT: risposta transitoria a bassa ampiezza (a), risposta stazionaria ad ampiezza maggiore (b) [101].

2.7.1.4 Metodi alternativi: misure a contatto

Tra le tecnologie che prevedono l'utilizzo di metodi di misurazione degli spostamenti senza contatto, la più utilizzata e attualmente più vantaggiosa è quella basata sull'impiego di sensori GPS. Monitoraggi mediante la tecnologia GPS possono essere condotti solamente per edifici molto alti ed il loro posizionamento può avvenire esclusivamente al livello della copertura. Monitoraggi soddisfacenti condotti con tali sistemi sono stati condotti da ([107]-[109]). Tra i maggiori vantaggi dei sensori GPS va certamente menzionata la facilità di installazione; il principale svantaggio è la necessità di una stazione di riferimento. I sensori GPS sono utilizzati soprattutto per verificare i risultati in termini di spostamenti ottenuti per doppia integrazione di misure di accelerazione.

Videocamere ad alta risoluzione ed elevato frame rate [110] possono essere proficuamente utilizzate per il monitoraggio degli spostamenti. Un esempio applicativo è quello relativo a una trave di 450 m del ponte Vincent Thomas di Los Angeles, California, USA. I risultati ottenuti mediante l'utilizzo di tale tecnologia sono stati confrontati con quelli ottenuti mediante la doppia integrazione delle accelerazioni. I principali problemi riguardano il fissaggio rigido o flessibile della videocamera, che influisce sulla sensibilità alle basse/alte frequenze e, dunque, sui risultati della misura. D'altro canto, i costanti progressi nelle tecniche di elaborazione delle immagini e l'avanzamento tecnologico in

termini di risoluzione delle videocamere rendono questa tecnologia particolarmente promettente per il monitoraggio a lungo termine.

Infine, in [111], gli autori hanno eseguito prove in laboratorio mirate ad individuare spostamenti e rotazioni mediante misurazioni con laser unidirezionali con fotodiodi sensibili agli spostamenti (PSD - Position Sensitive Photodiodes). L'impiego di tale tecnologia, tuttavia, resta confinato ad applicazioni su strutture in scala per limiti intrinseci allo strumento di misura. Inoltre, sono stati riscontrati anche problemi di affidabilità delle misure in presenza di rotazioni del laser che, di fatto, introducono notevoli errori nella misura degli spostamenti.

2.7.2 Strategie di elaborazione dati per sistemi SHM wireless

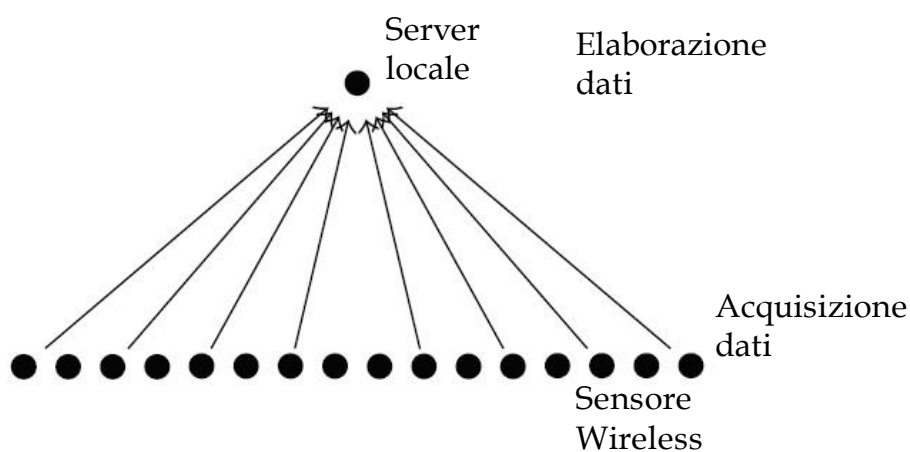
La valutazione dello stato di salute di strutture civili si basa sull'analisi di dati misurati da una varietà di sensori. Avvenimenti potenzialmente problematici per la condizione strutturale quali corrosione, fessurazione, instabilità, interessano sovente porzioni limitate di struttura. Di conseguenza, la risposta dei sensori più vicini alla porzione di struttura danneggiata tende ad essere maggiormente influenzata dalla presenza del danno rispetto alla risposta dei sensori da questo più lontani. Pertanto, al fine di identificare un generico stato di danno in una struttura complessa è necessario disporre di un denso array di sensori distribuiti sulla struttura. Ne consegue la necessità di gestire enormi quantità di dati.

Nel caso specifico di sistemi SHM di tipo wireless, tale aspetto è di fondamentale rilevanza rispetto anche alla comunicazione tra i nodi della rete, che in queste condizioni rappresenta una delle principali cause di consumo energetico e di possibili malfunzionamenti. Pertanto, ridurre al minimo le comunicazioni wireless anche in presenza di grandi quantità di dati misurati è fondamentale per assicurare l'efficienza e la funzionalità della rete per lunghi periodi di tempo. Tenuto conto, inoltre, che il trasferimento dell'enorme mole di dati prodotta da un sistema di monitoraggio rischia di congestionare la rete per via delle limitazioni alla banda delle comunicazioni wireless, l'implementazione di efficaci strategie di elaborazione dati gioca un ruolo primario nell'applicazione di reti di sensori wireless a grande scala per la valutazione delle prestazioni e dello stato di salute di infrastrutture stradali.

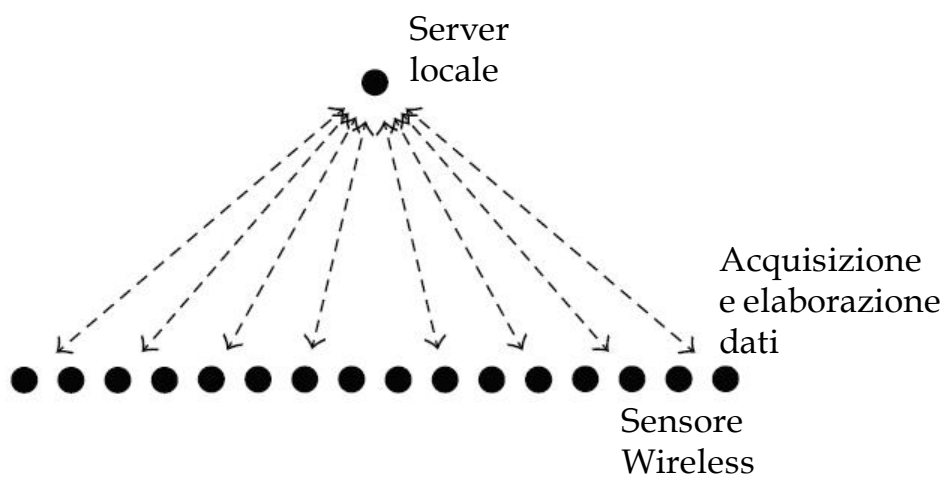
Le tecnologie di elaborazione dati possono essere raggruppate in quattro categorie principali:

- elaborazione centralizzata;
- elaborazione indipendente;
- elaborazione decentralizzata;
- elaborazione parallela.

I flussi di dati associati ai suddetti algoritmi di elaborazione dati sono schematicamente rappresentati in Figura 99.



(a)



(b)

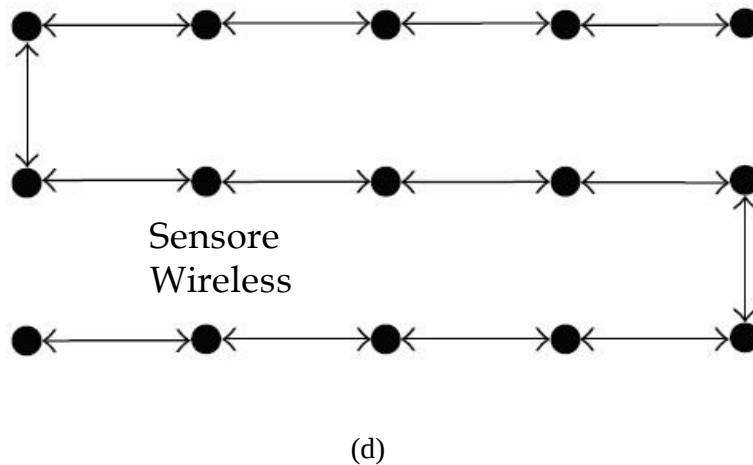
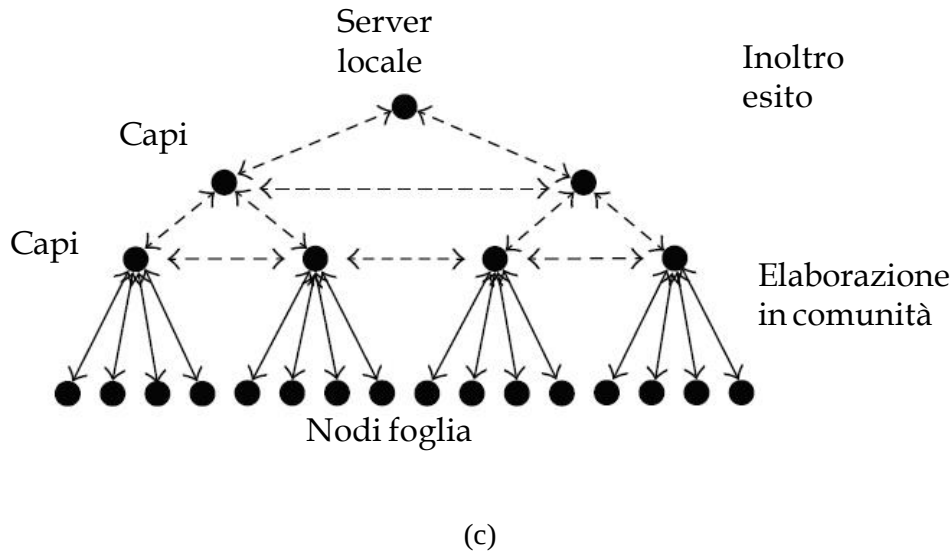


Figura 99 – Strategie di elaborazione: elaborazione centralizzata (a), elaborazione indipendente (b), elaborazione decentralizzata (c), elaborazione parallela (d)

Le ultime tre strategie di elaborazione dati sono strategie di tipo distribuito. In una strategia di elaborazione distribuita i dati sono dapprima analizzati localmente mediante il microprocessore integrato nei sensori wireless; le informazioni non necessarie sono quindi eliminate attraverso un'aggregazione dati al fine di utilizzare la rete in maniera efficiente, riducendo la quantità di informazioni che deve essere trasmessa al server.

L'elaborazione centralizzata (Figura 99a) richiede che tutti i dati siano trasmessi al server per l'elaborazione. Le odierne capacità di calcolo dei server consentono l'implementazione su di essi di qualunque strategia di elaborazione dati finalizzata alla valutazione delle condizioni di salute

dell'infrastruttura monitorata. Tuttavia, la strategia di elaborazione centralizzata risulta molto impegnativa dal punto di vista della trasmissione dati per via della grande quantità di dati da trasmettere, e i consumi associati alla trasmissione crescono all'aumentare delle dimensioni della rete. A causa dei requisiti di alimentazione e della limitata banda che caratterizza le comunicazioni wireless, il trasferimento di tutti i dati misurati al server per le successive elaborazioni risulta complesso e poco conveniente per le applicazioni di monitoraggio strutturale. Il notevole carico computazionale e la bassa efficienza dell'elaborazione centralizzata, infatti, non consentono di soddisfare il requisito della tempestiva identificazione del danno strutturale. Per tali motivi, si tende a preferire strategie di elaborazione distribuite per le applicazioni di monitoraggio strutturale, soprattutto in presenza di un gran numero di sensori installati.

L'elaborazione indipendente (Figura 99b) sfrutta le capacità di calcolo di ciascun nodo della rete e non richiede comunicazioni tra i sensori. L'algoritmo di elaborazione integrato nei sensori consente di raccogliere i dati ed elaborarli in locale, trasmettendo al server solo i risultati delle elaborazioni. Il server, a sua volta, elabora ulteriormente i dati ricevuti al fine di estrarre informazioni utili; alcune di queste possono essere eventualmente trasmesse di nuovo ai sensori se necessario. L'assenza di data fusion rende l'implementazione delle strategie di elaborazione indipendente relativamente semplici. L'ostacolo principale alla loro applicazione su larga scala è rappresentato dalla necessità di modificare gli algoritmi di identificazione del danno in modo da renderli integrabili in nuclei computazionali di limitata potenza.

Nelle strategie di elaborazione coordinata (Figura 99c) il sensore wireless elabora i dati in locale e scambia informazioni con altri sensori mediante trasmissione wireless. La cooperazione tra i sensori wireless consente l'implementazione di strategie di elaborazione dati e identificazione del danno più complesse rispetto all'elaborazione indipendente. La breve distanza di trasmissione e la compressione dei dati rendono le strategie di elaborazione coordinata particolarmente efficienti, e l'identificazione del danno si presta a una maggiore automazione rispetto ai casi precedenti. Si tratta, inoltre, di una strategia di calcolo scalabile. Lo svantaggio principale connesso all'adozione di uno schema di questo tipo è rappresentato da una maggiore complessità della topologia della rete che ne rende difficile la gestione.

La strategia di elaborazione parallela (Figura 99d) si presta particolarmente all'implementazione di algoritmi di identificazione dinamica output-only quali peak picking, Frequency Domain Decomposition e Random Decrement. Ad esempio, nel caso del peak picking, la serie temporale acquisita dal generico nodo è convertita nel dominio della frequenza al fine di identificare i picchi principali. L'informazione sui picchi identificati dai vari nodi viene successivamente utilizzata dal

server per l'identificazione di una ragionevole stima delle frequenze naturali dei modi considerati. Lo sviluppo di questa strategia di elaborazione dati, tuttavia, è ancora in fase iniziale per le applicazioni di monitoraggio strutturale.

2.7.3 *Statistical Pattern Recognition e monitoraggio*

Il danno può essere definito come un cambiamento intenzionale o non delle proprietà materiali e/o geometriche di una struttura, inclusi i cambiamenti delle condizioni al contorno e dei vincoli, che incidono negativamente sulle prestazioni attuali e future della struttura. In tale definizione di danno è implicito che la sua identificazione dipenda dal confronto tra due differenti stati del sistema, uno dei quali si assume per rappresentare lo stato iniziale di riferimento in assenza di danno. Nel contesto del monitoraggio strutturale, occorre associare i dati misurati a un qualche danno, distinguendo la condizione "sana" da quella "danneggiata" di una struttura. Tale riconoscimento, può essere operato secondo approcci diversificati [112].

Tutti i problemi ingegneristici sono soggetti a vari livelli di incertezza; un'approccio basato sulla *statistical pattern recognition* (SPR) è pertanto certamente adeguato agli scopi del monitoraggio infrastrutturale in ambito urbano. Un esempio generale di SPR per un sistema di monitoraggio strutturale (SHM) può essere definito attraverso l'integrazione di quattro procedure [113]:

1. Valutazione operativa;
2. Acquisizione dati;
3. Selezione degli indici di danno;
4. Modelli statistici per la funzione di discriminazione.

La normalizzazione dei dati, la selezione, la compressione e la fusione sono processi inerenti alle fasi 2 e 4. Questi processi possono essere implementati sia a livello hardware che software. Di solito si adotta una combinazione dei due. Il concetto di apprendimento automatico entra in questo paradigma principalmente nelle fasi 3 e 4.

Il processo di valutazione operativa tenta di fornire risposte alle quattro domande riguardanti l'implementazione di un'indagine di identificazione del danno:

1. Quali sono le motivazioni economiche o di protezione della vita per eseguire il monitoraggio strutturale?

2. Com'è definito il danno per il sistema oggetto d'indagine e, per molteplici possibilità di danno, quali sono i casi più preoccupanti?
3. Quali sono le condizioni operative ed ambientali?
4. Quali sono le limitazioni sull'acquisizione dei dati nella condizione di esercizio?

La valutazione operativa inizia a definire le limitazioni su ciò che può essere monitorato e su come il monitoraggio sarà realizzato; in tal modo si cerca di adattare il processo di identificazione del danno a caratteristiche uniche della struttura da controllare e del danno da rilevare. I dati provenienti dai differenti sensori installati sull'infrastruttura, sono archiviati e salvati su server preposto. I dati in gioco sono migliaia/milioni, ma privi di informazioni che possono definire lo stato di salute della struttura in maniera rapida. Per questo sono necessari processi di elaborazione, pulizia, normalizzazione, compressione e fusione dei dati, da cui poter estrarre indici di danno.

Il processo di separazione delle variazioni nella risposta del sistema misurato causate da modificazioni operative e/o ambientali, da quelle causate da danni è indicato come processo di *normalizzazione dei dati*. Ad esempio, la rigidità di un ponte può cambiare con la temperatura. Inoltre, i ponti sono suscettibili a modifiche operative come variazioni del carico dovuto al traffico. Dato che i dati di risposta del sistema sono spesso misurati a varie condizioni operative e ambientali, la capacità di normalizzare i dati diventa molto importante nel processo di identificazione del danno; senza questo, le variazioni nelle risposte misurate causate da cambiamenti nelle condizioni operative e ambientali potrebbero essere erroneamente scambiate per effetti del danno.

Oltre alla normalizzazione, è necessario effettuare la *pulizia dei dati*. Rappresenta il processo di scelta selettiva dei dati da trasmettere o da respingere nel processo di selezione degli indici di danno. Il processo di selezione dei dati è di solito basato sulla conoscenza acquisita da persone coinvolte direttamente nell'acquisizione dei dati. Ad esempio, un'ispezione del layout di prova potrebbe rilevare che un sensore è stato montato in modo non ben saldo e quindi è basata sul giudizio della persona che sta effettuando la misurazione; questa serie di dati o i dati ottenuti da questo particolare sensore potrebbero essere cancellati selettivamente da un processo di selezione delle caratteristiche. Tecniche di elaborazione del segnale come filtraggio e ricampionamento possono essere considerate anche come procedure di pulizia dei dati.

L'implementazione operativa delle tecnologie di misurazione necessarie per l'esecuzione di un monitoraggio strutturale produce una grande quantità di dati. Una *condensazione dei dati* è vantaggiosa e necessaria quando sono previsti confronti di molti set di indici ottenuti per tutta la durata della vita della struttura. Inoltre, poiché i dati saranno acquisiti per un periodo di tempo

prolungato e in condizioni operative, devono essere sviluppate consistenti tecniche di *riduzione dei dati* per preservare la sensibilità alle variazioni strutturali di interesse in presenza di variabilità ambientale e operativa.

Per poter meglio individuare fenomeni di danneggiamento è necessario effettuare la *fusione dei dati*. Con tale termine si intende il processo di combinazione delle informazioni provenienti da fonti multiple nel tentativo di migliorare la fedeltà del processo di rilevamento danni. Il processo di fusione può associare i dati provenienti da sensori dello stesso tipo distribuiti spazialmente, come un insieme di estensimetri montati su una struttura. In alternativa, tipi di dati eterogenei, tra cui misure di risposte cinematiche (per esempio le accelerazioni) insieme a misurazioni di parametri ambientali (ad esempio la temperatura) e misure di parametri operativi (per esempio il volume di traffico su un ponte) possono essere combinati per valutare la presenza o meno di danno. Chiaramente la fusione dei dati è strettamente collegata ai processi di normalizzazione, selezione e compressione dei dati.

La parte del processo di monitoraggio strutturale che indiscutibilmente riceve maggiore attenzione nella letteratura tecnica è *l'identificazione di indici* dei dati che permette di distinguere stati danneggiati e non danneggiati per le strutture di interesse ([114], [115]).

Un indice sensibile al danno viene estratto dai dati di risposta del sistema misurato e denota la presenza (o meno) di danno nella struttura. Le caratteristiche variano notevolmente nella loro complessità. Generalmente, è richiesto un certo grado di elaborazione del segnale per estrarre indici efficaci. Spesso per le misure di vibrazioni vengono registrate le serie temporali in accelerazione: si tratta, quindi, di un flusso di dati elevato. Per ridurre il numero dei dati senza compromettere il contenuto di informazioni, si può usare la serie temporale per calcolare uno spettro, da cui si possono poi estrarre informazioni sulle frequenze principali o analoghe informazioni e parametri legati allo stato del sistema. Questo specifico processo di estrazione degli indici è abbastanza tipico in quanto comporta sia l'uso di operatori matematici sia l'uso di valutazioni tecniche a priori. Un'altra utile fonte di indici diagnostici si basa sulla costruzione di un modello fisico e su analisi parametriche al variare di selezionate caratteristiche della struttura; i parametri di questi modelli o gli errori previsti associati a questi modelli diventano indici di danno. Insite in molti processi di selezione di indici sono la fusione e successiva condensazione dei dati provenienti da più sensori. Inoltre, sono utilizzate diverse forme di normalizzazione dei dati nel processo di estrazione degli indici di danno nel tentativo di separare i cambiamenti nella risposta misurata, dovuti a variazioni delle condizioni operative ed ambientali da quelli causati da danni.

La parte del processo di monitoraggio strutturale che ha senza dubbio ricevuto poca attenzione nella letteratura tecnica è lo sviluppo di *modelli statistici* per la distinzione dei valori degli indici associati a strutture integre o danneggiate. Lo sviluppo di un modello statistico consiste nell'implementazione degli algoritmi che operano sulle caratteristiche estratte per quantificare lo stato del danno della struttura. Infatti, la relazione funzionale tra le caratteristiche selezionate e lo stato di danno della struttura mediante analisi ingegneristiche e modelli fisicamente basati è spesso di difficile definizione. Perciò i modelli statistici sono derivati usando tecniche di apprendimento automatico. Per apprendimento automatico si intende l'associazione automatizzata tra alcune caratteristiche derivate da dati misurati e lo stato di danno della struttura. Se tale relazione esiste ma non è nota, il problema di apprendimento consiste nello stimare la funzione che descrive questa relazione usando dati acquisiti da test sulla struttura ("training data").

I problemi di apprendimento automatico si dividono in due classi. Se i training data provengono da classi multiple e le etichette per i dati sono note, il problema è quello di *apprendimento supervisionato*. Se i training data non hanno classi di etichette, si possono tentare solo valutazioni basate su relazioni intrinseche tra i dati: in questo caso si parla di *apprendimento non supervisionato*. L'apprendimento non supervisionato può essere usato anche per costruire un modello per una singola classe di danno che può essere poi usata per testare nuovi dati per coerenza con quella classe. Al fine di elaborare quest'ultimo punto, è utile esaminare anche altri possibili approcci al monitoraggio strutturale: gli approcci basati sulla risoluzione di un "problema inverso" e quelli "basati sui dati".

L'approccio mediante soluzione di un "problema inverso" è di solito implementato costruendo un modello "basato sulla fisica" della struttura d'interesse: è comunemente un modello agli elementi finiti (FE). Una volta che viene costruito il modello basato su una dettagliata descrizione fisica del sistema, esso viene di solito aggiornato a partire dai dati misurati sulla struttura reale. Questo aggiornamento evidenzia un punto importante: è veramente difficile costruire un accurato modello "fisicamente basato" di una struttura. L'informazione o l'intuizione risulterà inevitabilmente carente in molti settori; inoltre, alcuni aspetti risultano di difficile o comunque, non univoca modellazione. Un altro problema riguarda l'accuratezza nella valutazione delle proprietà dei materiali: questo è un problema comune per le strutture in cemento armato. La fase di aggiornamento, adatta il modello costruito in modo tale da renderlo il più aderente possibile ai dati misurati nella struttura reale. La struttura matematica per le procedure di aggiornamento è basata su strumenti di algebra lineare [116]. Dopo l'aggiornamento, si ha un modello accurato della struttura d'interesse nella sua condizione normale. Quando sono disponibili i dati da una successiva fase di monitoraggio, un ulteriore aggiornamento del modello

indicherà l'insorgere di eventuali cambiamenti strutturali la loro posizione ed estensione, pervenendo così a una diagnosi del danno.

L'approccio "basato sui dati", come suggerisce il nome, non si basa su di un modello fisico. Si stabilisce un set di dati training per tutti i possibili stati di interesse della struttura, sia sani che danneggiati, e poi si usa un modello di riconoscimento per assegnare a dati misurati nella fase di monitoraggio l'etichetta della classe diagnostica relativa. Al fine di realizzare il modello di riconoscimento, c'è bisogno di costruire un modello statistico dei dati, per esempio, caratterizzare la loro funzione di densità di probabilità. Questo approccio dipende dall'uso degli algoritmi di apprendimento automatico. In questo tipo di metodo si può ancora fare uso dei modelli fisici come mezzo per stabilire caratteristiche convenienti per l'identificazione del danno. Lo stato di danno di un sistema può in linea di principio essere identificato attraverso un processo gerarchico organizzato in cinque fasi [117]. Questo processo cerca di rispondere alle seguenti domande:

1. Vi è la presenza di danno (danno esistente)?
2. Dov'è localizzato il danno (localizzazione)?
3. Che tipo di danno è presente?
4. Quanto è grave il danno (estensione)?
5. Quanta vita utile resta (prognosi)?

Le risposte a queste domande nell'ordine presentato definiscono un livello di conoscenza crescente dello stato di danneggiamento di un'infrastruttura. Quando vengono applicati ad un metodo di apprendimento non supervisionato, i modelli statistici possono di solito essere usati per rispondere a domande riguardanti l'esistenza e a volte, ma non sempre, la localizzazione del danno. Quando vengono applicati in metodologie di apprendimento supervisionato e associati a modelli analitici, le procedure statistiche possono, in linea di principio, essere usate per determinare il tipo di danno, l'estensione del danno e la vita utile rimanente della struttura. I modelli statistici sono costruiti in modo tale da minimizzare le false diagnosi. Tali false diagnosi possono essere falso positivo, nel caso in cui vi è un'indicazione di danno anche quando questo non è presente, oppure falso negativo, quando non si ha alcuna indicazione anche in presenza di danno.

2.7.3.1 Principi fondamentali della ricognizione del danno nel monitoraggio strutturale.

Negli ultimi anni i progressi nel campo del rilevamento del danno sono il risultato dei recenti progressi tecnologici e scientifici in vari campi quali hardware, sensori, meccanica computazionale, dinamica

strutturale sperimentale, apprendimento automatico/SPR e analisi del segnale. Diversi principi fondamentali sono disponibili sulla base delle informazioni pubblicate in letteratura [118]. Questi hanno lo scopo di fornire una metodologia, a cui è necessario aggiungere un gruppo di algoritmi che porteranno il professionista del monitoraggio strutturale dai dati ad una decisione. I principi in questione sono elencati e discussi nel seguito.

1. Tutti i materiali hanno imperfezioni intrinseche o difetti.

È facile immaginare un materiale perfetto. Proprietà come la resistenza in materiali composti da cristalli perfetti risulterebbero molto superiori a quelle osservate sperimentalmente su campioni reali. La causa di questa discrepanza è rappresentata dai difetti a livello nano e microstrutturale, come vuoti, inclusioni e impurità. Ai fini ingegneristici gli effetti dei difetti a livello nano e microstrutturale sono portati in conto dalla variabilità delle proprietà dei materiali, come la tensione di snervamento, e non sono di solito considerati come "danno". Siccome tutti i materiali contengono imperfezioni o difetti, può risultare complesso decidere quando una struttura è "danneggiata". È necessario richiamare le definizioni di difetto, danno e collasso. Un "difetto" è innato nel materiale e statisticamente tutti i materiali contengono una certa quantità di difetti. Il "danno" è presente quando la struttura non opera più nella sua condizione ideale, benché possa ancora funzionare soddisfacentemente, ma forse in maniera subottimale. Il "collasso" avviene quando la struttura non può più operare in maniera soddisfacente. Se si definisce la qualità di una struttura come la sua idoneità allo scopo o come la sua abilità a soddisfare le esigenze dei clienti o degli utenti, è sufficiente definire il collasso come un cambiamento nel sistema che produce un'inaccettabile riduzione nella qualità. Dalla precedente tassonomia consegue la nozione che i difetti (che sono inevitabili nei materiali reali) conducono al danno e il danno conduce al collasso. Comunque, al fine di ottenere una struttura tollerante al danno, è necessario introdurre sistemi di monitoraggio così che si possa stabilire quando essa non sta più operando in maniera soddisfacente. Questa esigenza richiede una definizione rigorosa di collasso.

2. La valutazione del danno richiede un confronto tra lo stato di due sistemi.

Il fatto che gli algoritmi di rilevamento del danno richiedano un confronto degli stati del sistema è alla base di uno dei principali problemi del SHM. Se la condizione normale o lo stato di base cambia come risultato delle variazioni ambientali e operative, l'applicazione di un nuovo algoritmo di rilevamento può fornire un'indicazione del danno falsamente positiva.

3. L'identificazione dell'esistenza e della localizzazione del danno può essere fatta secondo modalità di apprendimento non supervisionato, ma l'identificazione del tipo di danno presente e della sua gravità può generalmente essere condotta solo in modo supervisionato.

La classificazione statistica nell'ambito del monitoraggio strutturale consiste nell'applicazione di algoritmi che, operando sugli indici di danno, quantifichino lo stato di danno della struttura. Quando i dati sono disponibili sia per la struttura danneggiata che non danneggiata, gli algoritmi di riconoscimento del modello statistico ricadono sotto la definizione generale di apprendimento supervisionato. L'apprendimento non supervisionato si riferisce ad algoritmi applicati a dati riferiti alla struttura danneggiata. Il rilevamento di danno è la principale classe di algoritmi utilizzati nelle applicazioni di apprendimento non supervisionato. Tutti gli algoritmi di classificazione analizzano distribuzioni statistiche delle caratteristiche misurate o derivate per migliorare il processo di rilevamento del danno. Quando vengono applicati in modalità di apprendimento non supervisionato, i modelli statistici possono di solito essere usati per rispondere a domande riguardanti l'esistenza e a volte la localizzazione del danno. In generale, queste procedure statistiche non possono distinguere tra tipi di danno possibile o la gravità del danno senza avere informazioni aggiuntive. Le procedure statistiche possono, in teoria, essere usate per determinare il tipo e l'estensione del danno quando sono applicate in modalità di apprendimento supervisionato e sono accoppiate a modelli o dati analitici ottenuti dalla struttura quando sono presenti tipi e livelli di danno noti. L'approccio al monitoraggio strutturale mediante aggiornamento del modello ad elementi finiti può fornire una stima dell'esistenza del danno, della localizzazione e della riduzione di rigidità associata (estensione). Comunque questo un siffatto approccio, tuttavia è solitamente limitato ai casi in cui la struttura può essere accuratamente modellata come un sistema lineare, prima e dopo il danno. Inoltre, queste procedure, non identificano il tipo di danno presente, ma assumono solo che il danno produce una riduzione locale della rigidità a livello di elementi.

4. I sensori non possono misurare il danno. L'estrazione di indici, attraverso l'elaborazione del segnale e la classificazione statistica, è necessaria per convertire i dati del sensore in informazione sul danno.

I sensori misurano la risposta di un sistema al suo input operativo, per cui non possano direttamente misurare il danno. Lo scopo è misurare una grandezza fisica che può essere funzione dello stato di danno e poi, attraverso qualche approccio di modellazione inversa determinare lo stato di danneggiamento. È necessario, quindi, determinare una funzione che correli il danno alla grandezza fisica misurata. La principale difficoltà per il monitoraggio strutturale è che la funzione è generalmente non nota dalla fisica di base e deve essere di solito dedotta dai dati. I dati in questione possono essere spesso di grandi dimensioni, difficili da maneggiare. Da un punto di vista pratico, ci sono due approcci per ricavare tale funzione. Il primo è quello di ottenere adeguate serie di dati di training. Sfortunatamente, ciò non è spesso possibile in ingegneria civile a causa delle limitazioni

sulle dimensioni e sul costo dei test. Il secondo approccio è di ridurre la dimensione dei dati ad un punto tale che i dati disponibili risultino sufficienti. Ad ogni modo, la riduzione o compressione dei dati non deve rimuovere l'influenza del danno. È necessaria l'estrazione di indici attraverso l'elaborazione del segnale e la classificazione statistica, per convertire i dati ottenuti dai sensori in informazioni sul danno.

5. Più la misurazione è sensibile al danno e più essa può risultare sensibile al mutare delle condizioni operative ed ambientali.

Gli indici derivati dai dati misurati non dipendono solo dallo stato di danno ma possono dipendere anche da variabili ambientali o operative. Il problema di apprendimento automatico è complicato dal fatto che si vuole conoscere la dipendenza dal danno nonostante il fatto che parte della variazione nella quantità misurata è probabilmente causata dalla variazione di fattori ambientali. Il problema della stima della funzione di danno si riconduce a quello di ridurre la dimensione del problema in modo da identificare una nuova funzione che dipenda dal danno, ma non dalla temperatura. Un approccio alternativo consiste nel valutare sia la dipendenza dal danno che dall'ambiente. Si tratta dunque di un apprendimento misto, in cui l'apprendimento supervisionato è usato per ottenere la dipendenza dalla temperatura mentre l'apprendimento non supervisionato è usato per rilevare il danno.

6. Le scale dimensionali e del tempo associate all'inizio e all'evoluzione del danno dettano le specifiche del sistema di monitoraggio strutturale.

Il punto 1. I ha introdotto il concetto di fattore di scala associato al danno. In termini di scale temporali, è possibile sottolineare che il danno si può accumulare per periodi di tempo anche molto lunghi (anni) o in maniera rapida per effetto di eventi eccezionali e per loro natura discreti.

Il punto 4. afferma inoltre che un sensore non può misurare il danno. Pertanto, l'obiettivo di alcuni sistemi di monitoraggio strutturale è quello di rendere la lettura del sensore quanto più possibile direttamente correlata e sensibile al danno. Allo stesso tempo occorre rendere la lettura il più indipendente possibile da tutte le altre fonti di variabilità (ambientale e operativa). Per ottenere tali risultati occorre definire opportunamente specifiche per le catene di misura di sistemi di monitoraggio. Sono quattro i fattori che influenzano la selezione dell'hardware e a cui bisogna fare riferimento per indirizzare i parametri di progetto del sistema: la scala dimensionale a cui il danno viene rilevato; la scala temporale secondo cui il danno evolve; come le condizioni operative ed ambientali influenzano il sistema di rilevamento; il costo. Una definizione preventiva di questi fattori permette al sistema di rilevamento di essere progettato in maniera efficiente.

7. C'è un trade-off tra la sensibilità ai danni di un algoritmo e la sua capacità di reiezione del rumore.

Questo principio implica che occorre ridurre il più possibile il livello di rumore nei dati misurati o nelle caratteristiche successivamente estratte. Approcci hardware e software come wavelet denoising, filtraggio analogico/digitale, o anche la semplice media consentono di migliorare la qualità dei dati.

8. L'entità del danno che può essere rilevata dai cambiamenti delle proprietà dinamiche è inversamente proporzionale al range di frequenza analizzato.

Generalmente il danno è un fenomeno locale e può non influenzare significativamente la risposta globale a bassa frequenza di una struttura. I modi globali a bassa frequenza della struttura hanno elevate lunghezze d'onda e tendono ad essere insensibili al danno locale. Nel caso di strutture di ingegneria civile, quali ad esempio i ponti sospesi, queste lunghezze d'onda possono essere dell'ordine di centinaia di metri mentre difetti come le rotture per fatica, che devono essere rilevate per assicurare il sicuro funzionamento della struttura, sono dell'ordine di centimetri. Per individuare fenomeni di danno locali occorre pertanto avere elevate frequenze di campionamento e la massima risoluzione spaziale possibile. Ciò influenza la scelta del layout di misura e dei parametri di analisi.

9. Il danno aumenta alla complessità di una struttura.

Studiare i vari indici di danno e come questi impattano sulla complessità della struttura è quanto vuole definire tale assioma. Definendo il tipo di danno d'interesse e poi identificando come esso aumenti la complessità della struttura e la risposta ad essa associata, si può iniziare a sviluppare un approccio nella selezione degli indici di danno, che meglio si adattano all'applicazione specifica.

2.7.3.2 Indici di danno e metodologie di identificazione

Gli indici sensibili al danno sono quantità estratte da misure della risposta strutturale. Essi sono usati per individuare la presenza di danno in una struttura. L'identificazione di tali indici è uno dei principali argomenti di ricerca nel campo del monitoraggio strutturale e la loro scelta opportuna può semplificare l'identificazione e quantificazione del danno.

L'*estrazione* degli indici di danno fa riferimento al processo di trasformazione dei dati misurati in forme alternative dove la correlazione con il danneggiamento è di immediata osservazione. Spesso nel monitoraggio strutturale basato sulle vibrazioni, il processo di estrazione delle caratteristiche di

danno si basa sull'interpolazione della risposta del sistema mediante particolari modelli. I parametri di tali modelli o gli errori di previsione associati a tali modelli diventano indici sensibili al danno.

La *selezione* degli indici è il processo mediante il quale si sceglie quali di questi utilizzare per la determinazione del danno. Idealmente vengono scelti quelli che sono maggiormente sensibili al danno e che non risentono di effetti dipendenti da variabilità di condizioni operative e ambientali. Tuttavia, in molti casi reali, le caratteristiche che sono sensibili al danno risultano sensibili anche a fenomeni non legati al danneggiamento. Infine, non esiste una singola caratteristica che può essere applicata ad ogni scenario di danno. Se sono possibili scenari di danno multipli, saranno necessarie differenti indici che devono essere estratti dai dati per identificare diverse tipologie di danno.

A partire dai dati misurati è possibile ricavare una serie di indici per poi essere associati a stati di danneggiamento.

Una prima analisi che è possibile effettuare è l'osservazione delle serie temporali registrate e il confronto tra quelle del sistema non danneggiato e quelle in cui è presente il danneggiamento. In Figura 100 sono riportate, a titolo di esempio, le serie temporali registrate su una colonna in cemento armato che può rappresentare una pila da ponte. La prima serie temporale fa riferimento al sistema non danneggiato, mentre le altre si riferiscono a livelli crescenti di danneggiamento. Sebbene da un'osservazione visiva delle serie temporali risulta evidente la distinzione tra struttura danneggiata e non danneggiata, valutazioni quantitative dello stato di danneggiamento sono difficili da realizzare.

In generale, dunque, è complicato valutare la dipendenza della variazione delle serie temporali da stati di danneggiamento. Una funzione comunemente usata per analizzare i segnali nel dominio della frequenza è la Power Spectra Density (PSD). Generalmente dall'analisi delle PSD è possibile osservare come la presenza di danno influenzi il contenuto in frequenza della risposta misurata. Anche se l'utilizzo degli spettri come indice di danno riduce notevolmente la dimensione dei dati, la quantità di informazione resta comunque elevata.

In conclusione, dall'analisi di questi primi indici, si può dedurre come: le analisi delle serie temporali nel dominio del tempo e nel dominio della frequenza mostrano variazioni rispetto al segnale prodotto dalla struttura non danneggiata ma, ad ogni modo, risulta difficile quantificare questi cambiamenti, per via della elevata dimensionalità. I suddetti indici, inoltre, forniscono solamente indicazioni in merito alle variazioni del sistema, ma non indicano dove si è verificato il danneggiamento, né la tipologia e l'estensione. Inoltre, occorre valutare il grado di sensibilità di tali indici alle variazioni delle condizioni operative ed ambientali. In generale, quindi, si preferisce considerare indici con

dimensionalità ridotta in modo da avere informazioni rapidamente disponibili, eseguendo una normalizzazione dei dati per minimizzare l'effetto delle variazioni ambientali ed operative [119].

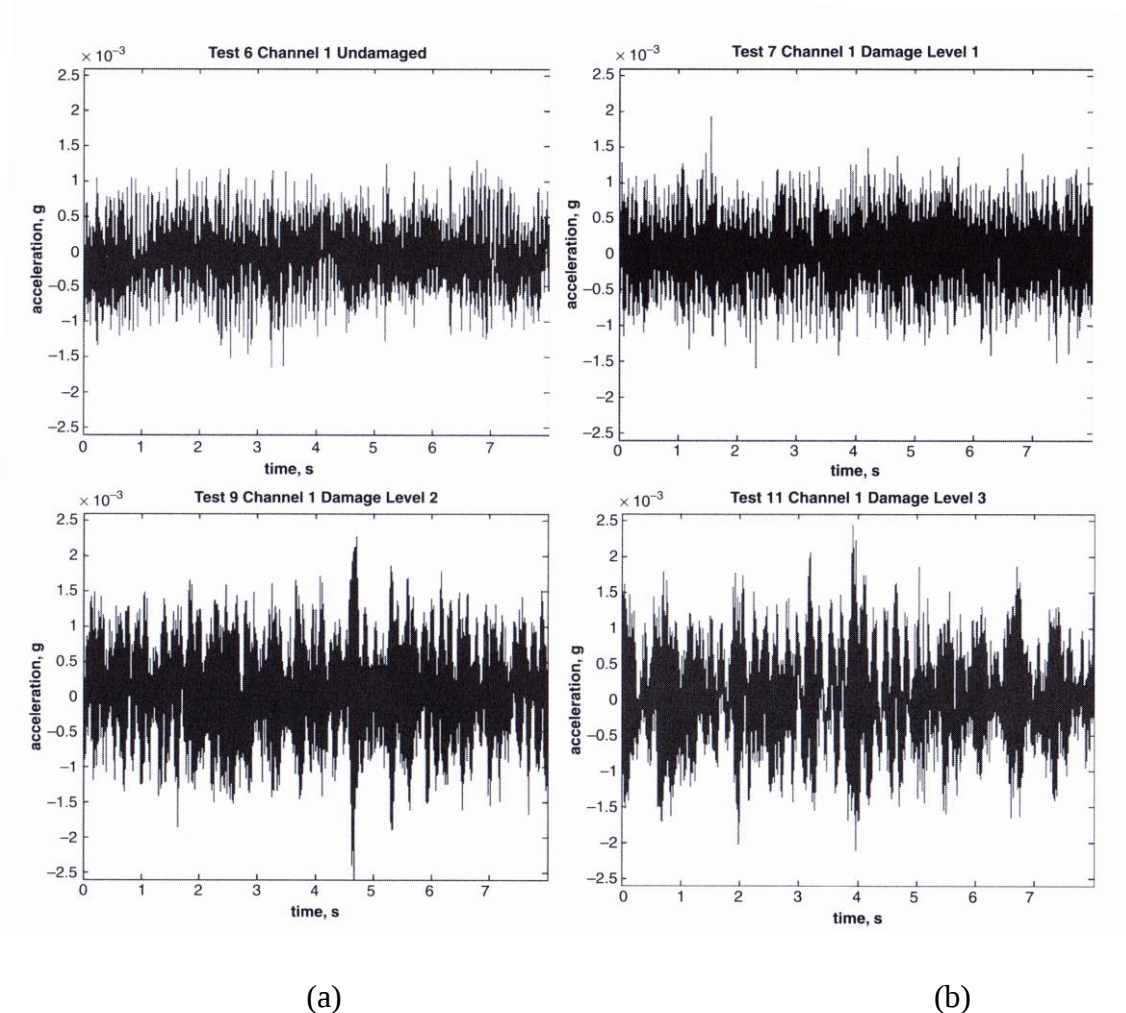


Figura 100 - Serie temporali delle accelerazioni a differenti livelli di danno [119].

Di seguito si introduce un approccio alternativo per l'estrazione degli indici, mediante i quali modelli fisici vengono calibrati a partire dai dati misurati e i parametri ottenuti da tali modelli risultano, poi, sensibili al danno. Se propriamente applicati, tali parametri permettono non solo di valutare l'esistenza e la localizzazione del danno, ma anche la sua estensione.

Le caratteristiche dinamiche della struttura (frequenze e forme modali), estratte da misure di vibrazione, vengono usate per calibrare modelli numerici. Tuttavia, quando i parametri modali sono stimati da misure della sola risposta strutturale, possono nascere problemi legati alla normalizzazione delle forme modali e alla presenza di input che eccitano la struttura in una banda in frequenza limitata.

La premessa alla base dell'utilizzo dei parametri dinamici come frequenza di risonanza e forme modali come indici del danno risiede nella tipologia di danno che può essere riscontrata. È possibile identificare il danno solamente se vi sono variazioni di rigidezza, massa o dissipazioni di energia del sistema. Sebbene l'associazione delle variazioni dinamiche con l'insorgere del danno sembri intuitiva, ci sono diversi problemi da risolvere. Tipicamente il danno è un fenomeno locale che non influenza le basse frequenze e quindi la risposta globale della struttura che generalmente viene misurata durante i test. Un'altra sfida risiede nel correlare i parametri dinamici misurati con i modelli lineari ottenuti prima e dopo il danneggiamento. Molte tipologie di danno, infatti, introducono non linearità nel sistema.

Indici di danno basati sulle proprietà dinamiche della struttura

Un sistema strutturale manifesta un'amplificazione massima della risposta quando è eccitato da un carico dinamico avente una determinata frequenza. Questa frequenza prende il nome di frequenza di risonanza della struttura ed è funzione della massa del sistema, della rigidezza, dello smorzamento e delle condizioni di vincolo. In letteratura sono presenti diversi tentativi di associare le variazioni di frequenza all'insorgenza del danno [120]. Considerando un sistema privo di smorzamento, la frequenza naturale del sistema danneggiato e quella del sistema non danneggiato possono essere scritte come:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (48)$$

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k_d}{m}} \quad (49)$$

dove: ω_n e ω_d sono le frequenze naturali del sistema non danneggiato e del sistema danneggiato; k e k_d sono la rigidezza del sistema non danneggiato e del sistema danneggiato; m è la massa del sistema. Stimate le frequenze di risonanza del sistema danneggiato e di quello non danneggiato, e assunto che la rigidezza del sistema danneggiato sia minore di quella del sistema non danneggiato, la rigidezza del sistema danneggiato può essere ricavata come:

$$k_d = (\sqrt{k} - \Delta\omega\sqrt{m})^2 \quad (50)$$

dove: $\Delta\omega = \omega_n - \omega_d$ è la variazione della frequenza naturale dei due sistemi. Quindi, il danno all'interno di una struttura si manifesta essenzialmente come riduzione della rigidezza iniziale del sistema. Estendendo tali considerazioni ai sistemi a n gradi di libertà è possibile identificare il danno, localizzarlo e quantificare la variazione di rigidezza. La riduzione di rigidezza di ogni grado di libertà, causata dal danneggiamento, può essere quantificata quando si ha a disposizione un numero di frequenze pari al numero di gradi di libertà. Pertanto, non è sempre possibile determinare univocamente tutte le rigidezze del sistema. Il metodo sopra descritto è un approccio inverso che utilizza la variazione di frequenza come indice di danno, dove:

$$\Delta k = f^{-1}(\Delta\omega) \quad (51)$$

Il problema inverso si riferisce ad una classe generale di problemi dove i parametri del sistema sono stimati da quantità misurate. Questi problemi spesso non sono risolvibili direttamente come fatto in precedenza, poiché il numero dei parametri incogniti eccede quello delle quantità misurabili. La frequenza di risonanza può, però, essere usata come indice di danno in approcci avanzati per l'identificazione del danno stesso; poiché:

$$\Delta\omega = f(\Delta k) \quad (52)$$

L'approccio avanzato consiste nel calcolare la variazione di frequenza per un atteso tipo di danneggiamento. La tipologia di danno, la sua localizzazione ed estensione sono modellate matematicamente. La variazione in frequenza misurata viene confrontata con la variazione in frequenza prevista per quella tipologia di danno. Se la variazione in frequenza misurata corrisponde a quella prevista dal danneggiamento simulato, allora tale danno è presente all'interno della struttura. Alla base dell'utilizzo di tale approccio è necessario fare delle assunzioni: (i) la tipologia di danno introdotta nel modello è l'unica che può causare la variazione della frequenza di vibrazione del sistema; (ii) vi è una corrispondenza uno ad uno tra il danno e la variazione di frequenza.

Sebbene tale approccio in teoria possa essere utilizzato, in linea di principio, anche per localizzare e quantificare il danno, nelle pratiche applicazioni esso consente al più di stabilire la presenza del danno.

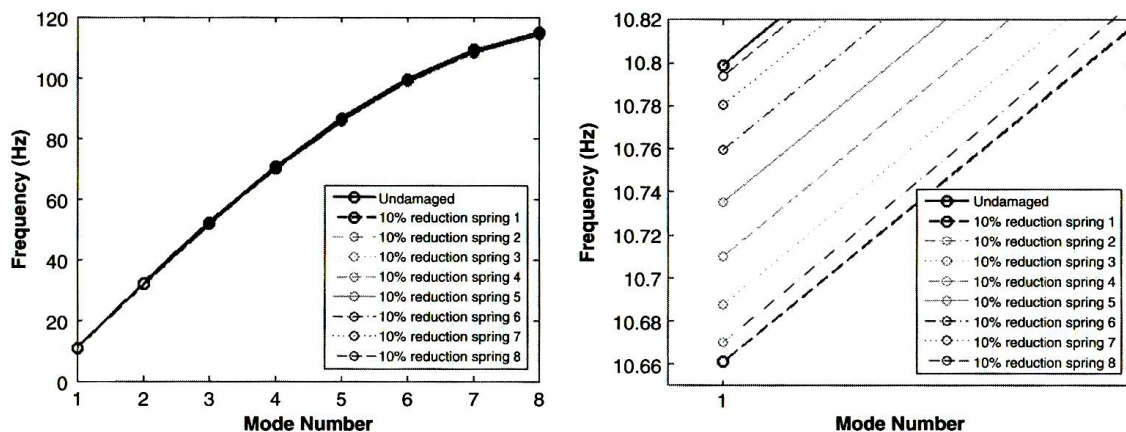


Figura 101 - Frequenze di risonanza per gli 8 modi di un sistema ad 8 GDL e i relativi cambiamenti delle frequenze di risonanza per ogni riduzione di rigidezza di ciascuna molla. Sulla destra vi è un ingrandimento della variazione in frequenza [119]

L'identificazione del danno dalle variazioni di frequenza ha limitazioni pratiche in molti casi reali. Una prima problematica risiede nella bassa sensibilità al danno delle basse frequenze associate ai modi globali della struttura. Questa scarsa sensibilità è illustrata in Figura 101, dove sono riportate le 8 frequenze di vibrazione di un sistema a 8 gradi di libertà e a cui è applicata una riduzione di rigidezza del 10% ad ogni molla del sistema. Si riscontra una variazione di frequenza di 0.13 Hz pari all'1.28% per una riduzione di rigidezza del 10%. È evidente, dunque, come sia necessaria una stima molto accurata della frequenza per valutare l'insorgere del danno. Essendo la frequenza di risonanza una proprietà globale della struttura, non è possibile localizzare il danno, ma solamente individuarne la presenza. Un'eccezione a tale limitazione la si riscontra, invece, alle alte frequenze di risonanza a cui sono associati modi locali. In ogni modo, quando si rileva un cambiamento nella frequenza di risonanza ($\delta\omega$) ne deriva da una variazione di rigidezza (δk), come dimostrato dalla seguente relazione, da cui è possibile notare che, ad elevate frequenze, per produrre una variazione consistente in frequenza è necessaria una notevole variazione di rigidezza. L'identificazione di modi locali ad elevate frequenze, d'altro canto, comporta la necessità di installare un numero elevato di sensori; inoltre, spesso risulta difficile avere eccitazione sufficiente a frequenze elevate.

$$\omega = \frac{d\omega}{dk} \delta k = \frac{1}{2\sqrt{km}} \delta k = \frac{1}{2m\omega} \delta k \quad (53)$$

Come già osservato in precedenza, le forme modali possono essere utilizzate come indice di danno. Queste forniscono un'informazione distribuita sulla risposta dinamica della struttura e quindi offrono la possibilità di valutare l'esistenza e la localizzazione del danno. In primo luogo, nel caso di misure ad input noto, è possibile ottenere le forme modali normalizzate rispetto alla massa. Non è possibile, invece, ottenere informazioni sulla massa modale quando si ricavano forme modali a partire dalla sola risposta della struttura. Inoltre, assumere lo smorzamento proporzionale non è realistico rispetto ai meccanismi di dissipazione di energia presenti nelle strutture. È stato dimostrato che per bassi valori di smorzamento l'ipotesi di smorzamento proporzionale non si discosta dal caso reale. Se la struttura presenta un alto livello di smorzamento, tuttavia, si manifestano forme modali complesse dove il rapporto tra gli spostamenti non si mantiene costante nel tempo. La possibilità di identificare il danno a partire dalle forme modali dipende da dove esso è localizzato e dalla forma modale che si sta considerando.

Altro indice che può essere utilizzato per l'identificazione del danno è il MAC (Modal Assurance Criteria). Esso rappresenta un indice di correlazione tra due forme modali ed è definito come:

$$\text{MAC}\{\psi\}_x, \{\psi\}_y = \frac{|\{\psi\}_x^H \{\psi\}_y|^2}{(\{\psi\}_x^H \{\psi\}_x)(\{\psi\}_y^T \{\psi\}_y)} \quad (54)$$

dove $\{\psi\}_x$ e $\{\psi\}_y$ sono due vettori delle forme modali. L'indice MAC può assumere valori compresi tra 0 e 1. Il MAC tra due vettori che hanno una relazione lineare è prossimo a uno, mentre se i vettori sono linearmente indipendenti è prossimo a zero. Effettuando il confronto tra tutte le forme modali si ottiene la matrice dei MAC. Si può facilmente notare come il MAC rappresenti una significativa compressione dei dati: infatti, esso riduce il confronto tra due forme modali ad uno scalare. Con questa notevole compressione si ha, tuttavia, una minore sensibilità all'identificazione dei piccoli cambiamenti nelle forme modali. Per l'identificazione di danneggiamenti utilizzando l'indice MAC è necessario effettuare il confronto tra le forme modali prima e dopo il danneggiamento. Se il danno

non ha prodotto variazione nelle forme modali, la matrice dei MAC coincide con buona approssimazione con la matrice identità.

Attraverso la valutazione dei MAC non si riesce ad avere informazioni sulla localizzazione del danno. Questo problema può essere risolto utilizzando l'indice COMAC (Coordinate Modal Assurance Criterion). Per N coppie di vettori modali, $\{\psi\}_x$ e $\{\psi\}_y$, l'indice COMAC per il grado di libertà p è definito come:

$$\text{COMAC}(\{\psi\}_{x_p}, \{\psi\}_{y_p}) = \frac{|\sum_{r=1}^N \psi_{xpr} \psi_{ypr}|^2}{\sum_{r=1}^N \psi_{xpr} \psi_{xpr}^* \sum_{r=1}^N \psi_{ypr} \psi_{ypr}^*} \quad (55)$$

dove il pedice i fa riferimento all' i -esima forma modale. A differenza del MAC, l'indice COMAC viene valutato in corrispondenza di ogni grado di libertà misurato e risulta sensibile alle variazioni di ampiezza. Quindi, se risultano variazioni di tale indice è possibile localizzare la posizione del danno.

I progressi della ricerca nell'ambito del monitoraggio strutturale hanno portato allo sviluppo di indici di danno alternativi derivati dalle proprietà dinamiche della struttura. In molti casi tali indici sono ottenuti da interpretazioni fisiche circa gli effetti delle variazioni delle proprietà strutturali sui parametri modali. Per le strutture che manifestano un comportamento flessionale, un'alternativa all'uso delle forme modali per l'identificazione del danno è rappresentata dalla derivata delle forme modali, la curvatura. La derivazione ha l'effetto di amplificare ogni discontinuità nelle forme modali causate dalla presenza di danno localizzato. Prendendo in considerazione una forma modale di una struttura danneggiata e non danneggiata e considerando una sezione x soggetta ad un momento flessionale $M(x)$, la curvatura in x è data da:

$$v''(x) \approx \frac{M(x)}{EI} \quad (56)$$

dove E è il modulo di Young e I il momento d'inerzia della sezione. Da tale equazione è evidente come la curvatura è inversamente proporzionale alla rigidezza flessionale EI . Per un dato momento applicato alla struttura danneggiata e a quella non danneggiata, una riduzione di rigidezza associata ad uno stato di danneggiamento comporta un aumento di curvatura. Quindi, nota la sezione trasversale

dell'elemento è possibile identificare il danno a partire dalla variazione della curvatura modale. Per un elemento trave del quale è stata individuata la forma modale mediante una misurazione discreta in punti equamente distribuiti e posti ad una distanza h , la curvatura modale può essere ricavata utilizzando il metodo alle differenze centrali alla derivata seconda dell' i -esimo grado di libertà, come:

$$v''(\psi_i) \approx \frac{\psi_{i-1} - 2\psi_i + \psi_{i+1}}{h^2} \quad (57)$$

Un'alternativa all'applicazione del metodo alle differenze centrali (Eq. (57)) per la stima della curvatura consiste nell'interpolare gli spostamenti modali misurati attraverso una funzione di forma della quale calcolare la derivata. In questo modo si ottiene una curvatura continua lungo tutto l'elemento. Effettuando la differenza in termini assoluti tra le curvature prima e dopo il danneggiamento per ciascuna forma modale e sommando le differenze tra più forme modali, è possibile individuare e localizzare il danno. Per ottenere questo risultato, le forme modali scelte devono essere sensibili al danneggiamento. L'utilizzo di una funzione interpolante prima di stimare la curvatura può, inoltre, mascherare il danno, in quanto essa tende a smussare la forma reale.

2.7.4 Procedure di identificazione dinamica automatica

I sistemi di monitoraggio basati sulle vibrazioni sono usati sia per monitoraggi di lungo termine, per verificare la capacità della struttura di garantire le prestazioni di progetto anche in presenza di naturali fenomeni di invecchiamento e degrado, sia per una rapida valutazione delle condizioni di salute delle strutture a seguito di eventi calamitosi di origine naturale o antropica. Per poter sfruttare i vantaggi legati ai più recenti progressi tecnologici per quanto riguarda i sistemi di misura, i dati acquisiti devono essere continuamente ed automaticamente elaborati al fine di estrarre gli indici di danno. Le variazioni delle stime sperimentali delle proprietà modali e di alcune grandezze derivate (ad esempio, la curvatura modale [119]) sono gli indici di danno tipicamente adottati per l'identificazione del danno. Gli indici di danno, tuttavia, tipicamente risentono degli effetti di fattori ambientali e operativi (temperatura, umidità, livello di vibrazione, etc.). Tali effetti devono pertanto essere opportunamente quantificati e le stime sperimentali devono essere depurate da tali effetti (si veda il paragrafo 2.7.6). Il monitoraggio continuo rappresenta, dunque, la sola strategia possibile per quantificare tali effetti e distinguerli dalle variazioni indotte da danno e/o degrado. L'applicazione estensiva delle tecniche di identificazione del danno basate sui parametri modali non può, pertanto, prescindere dalla

disponibilità di robuste e accurate procedure di identificazione dinamica automatica. Di qui gli intensi sforzi del mondo accademico in questo settore.

Le prime analisi e classificazioni sistematiche delle procedure automatiche di identificazione dinamica output-only sono piuttosto recenti ([121], [122]). In particolare, è stata proposta una chiara distinzione tra identificazione automatica e tracciamento dei parametri modali. Nel primo caso è sufficiente una singola registrazione per estrarre i parametri modali in assenza di informazioni a-priori sulle proprietà dinamiche della struttura oggetto di indagine [123].; nel secondo caso, invece, l'osservazione nel tempo dell'evoluzione dei parametri modali della struttura si basa su un insieme di stime di riferimento [124]. I parametri modali di riferimento possono essere forniti sia da procedure manuali sia da algoritmi automatici di identificazione dinamica. A dispetto della loro minore autonomia, le procedure di tracciamento dei parametri modali risultano vantaggiose rispetto alle procedure di identificazione dinamica automatica per tutte quelle applicazioni che richiedono tempi di risposta ridotti e bassi oneri computazionali. Le tecniche di identificazione dinamica automatica, d'altro canto, sono l'unica opzione possibile quando non sono disponibili stime di riferimento dei parametri modali. L'efficacia delle procedure di identificazione del danno dipende dall'accuratezza delle stime dei parametri modali. Tuttavia, la maggior parte degli algoritmi di identificazione dinamica automatica disponibili mostra limiti comuni [121] che influiscono negativamente sulla qualità delle stime. Le principali cause di inaccuratezze sono legate all'uso di soglie impostate staticamente e di parametri che richiedono una calibrazione preliminare [121]. Un primo approccio in grado di superare questi limiti e sufficientemente robusto in presenza di rumore di misura è descritto in [121]. Tuttavia, nel caso di modi debolmente eccitati o in presenza di elevati livelli di rumore, una stima affidabile richiede registrazioni molto lunghe con conseguente incremento degli oneri computazionali e dei tempi di risposta. Il presente rapporto descrive, invece, le analisi condotte su un innovativo algoritmo ibrido per l'identificazione dinamica automatica nelle condizioni operative. Tale algoritmo è stato sviluppato in modo da:

- fornire stime accurate e precise dei parametri modali, incluso il rapporto di smorzamento;
- non richiedere la calibrazione iniziale di parametri di analisi il cui valore dipende dall'applicazione;
- garantire un'elevata robustezza rispetto a problemi di falsa o mancata identificazione;
- consentire un'efficace controllo degli oneri di calcolo.

Il rapporto descrive brevemente la procedura, sottolineandone gli aspetti di novità nel panorama scientifico. Successivamente ne analizza le prestazioni in diverse condizioni per quanto riguarda il rapporto-segnale rumore e il livello di smorzamento sulla base di registrazioni reali e simulate, in

modo da valutarne le prospettive applicative per il monitoraggio dinamico in continuo di strutture civili.

2.7.4.1 Identificazione dinamica automatica

Numerosi approcci per l'identificazione dinamica automatica sono attualmente disponibili in letteratura. Alcuni di essi si basano su metodi parametrici ([125], [126]) mentre altri sono stati sviluppati a partire da metodi di tipo non parametrico ([121], [127]). L'automazione dei metodi parametrici ha seguito tre direttrici principali:

1. sviluppo di algoritmi di identificazione in grado di produrre diagrammi di stabilizzazione estremamente semplici di interpretare ([128], [129]);
2. definizione di criteri e parametri funzionali a distinguere i poli fisici da quelli spuri ([130], [131]);
3. sviluppo di metodologie per l'interpretazione automatica dei diagrammi di stabilizzazione ([125], [132], [133]);

L'approccio considerato nel presente rapporto segue tutte e tre queste linee guida di fatto complementari. In particolare, combinando step di analisi relativi a differenti metodologie consolidate di analisi modale output-only e sfruttando i risultati di specifiche indagini sulle performance di tali metodi, tale approccio consente di semplificare l'interpretazione dei diagrammi di stabilizzazione e l'identificazione dei modi strutturali. Gli algoritmi attualmente disponibili violano almeno una delle quattro condizioni di progetto alla base dello sviluppo della procedura qui descritta. Infatti, con poche eccezioni, gli algoritmi di identificazione automatica disponibili in letteratura richiedono una calibrazione preliminare di soglie e parametri di analisi. Inoltre, non sempre risultano ottimizzati dal punto di vista della robustezza in presenza di condizioni ambientali e operative variabili, del controllo degli oneri computazionali e dell'affidabilità delle stime. Gli algoritmi esistenti di identificazione dinamica automatica spesso sottovalutano l'importanza di stime accurate e affidabili dei rapporti di smorzamento. La maggiore variabilità delle stime di smorzamento rispetto a quelle di frequenze naturali e forme modali è ben documentata in letteratura. Sebbene essa sia dovuta in parte a intrinseci limiti degli stimatori adottati, l'impiego di appropriate procedure di elaborazione dati consente di minimizzare l'errore di stima e di migliorare l'affidabilità dei risultati. La quantificazione e il controllo dell'accuratezza delle stime dei parametri modali sono fondamentali per numerose applicazioni e, in particolare, per l'identificazione del danno. Numerosi studi hanno dimostrato come le stime prodotte da metodi parametrici siano di gran lunga più accurate rispetto a quelle fornite da metodi non parametrici ([125], [134]). Tuttavia, a causa delle difficoltà legate alla previsione dell'ordine del modello che meglio interpola i dati sperimentali e più accuratamente caratterizza il

comportamento dinamico della struttura, nelle pratiche applicazioni viene comunemente adottato un approccio conservativo. Esso si basa sulla sovrastima dell'ordine del modello, che viene definito in maniera tale da assicurare l'identificazione di tutti i modi fisici nell'intervallo di frequenze investigato. L'entità della sovrastima dipende dalle caratteristiche dei dati analizzati. In ogni caso, essa introduce poli spuri che devono essere opportunamente identificati e separati da quelli fisici. Ciò rende la stima delle proprietà dinamiche mediante tecniche di tipo parametrico particolarmente complessa. La distinzione dei poli fisici da quelli spuri è solitamente effettuata con l'ausilio del diagramma di stabilizzazione, che mostra i poli ottenuti per differenti ordini del modello in funzione della frequenza naturale corrispondente. Analizzando l'evoluzione dei poli per crescenti ordini del modello, i modi fisici possono essere identificati come allineamenti di poli stabili, in quanto i poli spuri tendono ad essere caratterizzati da una maggiore variabilità e tipicamente non si stabilizzano. Gli allineamenti di poli stabili, tuttavia, possono iniziare per valori maggiori o minori dell'ordine del modello a seconda del livello di eccitazione del modo considerato.

L'interpretazione automatica dei diagrammi di stabilizzazione è abbastanza complessa. Infatti, per un dato algoritmo di identificazione, la qualità del diagramma di stabilizzazione dipende da diversi parametri e soglie la cui impostazione varia da dataset a dataset. Tale circostanza evidenzia il ruolo primario del giudizio esperto nell'analisi dei dati e le conseguenti difficoltà di automazione. Numerose ricerche sono state condotte con l'obiettivo di automatizzare il processo di interpretazione dei diagrammi di stabilizzazione. Sfortunatamente, molti di questi approcci si basano sulla definizione mediante calibrazione preliminare di soglie e parametri di analisi [135]. La calibrazione preliminare, infatti, può rivelarsi inadeguata a monitorare le naturali variazioni dei parametri modali indotte dal danno o da fattori ambientali. Alcuni autori, pertanto, hanno preferito concentrare i loro sforzi sui metodi che consentono di ottenere il massimo di informazione da un dato diagramma di stabilizzazione piuttosto che ottimizzarne la qualità mediante un'opportuna impostazione dei parametri di analisi ([125], [133]). Tuttavia, ciò determina approcci solitamente abbastanza complessi che richiedono la valutazione di un gran numero di parametri aggiuntivi e l'applicazione di diversi criteri di validazione [125].

Poiché i poli in un diagramma di stabilizzazione sono etichettati come fisici se mostrano simili proprietà, l'uso di strategie di analisi basate su tecniche di clustering ([125], [132]) probabilmente rappresenta l'opzione più naturale per l'identificazione automatica dei poli fisici. Le tecniche di clustering, infatti, raggruppano i dati sulla base delle loro caratteristiche. Tali tecniche possono essere classificate nelle due grandi categorie dei metodi gerarchici agglomerativi e dei metodi partitivi. I primi procedono considerando ogni oggetto come un cluster e successivamente li aggregano in cluster

via via più grandi sulla base di una data misura di distanza. L'insieme finale dei cluster risultanti dipende dalla regola definita per interrompere l'albero gerarchico a un certo livello. La necessità di impostare tale soglia rappresenta una delle principali controindicazioni all'impiego del clustering gerarchico per l'automazione delle procedure di identificazione dinamica output-only. I metodi partitivi, invece, dividono l'insieme degli oggetti in un assegnato numero di cluster. Ciascun cluster è caratterizzato dal proprio centroide. Gli oggetti sono assegnati ai cluster sulla base di un algoritmo iterativo che minimizza la distanza tra gli oggetti appartenenti a uno stesso cluster e massimizza quella tra gli oggetti appartenenti a cluster differenti. L'algoritmo K-means, che produce oggetti mutuamente esclusivi, e quello C-means, che produce cluster parzialmente sovrapposti, sono esempi di tecniche appartenenti a questa classe. Anche l'impiego di questi algoritmi per l'automazione delle tecniche di identificazione dinamica output-only presenta degli svantaggi. Infatti, il numero di cluster è definito dall'utente; inoltre, un'intelligente applicazione delle tecniche è necessaria per evitare soluzioni sub-ottimali [136].

2.7.4.2 L'algoritmo per l'identificazione dinamica automatica

L'algoritmo di identificazione dinamica automatica considerato, denominato nel seguito ARES (Automated modal paRameter Extraction System) per brevità, è un algoritmo ibrido in quanto combina step di analisi relativi a differenti metodi di identificazione dinamica output-only. L'algoritmo può essere sintetizzato come segue.

Le funzioni di auto- e cross-correlazione sono calcolate a differenti ritardi e organizzate in matrici. Si procede, quindi, a una normalizzazione dei dati e all'applicazione di una procedura di Joint Approximate Diagonalization delle matrici di correlazione a differenti ritardi. La diagonalizzazione congiunta si basa su un algoritmo numerico [137] e consente di stimare le funzioni di correlazione ($q=1, \dots, N_m$) di N_m risposte modali alle vibrazioni random [138]. L'algoritmo richiede la definizione del numero p di matrici da diagonalizzare e della soglia t per l'interruzione della procedura di diagonalizzazione. Nella pratica, il numero di modi da identificare non è noto a priori. Se il numero di funzioni di correlazione l è maggiore del numero di modi, alcune funzioni non conterranno informazioni fisiche ma solo rumore. In caso contrario, alcuni modi non potranno essere identificati, a meno di reiterare l'applicazione della procedura a differenti e più ristretti intervalli di frequenza. Nella pratica, la situazione è resa ancor più complessa dal fatto che, in funzione del rapporto segnale-rumore (SNR) e della disposizione dei sensori [138], le funzioni di correlazione ottenute possono essere caratterizzate dal contributo di un unico modo, o dalla presenza di un modo dominante a cui si sovrappongono contributi di altri modi o rumore, o ancora dalla presenza di solo rumore.

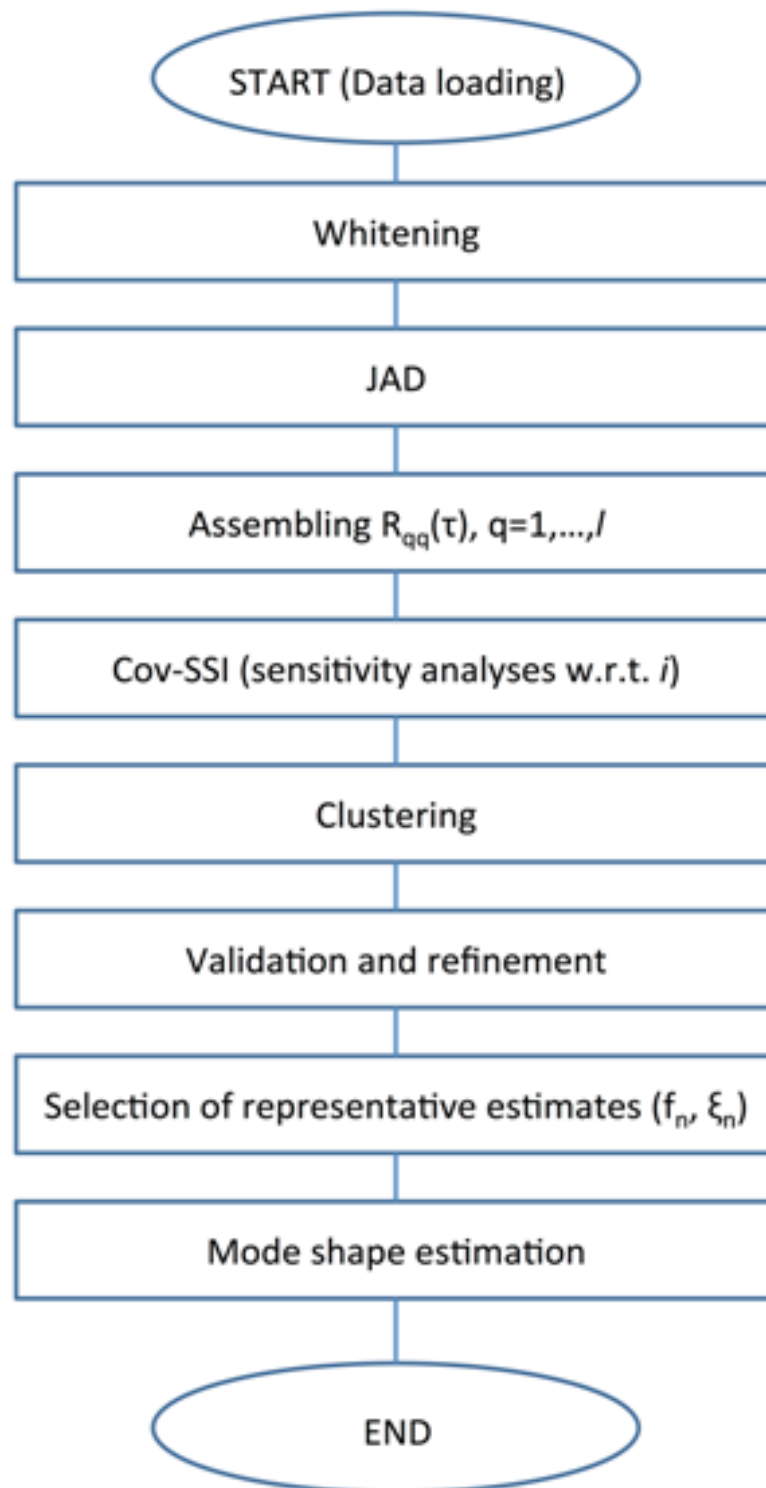


Figura 102 - Flowchart di ARES

Le funzioni di correlazione sono singolarmente analizzate mediante Covariance Driven Stochastic Subspace Identification (Cov-SSI) ([139], [140]) per la stima di frequenze naturali e rapporti di smorzamento. Il processo di stima richiede la definizione di due parametri: il numero di ritardi i considerati nella costruzione della matrice di Toeplitz delle correlazioni, e il massimo ordine del modello n_{max} considerato nella costruzione del diagramma di stabilizzazione. Poiché, per un dato valore di n_{max} , la qualità del diagramma di stabilizzazione inizialmente migliora e successivamente peggiora all'aumentare di i , è possibile identificare il valore di i che minimizza la variabilità delle stime ottenute a differenti ordini del modello mediante un'analisi di sensibilità ([141]). Per ciascun valore di i e ciascuna funzione di autocorrelazione, l'applicazione ripetuta di Cov-SSI fornisce un insieme di poli. L'applicazione di tecniche di clustering gerarchico consente la separazione dei poli fisici da quelli spuri. La soglia è automaticamente impostata sulla base delle dimensioni del dendrogramma, e il cluster caratterizzato dal maggior numero di elementi viene selezionato come rappresentativo di un possibile modo. In questo modo è possibile associare a ciascun valore di i e a ciascuna funzione di correlazione le relative stime di frequenza naturale e rapporto di smorzamento. In particolare, si associa a ciascun valore di i il valore medio e la deviazione standard delle stime raggruppate nel cluster selezionato. Una volta che un insieme di possibili modi è stato identificato, si applicano opportuni criteri di validazione per eliminare eventuali stime non fisiche, quali quelle associate a funzioni di correlazione che non contengono informazioni modali. Poiché nelle condizioni operative le strutture sono strettamente stabili, un primo controllo riguarda il segno dello smorzamento, che deve essere positivo. Inoltre, poiché strutture molto smorzate si incontrano raramente nella pratica, è possibile definire un limite superiore per le stime di smorzamento, ad esempio 10%. Inoltre, poiché i poli fisici sono caratterizzati da minore variabilità (10-100 volte più piccola) rispetto a quelli spuri, l'adozione di un limite del 10% per il coefficiente di variazione delle stime dei parametri modali contenute nel cluster selezionato consente di eliminare cluster contenenti poli non fisici.

Dopo la fase di validazione, l'algoritmo K-means con $K=2$ è applicato per raffinare ulteriormente le stime. Le stime definitive di frequenza naturale e rapporto di smorzamento per ciascun modo saranno quelle caratterizzate dalla minima varianza al variare di i . Le forme modali sono stimate mediante decomposizione ai valori singolari delle matrici di densità spettrale di potenza calcolate a valori di frequenza corrispondenti alle frequenze naturali precedentemente stimate. A causa dei limiti sul numero di modi identificabili in un dato intervallo di frequenze, ARES può essere classificato come metodo "low-order" per l'identificazione automatica dei parametri modali.

2.7.4.3 Analisi comparativa delle prestazioni

Le prestazioni di ARES sono state analizzate innanzitutto per confronto con i risultati ottenuti dall'analisi in maniera indipendente di registrazioni della risposta alle vibrazioni ambientali di due strutture reali. I dati sono stati analizzati in un caso mediante procedure manuali di identificazione dinamica output-only, nell'altro mediante un differente algoritmo automatico di identificazione dinamica output-only sviluppato a partire da un consolidato metodo non parametrico per l'analisi modale in condizioni operative: la Frequency Domain Decomposition [142]. Nel primo caso, sono state esaminate le prestazioni di ARES nell'identificazione dei modi fondamentali, nel secondo caso, invece, sono state messe a confronto le prestazioni nell'identificazione sia dei modi fondamentali che dei modi superiori. Le registrazioni erano riferite, rispettivamente, a una struttura intelaiata in cemento armato caratterizzata da modi ben separati, e ad una struttura (sempre in cemento armato) caratterizzata da due modi vicini. Maggiori dettagli relativi ai casi studio considerati sono reperibili in letteratura ([122], [143]). Le misure, di discreta qualità, sono state ottenute mediante catene di misura basate sull'impiego di accelerometri a bilanciamento di forza ad elevata sensibilità, e di sistemi di acquisizione a 24 bit. Le registrazioni, inizialmente campionate a 100 Hz, sono state decimate di un fattore 10 prima di essere elaborate. Nel primo caso, le stime di riferimento sono state ottenute applicando il classico metodo Cov-SSI [141], mentre nel secondo caso, le stime di riferimento sono state prodotte dall'algoritmo di identificazione dinamica automatica noto come LEONIDA [123]. Esso rappresenta il primo esempio riportato in letteratura di algoritmo in grado di produrre automaticamente stime dei parametri modali senza richiedere la calibrazione di parametri di analisi dipendenti dall'applicazione. Sulla base di alcune considerazioni sulla struttura della matrice delle densità spettrali di potenza degli output, LEONIDA identifica la banda dei modi strutturali e, all'interno di queste, procede alla stima dei parametri modali. Le analisi condotte hanno evidenziato come l'accuratezza dei risultati di ARES sia sostanzialmente indipendente, entro certi limiti, dai valori impostati per il numero p di matrici di correlazione che devono essere congiuntamente diagonalizzate e per la soglia t che determina l'uscita dalla procedura di JAD. Gli oneri computazionali aumentano all'aumentare di p e al ridursi di t .

In maniera simile a quanto operato da altre procedure automatiche di identificazione dinamica basate su Cov-SSI, l'impiego di tecniche di clustering rende possibile l'interpretazione automatica dei diagrammi di stabilizzazione e la conseguente selezione dei soli poli fisici. Tuttavia, in ARES l'interpretazione dei diagrammi di stabilizzazione è semplificata dalla presenza di un solo modo dominante. Rispetto al caso dell'analisi di serie temporali multivariate, il vantaggio concreto legato all'identificazione di un singolo modo risiede nel fatto che, in presenza di più modi, questi non stabilizzano tutti allo stesso ordine del modello. Modi caratterizzati da differente energia stabilizzano

a diversi valori dell'ordine del modello, e ciò rende complessa la loro identificazione in simultanea, anche perché il numero di allineamenti e, dunque, di modi non è noto né può essere previsto con esattezza. In aggiunta, la stabilizzazione a differenti ordini del modello non consente di caratterizzare come stabili gli allineamenti sulla base del numero di poli che li compongono. L'interpretazione mediante tecniche di clustering dei diagrammi di stabilizzazione ottenuti dall'analisi di serie temporali multivariate che includono informazioni su più modi fornisce, dunque, risultati estremamente sensibili al livello di eccitazione dei modi e ai parametri di analisi adottati [135]. L'esecuzione di analisi di sensibilità rispetto a $\mathbf{i}$ in ARES ha, inoltre, il vantaggio di ottimizzare l'accuratezza delle stime e la robustezza del metodo, oltre che di fornire una quantificazione della precisione delle stime stesse. Il principale limite di ARES sembra risiedere nella limitata capacità di separare i contributi modali nel caso di modi molto vicini o ripetuti (fattore di sovrapposizione modale superiore al 65% [144]).

2.7.5 I metodi di identificazione del danno

Gran parte dei metodi di identificazione del danno strutturale proposti in letteratura sono basati sul confronto tra la configurazione integra e quella danneggiata: i diversi modi per condurre tale confronto hanno portato ad una serie di approcci differenti di cui i riferimenti ([145]-[147]) riportano uno stato dell'arte completo. Un certo numero di metodi è basato sulla calibrazione di un modello numerico e suo successivo aggiornamento effettuato modificando i valori di alcuni parametri in modo da minimizzare lo scarto tra la risposta della struttura e quella del modello. In questo caso l'identificazione del danno è affrontata come un problema di ottimizzazione in cui i valori dei parametri di danno quelli che minimizzano una certa funzione obiettivo [148]. Il principale inconveniente di questa famiglia di metodi è la necessità di un accurato modello numerico tridimensionale che, per la gran parte delle strutture, comporta un notevole onere computazionale e può essere difficile da costruire con i dati a disposizione. Inoltre, l'aggiornamento del modello di solito richiede un certo tempo, quindi, viene eseguito "off line", rallentando il processo di rilevamento danni.

Lo stesso inconveniente, che deriva dalla necessità di un modello numerico dettagliato, affligge approcci basati su reti neurali ([149], [150]), che vengono 'allenate' utilizzando i dati relativi alla struttura integra e successivamente alimentate con lo stesso input della struttura reale. La differenza tra la risposta del sistema reale e della rete neurale allo stesso input è assunta come misura del danno alla struttura. Questi metodi richiedono rilevanti quantità di dati, provenienti da svariati scenari di danno, per addestrare la rete e dato che per la maggior parte delle strutture questi dati non sono

disponibili, le reti devono essere formate usando dettagliati (e pertanto onerosi) modelli numerici dell'edificio.

Un approccio diverso e molto diffuso al problema dell'identificazione del danno si basa sull'analisi delle variazioni delle caratteristiche modali tra la struttura originaria e quella (presumibilmente) danneggiata ([151]-[153]). A tal riguardo, metodi basati su variazioni di frequenza possono essere applicate in modo affidabile per rilevare l'esistenza di uno stato di degrado strutturale ma difficilmente forniscono informazioni sulla posizione del danno. Per quest'ultimo scopo sono più efficaci i metodi basati sull'analisi delle variazioni delle forme modali o delle loro derivate. Tuttavia, numerosi autori hanno fatto notare come i parametri modali da soli non siano stimatori robusti del danno in quanto sensibili sia agli errori introdotti dal processo necessario per la loro estrazione dai dati registrati sulla struttura, sia al rumore presente nei dati registrati.

Per superare alcuni di questi problemi in letteratura sono stati proposti metodi che non richiedono la stima dei parametri modali e alcuni di questi sono basati sull'uso delle funzioni di risposta in frequenza ([154], [155]) o delle forme modali operazionali stimate dalla funzioni risposta in frequenza ([156], [157]), e/o loro derivate. Il principale vantaggio dell'approccio non modale al problema dell'identificazione del degrado, oltre al fatto che l'analisi modale diventa inutile, è che le funzioni di risposta in frequenza e le corrispondenti forme deformate e curvature, essendo definite su tutta la gamma di frequenza, contengono dati a banda larga superando così l'inconveniente legato all'utilizzo delle attuali procedure di estrazione parametri modali, efficaci di solito solo per un numero limitato di modi bassi. Inoltre, le funzioni di risposta in frequenza possono essere ricavate direttamente dalle storie temporali delle accelerazioni senza necessitare del calcolo esplicito degli spostamenti, spesso difficilmente valutabili con accuratezza a partire dalle accelerazioni registrate.

Un inconveniente legato all'utilizzo di alcuni metodi basati sulla curvatura delle forme modali operazionali consiste nel fatto che la differenziazione numerica necessaria per valutare la curvatura introduce errori che vengono fortemente amplificati da eventuale rumore presente nei dati registrati, tanto da impedire la corretta identificazione del danno. Al fine di superare tali inconvenienti e' stato messo a punto il metodo IDDM (Interpolation Damage Detection Method) ([158]-[160]) basato sull'utilizzo delle forme modali operative e che non richiedendo procedure di differenziazione dei dati registrati, riducendo gli errori legati alla presenza di rumore nei dati registrati. Il IDDM è stato applicato con successo ai ponti [159], ai telai piani [158] e, nella sua formulazione 2D, alle piastre [161].

Uno dei problemi legati all'identificazione del danno sulla base di parametri fisici (modali o non) consiste nella loro sensitività alle variazioni ambientali (temperatura, umidità, traffico, ecc.), ed è pertanto necessario che l'effetto di tali variazioni ambientali sia debitamente tenuto in conto nelle valutazioni circa lo stato di salute strutturale al fine di evitare valutazioni erranee e pertanto falsi o mancati allarmi derivanti da variazioni casuali dei parametri fisici assunti come indicatori di danno.

A tale scopo possono essere utili approcci statistici finalizzati alla definizione di valori di soglia dei parametri di danno che corrispondano ad un dato valore, preventivamente fissato, delle probabilità di falso e/o mancato allarme.

2.7.5.1 Il metodo IDDM per la localizzazione del danno

Il metodo denominato *Interpolation Damage Detection Method* (IDDM) per la localizzazione del danno sulla base delle forme modali operative è stato recentemente proposto nei riferimenti ([158]-[162]). Il metodo si basa sull'identificazione delle variazioni di un parametro, definito "errore di interpolazione", che si ottiene interpolando con una funzione regolare (ossia priva di discontinuità di curvatura) la deformata della struttura. Un eventuale incremento dell'errore di interpolazione evidenzia una riduzione della regolarità del profilo di spostamento e quindi una riduzione di rigidità nella posizione corrispondente.

Le forme modali operative, che descrivono le deformate della struttura a differenti frequenze, sono calcolate a partire dalle funzioni di trasferimento tra l'accelerazione alla base e l'accelerazione assoluta in ciascuna delle postazioni strumentate (quelle in cui sono collocati gli accelerometri). Tali funzioni, in corrispondenza delle frequenze proprie, sono pressoché coincidenti con le forme modali.

L'errore di interpolazione, in una specifica postazione di misura è definito come la differenza tra la funzione di trasferimento dell'accelerazione misurata in quel punto e la stessa funzione valutata mediante interpolazione delle funzioni di trasferimento delle accelerazioni misurate in corrispondenza di tutte le altre postazioni di misura. Grazie alla relazione che intercorre tra spostamento e accelerazione, il profilo di quest'ultima nello spazio coincide con il profilo di spostamento e quindi con la deformata. La differenza è cumulata su tutta la gamma di frequenze su cui il rapporto segnale-rumore è significativo. La qualità delle Funzioni di Risposta in Frequenza misurate è infatti inevitabilmente affetta da rumori di tipo ambientale o legati a effetti non lineari oppure presente nei dispositivi elettronici degli strumenti di misura. Tali effetti sono particolarmente importanti negli intervalli di frequenza in cui l'ampiezza della risposta è bassa, come quelli lontani dalla risonanza, o quelli che corrispondono ad un basso contenuto di energia nel segnale di ingresso. Al fine di eliminare questi effetti, la banda di frequenze considerata nella valutazione dell'errore di

interpolazione viene scelta in modo da comprendere tutti, e soltanto, i modi che contribuiscono alla risposta, cioè quelli che appaiono chiaramente come picchi nell'ampiezza della funzione risposta in frequenza misurata. Questo criterio permette di considerare in maniera completa la dinamica della struttura e anche di filtrare dalla risposta i campi di frequenza dove il rapporto segnale rumore è basso.

L'uso delle funzioni di trasferimento consente di eliminare l'influenza sia della ampiezza dell'eccitazione che del contenuto in frequenza sulla funzione errore. Per ogni frequenza f_i , la funzione risposta in frequenza $H_S(z_l, f_i)$ nell' l -esima posizione di misura z_l , può essere calcolata tramite interpolazione spline delle FRF $H_R(z_k, f_i)$ (con $k \neq l$), calcolate dalle risposte registrate in tutte le rimanenti posizioni strumentate z_k .

$$H_S(z_l, f) = \sum_{j=0}^3 c_{j,l}(f)(z_l - z_{l-1})^j \quad (58)$$

dove i coefficienti ($c_{0l}, c_{1l}, c_{2l}, c_{3l}$) sono funzioni di $H_R(z_k, f_i)$:

$$c_{j,l}(f_i) = g(H_R(z_k, f_i)) \quad k \neq l \quad (59)$$

L'errore di interpolazione alla posizione z (nel seguito l'indice l sarà rimosso per semplificare la notazione) è definito, all' i -esimo valore di frequenza f_i , come la differenza tra le funzioni di trasferimento H_R e H_S :

$$E(z, f_i) = |H_R(z, f_i)| - |H_S(z, f_i)| \quad (60)$$

dove H_R è la funzione di trasferimento della risposta registrata al posizione z_l e H_S è la funzione di trasferimento calcolata mediante interpolazione dalle risposte registrate in tutte le posizioni tranne z_l . Per caratterizzare ogni postazione lungo l'impalcato con un singolo parametro di errore, si è considerata la norma di $\square$ su tutta la gamma di frequenze significative:

$$E(z) = \sqrt{\sum_{i=n_o}^{n_o+N} E(z, f_i)^2} \quad (61)$$

dove n_o è la prima linea di frequenza considerata e N il numero di linee di frequenza corrispondente all'intervallo di frequenza dove il rapporto segnale-rumore è sufficientemente elevato da consentire una corretta definizione della funzione di trasferimento.

I valori della funzione di trasferimento dipendono dallo stato della struttura pertanto, se la stima della funzione di errore tramite l'Eq. (61) viene ripetuta nella configurazione integra e in una potenzialmente danneggiata, il confronto tra i due valori, rispettivamente E_o e E_d , fornisce un'indicazione della presenza di danno nella posizione considerata.

$$\Delta E(z) = E_d(z) - E_o(z) \quad (62)$$

Un aumento dell'errore di interpolazione in una postazione di misura tra la configurazione di riferimento e la configurazione corrente evidenzia una variazione localizzata nella deformata operativa e quindi una variazione locale di rigidità, associata alla presenza di danni.

2.7.5.2 Metodo basato sulla variazione di frequenza

Nel 1991 George Hearn e Rene B. Testa svilupparono un metodo che esamina il rapporto dei cambiamenti nelle frequenze naturali dei vari modi per localizzare il danno. L'assunzione fondamentale, che risulta corretta per la maggioranza delle strutture civili, è che la massa non vari in seguito ad un danneggiamento. Le frequenze modali, le frequenze e gli smorzamenti sono caratteristiche delle strutture e dipendono dalla loro massa e dalla loro rigidità. Il deterioramento di una struttura altera i parametri modali; l'entità del cambiamento è funzione sia della severità sia della posizione del danno e differenti scenari di danneggiamento andranno a influenzare ogni modo di vibrare in maniera differente, producendo effetti più consistenti in alcuni modi e più deboli in altri. La differenza dell'effetto nei vari modi è la base del processo di identificazione della membratura danneggiata. Se il danno viene espresso come una riduzione delle caratteristiche di rigidità della sezione è possibile sviluppare delle relazioni quantitative tra il danno ed il conseguente cambiamento

dei parametri modali attraverso una perturbazione dell'equazione del moto per il sistema. Come dati di input per la localizzazione del danno vengono richiesti la conoscenza delle frequenze naturali e delle forme modali della struttura integra e delle sole frequenze naturali della struttura dopo il danneggiamento.

Il metodo si basa sul calcolo preliminare di una serie di rapporti caratteristici che indicano l'influenza caratteristica di ogni elemento sulle frequenze naturali dei modi di vibrare.

$$\frac{\Delta\omega_i^2}{\Delta\omega_j^2} = \frac{\frac{\varepsilon_N^T(\Phi_j) K_N \varepsilon_N(\Phi_j)}{\Phi_j^T M \Phi_j}}{\frac{\varepsilon_N^T(\Phi_i) K_N \varepsilon_N(\Phi_i)}{\Phi_j^T M \Phi_j}} \quad (63)$$

nella quale K_N è la matrice di rigidità dell'elemento N , $\varepsilon_N(\Phi_i)$ rappresenta gli spostamenti indotti dalla i -esima forma modale nell'elemento N , M è la matrice di massa e $\Delta\omega_i^2$ rappresenta il quadrato della variazione di frequenza naturale nell' i -esimo modo di vibrare.

Tali rapporti caratteristici vengono quindi confrontati con i rapporti realmente misurati. L'elemento danneggiato è quello il cui rapporto caratteristico si avvicina maggiormente a quello misurato, sia a livello qualitativo (forma del grafico che rappresenta tali rapporti) sia a livello quantitativo minimizzando l'errore quadratico medio:

$$E_N = \frac{1}{M} \sum_{i,j} \left[\left(\frac{\Delta\omega_i^2}{\Delta\omega_j^2} \right)_{N \text{ misur}} - \left(\frac{\Delta\omega_i^2}{\Delta\omega_j^2} \right)_{N \text{ carat}} \right]^2 \quad (64)$$

Tale procedimento si presta molto bene all'implementazione in un codice di calcolo, in quanto il calcolo dei rapporti caratteristici è una procedura ripetitiva che va ripetuta $N \times M^2$ volte, dove N rappresenta il numero di elementi ed M rappresenta il numero di modi di vibrazione considerati nell'analisi, ovvero per i quali risultano disponibili le frequenze e le forme modali integre.

2.7.5.3 Metodo basato sulla variazione di curvatura modale

Nel 1991 K. Pandey, M. Biswas e M. M. Samman testano l'utilizzo di un nuovo parametro (la "curvatura della forma modale" ottenuta numericamente dalla misurazione delle forme modali in spostamento) come possibile candidato per identificare la posizione del danno strutturale. Gli autori si servono dei modelli agli elementi finiti di una trave appoggiata e di una mensola per mostrare come tale parametro risulti più sensibile al danno rispetto agli spostamenti modali.

In una trave la curvatura modale è direttamente connessa alla rigidità flessionale. In ogni punto vale la nota relazione:

$$v'' = \frac{M}{EI} \quad (65)$$

nella quale v'' è la curvatura della sezione, M è il momento flettente agente, E è il modulo di elasticità ed I è il momento di inerzia della sezione.

Una frattura o un altro tipo di danno che avviene in una struttura comporta una riduzione del modulo di rigidità EI della sezione, provocando un incremento della curvatura. Gli autori mostrano che la massima variazione assoluta di tale parametro si ha proprio nella zona danneggiata. Contrariamente alle frequenze, le variazioni di curvatura hanno una natura locale e pertanto possono essere utilizzate per determinare e localizzare la frattura o il danneggiamento nella struttura. Poiché la variazione di curvatura aumenta con la riduzione di EI , il valore di tale incremento può inoltre fornire indicazioni orientative sull'entità del danno stesso.

Le curvature delle forme modali in ogni punto vengono calcolate numericamente utilizzandogli spostamenti trasversali dei punti adiacenti attraverso un'approssimazione alle differenze centrali

$$v_i'' = \frac{(v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}))}{h^2} \quad (66)$$

dove h rappresenta la lunghezza dell'elemento. La posizione del danno è quindi data dal punto i che massimizza la differenza

$$\Delta = |v''_{iD} - v''_{iU}| \quad (67)$$

Per ognuno degli scenari di danneggiamento studiati, gli autori calcolano la variazione percentuale di frequenza, la variazione assoluta degli spostamenti modali, la variazione assoluta delle curvature modali e gli indici MAC e COMAC tra le forme modali pre e post danneggiamento. Questi ultimi due indici, le cui sigle stanno rispettivamente per Modal Assurance Criteria e Co-Ordinate Modal Assurance Criteria, costituiscono due efficaci strumenti per confrontare due set di forme modali. Il MAC indica la correlazione complessiva tra due forme modali, mediata su tutti i punti di misura, per un certo modo di vibrazione mentre il COMAC indica la correlazione tra le forme modali in un certo punto mediata tra tutti i modi.

2.7.5.4 Metodo basato sull'aggiornamento del modello FEM

La possibilità di utilizzare modelli numerici per simulare il comportamento di una struttura realmente esistente è legata alla bontà della modellazione e all'esattezza dei parametri meccanici inseriti come dati nel modello e per questa ragione le procedure di Model Updating rivestono una grande importanza nel campo della modellazione strutturale. Lo scopo di questi metodi è tarare i parametri di un modello agli elementi finiti, ottenuto da indagine visiva e sulla base di rilevamenti meccanici, in modo che la risposta del modello risulti quanto più prossima a quella della struttura reale cui esso si riferisce. In particolare, tra le caratteristiche che si vogliono riprodurre vi sono quelle modali della struttura, ovvero le frequenze e le forme modali. Se da un lato queste procedure permettono di raffinare un modello di calcolo e renderne la risposta più aderente al caso reale, dall'altro possono essere utilizzate per stimare e localizzare la posizione del danno all'interno della struttura. Note le caratteristiche modali della struttura danneggiata e assumendo di avere a disposizione un modello sufficientemente realistico (magari a sua volta precedentemente aggiornato) è possibile effettuare l'updating dei parametri di rigidezza del sistema al fine di ottenere un'indicazione su quale o quali componenti della struttura abbiano subito una riduzione di rigidezza e di quantificarla.

Un possibile procedura da implementare è di tipo iterativo e ha come obiettivo quello di migliorare la correlazione tra i risultati dei modelli analitici e quelli sperimentali utilizzando una funzione di errore. Il principale vantaggio è rappresentato da un elevato numero di parametri aggiornabili e dalla possibilità di realizzare la funzione di errore pesando i vari termini, favorendo interpretazioni ingegneristiche del problema. I principali svantaggi sono invece la richiesta di modelli analitici i cui modi presentino già un buon grado di accoppiamento dall'inizio e l'approssimazione della soluzione

che comporta certo grado di errore. Al primo problema è possibile ovviare verificando a monte della procedura il grado di accoppiamento tra i modi analitici e sperimentali attraverso l'utilizzo di indicatori come il MAC ed il COMAC che quantificano il grado di correlazione tra i modi (1 se i modi sono perfettamente correlati e 0 in caso di modi ortogonali tra loro). Il secondo problema può invece essere limitato fissando una tolleranza di convergenza quanto più possibile bassa.

La funzione obiettivo viene divisa in due parti, una relativa alle frequenze ed una relativa alle forme modali:

$$l(x) = l(x)_{fr} + l(x)_{mshape} \quad (68)$$

La procedura di updating può essere definita mediante un'interazione diretta tra l'ambiente di sviluppo MATLAB ed il solutore agli elementi finiti SAP2000. È stata scritta una funzione di errore che accetta in input i set di frequenze e forme modali obiettivo, entra in SAP2000 lanciando l'analisi, estrae le nuove caratteristiche del modello e restituisce direttamente il valore dell'errore. L'errore viene espresso come la somma di 2 contributi: il primo è lo scarto tra le frequenze modali mentre l'altro sfrutta l'indice MAC per valutare lo scarto tra le forme modali. Tale funzione è stata quindi minimizzata al variare dei parametri sfruttando due algoritmi per la minimizzazione di funzioni non lineari a più variabili presenti nell'Optimization Toolbox di Matlab: SQP (acronimo di Sequential Quadratic Programming) e LM (acronimo di Levenberg-Marquardt).

2.7.6 Influenza delle variabili ambientali ed operative sugli indici di danno

I parametri dinamici di un'infrastruttura sono molto influenzati da fattori ambientali (temperatura, vento, umidità) e da fattori operativi, come l'intensità del traffico. Pertanto, è fondamentale rimuovere l'influenza di tali fattori, in modo da poter valutare fenomeni di danneggiamento. Un possibile approccio per eliminare gli effetti di fattori ambientali e operativi su frequenze naturali e forme modali consiste nella creazione di modelli in grado di rappresentare i fenomeni fisici che sono alla base di tali variazioni.

Studi presenti in letteratura [163] per comprendere meglio l'influenza della temperatura sul comportamento dinamico delle strutture hanno visto l'implementazione di modelli agli elementi finiti. Questi sono modelli molto complessi in cui si tiene conto delle variazioni delle caratteristiche dei singoli materiali al variare della temperatura. Tale procedura è adeguata per comprendere meglio il

comportamento dinamico della struttura soggetta a tali variazioni, ma non è adottabile per applicazioni di monitoraggio strutturale, in quanto necessita di modellazioni molto complesse.

Invece di studiare il fenomeno fisico che determina tali cambiamenti, è possibile ricorrere a modelli che, a partire dalla misurazione di fattori ambientali e operativi, individuino una correlazione tra questi e le variazioni delle frequenze naturali della struttura. Tuttavia, poiché la selezione di questi fattori non è sempre agevole, è possibile seguire un terzo approccio, basato su strumenti statistici che consentono la correzione delle frequenze naturali senza la necessità di misurare fattori ambientali e operativi.

Un semplice metodo per stabilire la relazione tra i fattori ambientali ed operativi con le frequenze di vibrazione è la Regressione Lineare Multipla. Si tratta di un metodo statistico che è utilizzato per analizzare la relazione tra una singola variabile dipendente e diverse variabili indipendenti (variabili predittive). La relazione stabilita, ossia il modello, può essere utile in una fase iniziale per comprendere l'influenza di ogni predittore (input del modello) sulle variabili dipendenti e, quindi, prevedere valori futuri della variabile dipendente quando sono noti solamente i predittori. Nel contesto del monitoraggio strutturale, è impiegata una prima serie di dati per ottenere il modello e poi, in una seconda fase, il modello è utilizzato per determinare i valori attesi delle frequenze naturali tenendo conto delle variabili indipendenti misurate. Le frequenze naturali così determinate vengono poi successivamente confrontate con i valori stimati a partire dalle serie temporali delle accelerazioni.

Nell'ambito di un progetto di monitoraggio strutturale, i modelli di regressione multipla dovrebbero essere costruiti utilizzando i dati raccolti durante almeno un anno intero con i dati di periodi estivi e invernali, in modo tale che l'influenza dei fattori ambientali sulle frequenze naturali sia ben caratterizzata.

Nell'analisi degli effetti dei fattori ambientali o operativi sulle frequenze naturali, invece di una sola variabile dipendente (output) possono essere considerate diverse variabili indipendenti, pari al numero di modi stimati. In questo caso, può applicarsi l'analisi di regressione lineare multivariata. Questa consiste nell'applicazione della procedura di regressione lineare multipla a tutte le serie temporali contemporaneamente.

Questi metodi appena descritti si basano oltre al monitoraggio di componenti strutturali anche fattori ambientali ed operativi che influenzano l'infrastruttura. Altre procedure di natura statistica sono in grado di rimuovere gli effetti dei fattori ambientali in assenza delle relative misure.

Di seguito si concentra l'attenzione su una serie di metodi che eliminano gli effetti di fattori ambientali e operativi sulle proprietà modali registrate da un sistema di monitoraggio dinamico attraverso la decomposizione di matrici di covarianza calcolate dalle serie temporali delle proprietà modali registrate in un periodo di riferimento.

La Principal Components Analysis (PCA) è uno strumento utilizzato nel campo della statistica multivariata che rappresenta la varianza o la covarianza di un set di variabili attraverso alcune combinazioni lineari di tali variabili [164]. Tale tecnica è comunemente usata per ridurre la dimensionalità del problema, sostituendo un gruppo di variabili correlate con un nuovo gruppo più piccolo di variabili indipendenti, che sono definite componenti principali.

Le variabili originali, raccolte in un vettore y di m componenti possono essere trasformate in un altro set di variabili z applicando la seguente equazione:

$$z = T y \quad (69)$$

dove T è una matrice ortonormale $m \times m$ (la sua inversa corrisponde con la trasposta) che applica una rotazione al sistema di coordinate originario. A differenza dell'analisi di regressione, ora y rappresenta un generico campione di m variabili differenti e non i valori di una singola variabile a differenti istanti di tempo. L'obiettivo della PCA è quello di ricavare la trasformazione che, a partire da y , fornisce una serie di variabili (z , le componenti principali) aventi le seguenti proprietà:

- tutte le variabili sono indipendenti tra loro, per cui la matrice di covarianza di z è diagonale;
- la varianza delle variabili $z_1, \dots, z_m$ diminuisce da z_1 a z_m .

In questo modo la prima componente principale (z_1) illustra la parte più cospicua della varianza delle variabili originali, mentre le ultime componenti di z presentano varianze inferiori e quindi alcune di esse possono essere trascurate in quanto non sono rilevanti per spiegare la variabilità delle variabili originali.

Considerando la relazione tra y e z , la matrice di covarianza di y , indicata con Σ , può essere correlata con la matrice di covarianza di z , matrice diagonale rappresentata con Λ , attraverso la seguente espressione:

$$\Sigma = E [y y^T] = E [T^T z z^T T] = T^T \Lambda T \quad (70)$$

La decomposizione ai valori singolari della matrice di covarianza delle variabili originarie fornisce:

$$\Sigma = U S U^T \quad (70)$$

I suoi output possono essere utilizzati per ottenere la matrice di trasformazione ($T = U^T$) e la varianza delle componenti di z (elementi della diagonale di S). Dato che gli algoritmi per la Singular Value Decomposition forniscono i valori singolari in ordine decrescente, il primo elemento della diagonale di S coincide con la varianza di z_1 . Inoltre la matrice S può essere suddivisa in due parti: $S_1 = \text{diag}[s_1, s_2, \dots, s_p]$ è una matrice diagonale con i primi p valori singolari sulla diagonale, e $S_2 = \text{diag}[s_{p+1}, s_{p+2}, \dots, s_m]$ è anch'essa una matrice diagonale costituita dai rimanenti valori singolari, che non sono rilevanti nel descrivere la variabilità delle componenti di y . Il valore di p si trova osservando la differenza che si nota tra i vari valori singolari disponendoli in ordine decrescente. Tuttavia, nelle applicazioni pratiche, un repentino abbattimento dei valori singolari si verifica raramente. Pertanto, è meglio affidarsi al seguente rapporto:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^p s_i}{\sum_{i=1}^m s_i} \quad (71)$$

Questo rapporto indica la percentuale della varianza dei dati osservati descritta dai primi p valori singolari. In questo modo il valore di p può essere scelto con l'obiettivo di ottenere un certo valore di I , ad esempio 0.95.

Una volta scelto p , l'insieme di variabili $z_1, \dots, z_p$ può essere calcolato con l'Equazione [11] utilizzando una matrice $\hat{T}$ costruita dalle prime p colonne di U (si noti che $T = U^T$). Nelle applicazioni statistiche correnti l'analisi termina a questo punto.

Tuttavia, è possibile effettuare un ulteriore step per rimappare i componenti z selezionati ($\hat{z}$) nello spazio originale, mediante la matrice T ridotta ($\hat{T}$):

$$\hat{y} = \hat{T}^T \hat{z} = \hat{T}^T \hat{T} y \quad (72)$$

La differenza tra i valori rimappati e i valori originali è quantificata tramite l'errore residuo:

$$\varepsilon = y - \hat{y} \quad (73)$$

Con lo scopo di eliminare gli effetti di fattori ambientali e operativi sulle stime delle frequenze naturali, il vettore y è costituito da diversi componenti come il numero di frequenze stimate. La matrice di correlazione a cui viene applicata la SVD è determinata dall'evoluzione temporale delle stime di frequenza naturale osservate durante un periodo sufficientemente grande (tipicamente un anno) in modo contenere l'intera gamma di variazioni ambientali e operative a cui è associato lo stato non danneggiato della struttura.

Nella prima parte dell'analisi, la riduzione dimensionale raggiunta con l'applicazione dell'Analisi alle Componenti Principali forza il sistema a conservare gli effetti dovuti a fattori rilevanti (come ad esempio la temperatura) e ad eliminare gli effetti secondari, come ad esempio quelli dovuti a errori casuali nell'identificazione delle frequenze naturali. Nella seconda fase di analisi, le differenze tra i valori osservati e i valori ri-mappati (Eq. (73)) porta a caratteristiche che sono insensibili ai fattori modellati dalle componenti principali. Pertanto, l'applicazione della trasformazione espressa dall'Eq. (72), utilizzando una matrice $\hat{T}$ ottenuta da un set di dati associato a uno stato di riferimento, a nuove osservazioni e il successivo calcolo dei residui secondo l'Eq. (73) producono caratteristiche (le componenti di ε) che esaltano gli effetti presenti nelle nuove osservazioni, ma che non sono stati osservati nei set di dati di riferimento. Di conseguenza, questi residui possono essere utilizzati per rilevare valori anomali che potrebbero essere giustificati dall'esistenza di zone danneggiate.

Dopo aver ottenuto caratteristiche che sono insensibili a fattori ambientali ed operativi, deve essere utilizzata una procedura per monitorare tali valori e rilevare eventuali anomalie. I *control chart* sono strumenti statistici che possono essere efficacemente impiegati per tale scopo. Essi sono tipicamente costituiti da un grafico che riporta i dati in funzione del tempo e linee orizzontali che definiscono i limiti di variazione in condizioni ordinarie. Pertanto, un'osservazione al di fuori di tale regione è

considerata un'osservazione anomala. Nel contesto del monitoraggio strutturale, a questa variazione è associato un fenomeno di danneggiamento.

Il control chart più semplice, adatto solo per controllare una caratteristica, è l'X-chart. In questo si riportano le singole osservazioni o la media delle osservazioni in ordine di tempo e tre linee: una linea centrale (CL) e due linee orizzontali supplementari corrispondenti ai limiti di controllo superiori e inferiori, denominati rispettivamente UCL e LCL. La linea centrale è posizionata in corrispondenza della media di tutte le osservazioni, indicata con $\bar{x}$. I limiti di controllo sono dati da:

$$\begin{aligned}UCL &= \bar{\bar{x}} + 3 \sigma \\LCL &= \bar{\bar{x}} - 3 \sigma\end{aligned}\tag{74}$$

dove σ è la deviazione standard del campione quando sono controllate le singole osservazioni. In presenza di una distribuzione normale, moltiplicare per 3 la deviazione standard equivale a considerare un intervallo di confidenza del 99.7%.

Quando il control chart è integrato in un sistema di monitoraggio dinamico, x indica un'osservazione generica di una caratteristica unidimensionale insensibile agli effetti operativi e ambientali, che può essere, ad esempio, la norma euclidea dei residui (ϵ) ottenuta dopo l'applicazione della PCA. Tuttavia, è possibile applicare i control chart anche in presenza di dati multivariati. In ([164], [165]) sono dettagliati diversi control chart multivariati. Di seguito si riporta un control chart comunemente utilizzato, denominato Shewhart o T^2 . Nelle applicazioni pratiche si possono eseguire due tipi di controllo. I control chart possono essere utilizzati per monitorare la stabilità di un campione di osservazioni multivariate, il che significa che sono disponibili numerose osservazioni e l'obiettivo è quello di verificare se tutti i campioni rispettino i limiti di controllo. Oppure possono essere utilizzati per impostare una regione di controllo per le osservazioni future, tenendo conto delle proprietà dei dati raccolti durante un periodo di riferimento. Questo secondo approccio è quello che è necessario implementare in un sistema di monitoraggio permanente che dovrebbe verificare se ogni nuova osservazione si trova in una regione precedentemente definita "di sicurezza".

La verifica di osservazioni future può essere effettuata seguendo due metodologie: il controllo di ogni singola osservazione o quando sono disponibili una serie di nuove osservazioni. Se la verifica consiste

nel controllo di una singola osservazione viene utilizzato il metodo statistico T^2 calcolato con la seguente espressione:

$$T^2 = \frac{n}{n+1} (x - \bar{\bar{x}})^T S^{-1} (x - \bar{\bar{x}}) \quad (75)$$

dove n è il numero di osservazioni raccolto durante il periodo di riferimento che poi sono utilizzati per ottenerne la media ($\bar{\bar{x}}$) e la matrice di covarianza (S). Il limite inferiore (LCL) è uguale a zero mentre il limite superiore è uguale a:

$$UCL = \frac{(n-1)m}{n-m} F_{m,n-m}(\alpha) \quad (76)$$

dove $F_{m,n-m}(\alpha)$ denota la percentuale α della distribuzione F (es. 0.95 o 0.99) con m e $n-m$ gradi di libertà. Se la verifica dei nuovi casi avviene utilizzando sottogruppi con r osservazioni x , T^2 è calcolato con la formula:

$$T^2 = r (\bar{x} - \bar{\bar{x}})^T S^{-1} (\bar{x} - \bar{\bar{x}}) \quad (77)$$

dove $\bar{x}$ è la media del sottogruppo e $\bar{\bar{x}}$ la media del processo. Il limite inferiore (LCL) è uguale a zero mentre il limite superiore è uguale a:

$$UCL = \frac{m(s+1)(r-1)}{s r - s - m + 1} F_{m,s r - s - m + 1}(\alpha) \quad (78)$$

dove s rappresenta il numero di gruppi raccolti durante il periodo di riferimento e che sono usati per ottenere la media del processo ($\bar{\bar{x}}$) e la matrice di covarianza (S).

Un esempio di applicazione di tale procedura è quella relativa al monitoraggio continuo di un ponte ad arco che attraversa il fiume Duero e collega le città di Porto e Gaia. Il sistema di monitoraggio e le procedure implementate sono ampiamente descritte in [166]. In Figura 103 si nota un notevole incremento dei valori di T^2 dopo l'insorgere del danno.

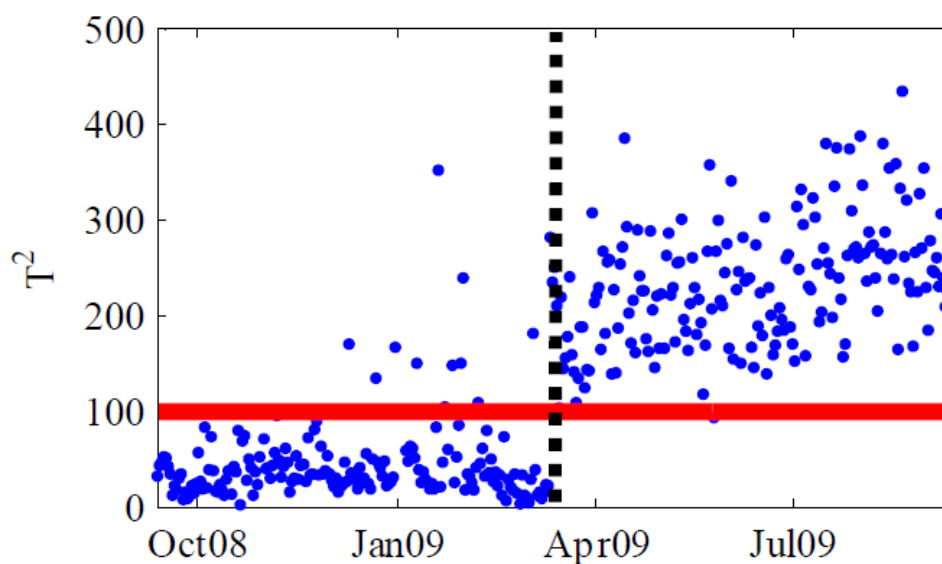


Figura 103 - Control chart prima e dopo l'insorgenza del danno

3 SCENARIO

3.1 Scopo

La progettazione di una strategia di monitoraggio strutturale per un fissato caso di interesse non è univoca. Infatti, essa dipende fortemente da quello che è lo scopo del monitoraggio stesso. Gli obiettivi principali di un sistema SHM, in linea generale, possono essere identificati come segue [2]:

- monitorare la performance strutturale in termini di sicurezza, durabilità e operabilità della struttura e per fornire e/o usare i risultati del monitoraggio come supporto decisioni al riguardo di operazioni di manutenzione e riabilitazione strutturale (quali, ad esempio, pianificazione ed esecuzione di attività ispettive);
- fornire informazioni realistiche del comportamento strutturale finalizzate all'aggiornamento o alla revisione di linee guida di progettazione o normative;
- contribuire agli sviluppi delle tecnologie del monitoraggio strutturale quali gli strumenti di misurazione, acquisizione e trasmissione dati, analisi ed elaborazione del segnale, modellazione strutturale, etc.;
- fornire un contributo essenziale nella gestione del “life-cycle maintenance” di una struttura (Figura 104)

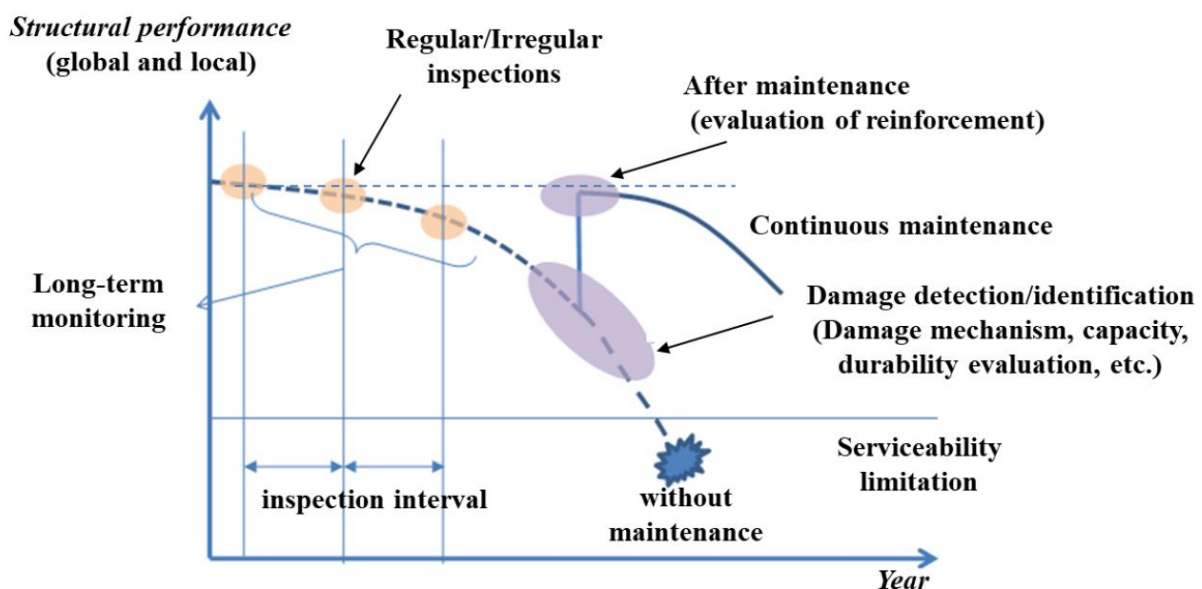


Figura 104 – Il ruolo del monitoraggio strutturale (SHM) nella gestione del “life-cycle maintenance” di una struttura [2]

Prendendo in considerazione lo specifico caso di interesse, gli scopi per i quali il sistema di monitoraggio SHM è stato progettato sono intrinsecamente collegati allo scenario all'interno del quale il monitoraggio stesso viene attivato. Uno scenario di monitoraggio può essere pienamente caratterizzato mediante la definizione di quattro aspetti fondamentali:

- caratteristiche della struttura oggetto del monitoraggio (tipologia strutturale, dettagli, etc.);
- azioni agenti sulla struttura oggetto del monitoraggio rilevanti rispetto allo scopo del monitoraggio stesso (terremoto, carichi da traffico, vento, etc.)
- vincoli di tipo operativo che possono influenzare direttamente o indirettamente la definizione del sistema di monitoraggio SHM (limitazioni sull'accessibilità in determinati punti, limite di budget, etc.);
- condizioni operative e/o ambientali che possono determinare effetti sulle registrazioni strumentali del sistema di monitoraggio SHM (variazioni di temperatura, variazioni di umidità, etc.).

Nel seguito, per ciascuno tali aspetti, si fornisce una trattazione ampia, sebbene non esaustiva, al fine di identificare casistiche di particolare rilievo nell'ambito di un processo di qualificazione di sistemi SHM in ambito civile.

3.2 Struttura

La conoscenza della struttura da monitorare rappresenta un aspetto chiave per la definizione di una efficace strategia di monitoraggio strutturale. Generalmente, l'SHM viene adoperato per costruzioni esistenti per le quali sovente la raccolta delle informazioni necessarie a raggiungere una conoscenza elevata appare un'operazione di notevole complessità. Per ottenere un'adeguata conoscenza, è necessario collezionare sufficienti informazioni relativamente ai seguenti aspetti:

- tipologia e concezione strutturale,
- materiali,
- geometria,
- azioni di progetto.

In funzione della tipologia di struttura e delle sue caratteristiche è possibile identificare una classificazione dei sistemi SHM rispetto alla loro scala, alla loro complessità e ai loro obiettivi. In Tabella 15 si riporta un esempio di associazione tra sistema SHM e tipo di struttura/gruppo di strutture, con alcuni commenti relativi ad aspetti rilevanti per il monitoraggio.

Tabella 15 – Classificazione dei sistemi SHM in funzione del tipo di struttura/gruppo di strutture

Tipologia di struttura	Tipo di monitoraggio		Commenti
Struttura singola (esistente o di nuova costruzione, strutture di rilievo, etc.)	Permanente o di lungo periodo	Continuo Periodico (annuale, mensile, settimanale)	Valutazione di alto livello Adatto ad analisi strutturali di tipo dettagliato
	Breve periodo	Continuo Ispezione regolare / non regolare	Valutazione di medio livello Relativo a scopi di monitoraggio
Gruppi di strutture continue (ad esempio, reti di strutture stradali che includono: ponti, tunnel, strade, etc.)	Permanente o di lungo periodo	Continuo Periodico (annuale, mensile, settimanale)	Rete di tipo continuo per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati di monitoraggio
	Breve periodo	Continuo Periodico (annuale, mensile, settimanale)	
Gruppi di strutture continue in aree ampie (ad esempio, gruppi di strutture in ambiente urbano)	Permanente o di lungo periodo	Continuo Periodico (annuale, mensile, settimanale)	Rete di tipo a stella o ad albero per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati di monitoraggio
	Breve periodo	Continuo Periodico (annuale, mensile, settimanale)	

3.3 Azioni

Con il termine azione in genere si indica tutte le influenze esterne che hanno effetti sulla generica performance strutturale [2]. Pertanto, esso comprende carichi come, ad esempio, quelli gravitazionali o da vento, ma pure le vibrazioni, gli effetti termici, o l'eccitazione sismica.

Azioni permanenti: le azioni permanenti includono ad esempio il peso proprio e i carichi fissi, cioè quelli che agiscono con continuità durante la vita utile di progetto e per le quali le variazioni nel tempo rispetto ad un valore medio sono trascurabili.

Azioni di esercizio: le azioni di esercizio sono caratterizzate da variazioni non trascurabili nel tempo durante la vita utile della struttura. Appartengono a tale tipologia, ad esempio, i carichi da traffico o da frenatura e centrifughi, i carichi associati ad un carroponente, i carichi da sorgenti umane, etc.

Azioni ambientali: le azioni ambientali possono essere classificate in: temperatura, umidità, corrosione, vento, onde e mareggiate.

- **Temperatura:** le variazioni di temperatura ambientale rappresentano una delle azioni generalmente presenti sulla struttura. Tali variazioni sono frequenti sia nel tempo che nello spazio e possono indurre cambiamenti negli stati tensionali e deformativi della struttura. Gli effetti della temperatura devono, inoltre, sempre essere considerati quando i parametri strutturali da monitorare possono essere influenzati dalla temperatura ambientale.
- **Umidità:** l'umidità è un parametro ambientale da monitorare quando le caratteristiche strutturali sono tali da poter risentire di tale azione.
- **Corrosione:** è un'azione rilevante specialmente su strutture marine. La corrosione dell'acciaio può portare alla riduzione non solo della sezione trasversale resistente ma anche a fenomeni di interazione in eventuale presenza di calcestruzzo. La corrosione è diventata la principale ragione di durabilità insufficiente a collasso di strutture marittime, con conseguenze estremamente rilevanti.
- **Vento:** le azioni del vento includono sia forze che pressioni che agiscono su un elemento strutturale o sulla superficie della struttura. Gli effetti del vento devono essere considerati particolarmente per edifici molto alti.
- **Moto ondoso:** le onde e le mareggiate generano carichi soprattutto sulle strutture marittime. Tali carichi sono determinati indirettamente mediante modelli di carico specifici che considerano la cinematica del movimento delle particelle, la geometria delle onde, la profondità, ecc.

Azioni estreme: le azioni legate ad eventi estremi, ovvero eventi rari il cui periodo di ritorno può essere notevolmente maggiore rispetto alla vita utile di progetto di una struttura, possono avere notevole impatto sulle strutture interessate. Tra le azioni estreme si possono ricordare incendio, terremoto, esplosioni, impatto, tifone, inondazione, ecc.

La conoscenza delle azioni e gli effetti indotti da queste è la base per l'SHM. Infatti, se i valori assoluti delle azioni sono generalmente l'aspetto chiave per la progettazione di strutture, le variazioni dei parametri di risposta strutturale dovute ai cambiamenti nel tempo e/o nello spazio delle azioni agenti sulla struttura rappresentano un punto fondamentale per l'identificazione e l'analisi del danneggiamento. Gli effetti delle azioni sulle strutture possono essere classificati in statici e dinamici. Un esempio di classificazione è riportato in Tabella 16.

Tabella 16 – Elenco degli effetti indotti dalle azioni sulle strutture

	Effetti statici	Effetti dinamici
Azioni permanenti	Peso proprio materiali	Nessuno
	Sovraccarichi	
	Carichi da costruzione	
	Ritiro del materiale	
	Creep	
	Precarico	
	Vincoli	
	Altri	
Azioni di esercizio	Traffico	Traffico
	Impianti	Carichi indotti da macchine
		Carichi indotti da umani
		Carichi di frenatura
Azioni ambientali	Neve e ghiaccio	Vento
	Carichi termici	Moto ondoso
	Umidità	Terremoto
	Carbonatazione	
	Corrosione	
	Altri	

3.4 Condizioni ambientali e operative

A differenza di quanto accade nel caso ideale, cioè in un ambiente tipo laboratorio, quando il processo di identificazione del danno deve essere eseguito su una struttura occorre tener conto delle condizioni ambientali ed operative che la struttura sperimenta, per scongiurare errori e falsi positivi. Generalmente, una struttura è simultaneamente soggetta a diverse variabili ambientali e operative (Environmental and Operative Variables – EOV). Tra le condizioni ambientali più comuni per l'ambito dell'ingegneria civile che possono causare variabilità nella risposta del sistema di misura è possibile includere: variazioni di temperatura, variazioni nelle condizioni del vento, variazioni dei livelli di umidità. L'identificazione (qualitativa) ed una valutazione (quantitativa) delle possibili EOV da considerare per lo scenario di interesse rappresenta un essenziale requisito per ottenere una strategia di SHM efficace fin dalla fase di progettazione (ad esempio, esistono sensori e dispositivi di acquisizione che operano un determinato campo di temperatura, o, con riferimento all'elaborazione dei dati, è fondamentale prevedere specifiche metodologie per il trattamento dei dati).

Le variazioni di temperatura interessano gran parte delle proprietà dei materiali (per esempio, modulo elastico, tensione di snervamento, densità) e comportano tipicamente distorsioni geometriche in alcuni elementi della struttura rispetto alle condizioni iniziali. Ad esempio, per alcuni ponti si può osservare una variazione non trascurabile nel valore della frequenza del primo modo di vibrare durante un ciclo di 24 ore. Tale variazione non è legata alla temperatura assoluta bensì al differenziale che si registra sull'impalcato durante il giorno [167].

Le condizioni operative sono associate ad aspetti quali la variazione di carichi variabili sulla struttura rispetto alla condizione nominale presa a riferimento, le variazioni nelle masse (ad esempio, nel caso di serbatoi, i cambiamenti nei livelli di liquido contenuto), le modifiche dei percorsi per strutture viarie, tra molti altri. Nel caso di ponti e viadotti, la necessità di eseguire le attività di monitoraggio in modo tale da evitare il blocco dei flussi di traffico, ad esempio, comporta sovente una variazione dei percorsi di traffico che vanno opportunamente considerati, specialmente se combinati, come avviene in genere, con le condizioni ambientali.

In alcuni casi, le EOV comportano variazioni che si apprezzano su periodi settimanali (ad esempio, flussi di traffico diversi tra giorni infrasettimanali) o stagionali (ad esempio, stagione estiva e invernale), in altri casi il tempo di riferimento è pari a 24 ore (ad esempio, fluttuazione di temperatura tra giorno e notte). Spesso esse presentano andamenti regolari, ad esempio di tipo ciclico. Tuttavia, ci sono variazioni di tipo random, quale ad esempio una chiusura del traffico improvvisa su un viadotto dovuta ad un incidente tra veicoli. Se non propriamente considerate, le modifiche dei

parametri di risposta dinamica misurate dal sistema di monitoraggio possono risultare in false indicazioni di danneggiamento.

In definitiva, esiste un'ampia casistica di EOVS che possono influenzare i parametri di risposta dinamica di una struttura e spesso è molto complesso riuscire a determinare come tutte queste sorgenti di variabilità incidano sulla risposta strutturale. Tuttavia, è necessario che le EOVS siano considerate nel processo di identificazione del danno al fine di evitare diagnosi inesatte e possibili conseguenze derivanti da queste.

3.5 Vincoli operativi

La definizione di una strategia di monitoraggio è fortemente influenzata dalla presenza di condizioni operative che vincolano alcuni parametri di scelta tra diverse soluzioni tecnologiche o metodologiche. Tali condizioni, dette “vincoli operativi”, possono essere relative a differenti aspetti, tra cui quelli di seguito riportati:

- problemi di accessibilità in fase di installazione/manutenzione (ad esempio, l'impossibilità di raggiungere determinati elementi di una struttura);
- problemi di sicurezza per utenti o operatori (ad esempio, quelli determinati dal passaggio di collegamenti cablati su sedi viarie);
- interferenze con l'utilizzo dell'opera (ad esempio, necessità di predisporre chiusure del traffico su un viadotto in fase di installazione);
- vincoli dettati dal gestore (ad esempio, relative all'interruzione dell'operatività della struttura);
- disponibilità/prossimità di impianti e/o servizi (ad esempio, cabine con servizi internet poste a distanza dall'opera);
- ambienti/condizioni estreme (ad esempio, punti accessibili per sensori e dispositivi di acquisizione caratterizzati da caratteristiche ambientali ostili che mettono in discussione la funzionalità dei sensori [168])

Un vincolo operativo generalmente sempre presente e fondamentale nella determinazione dello scenario è rappresentato dal budget allocato per le attività di monitoraggio.

4 QUALIFICAZIONE DI SISTEMI DI MONITORAGGIO STRUTTURALE PER L'INGEGNERIA CIVILE

4.1 Motivazioni e finalità

Il monitoraggio strutturale (SHM) negli ultimi decenni è stato oggetto di attenzione crescente nel mondo della ricerca e dell'ingegneria civile per le opportunità che esso offre di controllo tempestivo delle condizioni di salute della struttura oggetto di monitoraggio e di estensione della sua vita utile garantendo adeguati livelli di sicurezza e prestazioni in esercizio ([146], [169]).

La letteratura tecnica e scientifica riconosce comunemente che nella progettazione di un sistema di monitoraggio strutturale (SHM) occorre tener conto di una serie di fattori eterogenei tra loro quali gli scopi del monitoraggio, la tipologia di struttura monitorata, la strategia di misurazione perseguita, così come pure degli stakeholder coinvolti [119]. Ne consegue la difficoltà di standardizzare il processo. Allo stato attuale, la standardizzazione del processo di progettazione di sistemi SHM è ancora in fase iniziale. Infatti, essa richiede consolidati e riconosciuti criteri di progetto mentre, ad oggi, nel panorama internazionale, è disponibile un numero limitato di documenti normativi, linee guida e standard, spesso riferiti a soggetti (ispezioni, manutenzione, gestione, SHM, etc.) e a metodologie molto differenti tra loro. Un quadro aggiornato della distribuzione geografica di tali documenti è riportato in Figura 105.

In tale contesto, il problema della qualificazione, sebbene auspicabile e frequentemente invocato, appare particolarmente complesso. La qualificazione di un sistema SHM richiede, infatti, la definizione di requisiti e metodologie di valutazione degli stessi consolidati, condivisi e robusti. Occorre, inoltre, porre attenzione al fatto che spesso si confonde il problema della qualificazione con un problema di natura metrologica, sovrapponendo la qualificazione del sistema alla taratura dei dispositivi impiegati in fase di misura. La taratura di uno strumento, definita come determinazione e documentazione della deviazione dell'indicazione di misura dal valore convenzionale “vero” di un misurando scelto come campione, tuttavia, non fornisce alcuna indicazione rispetto alla sua rispondenza ai requisiti richiesti. Inoltre, un sistema SHM si fonda su una strategia di misura ed elaborazione che non risponde, generalmente, a logiche di tipo metrologico.

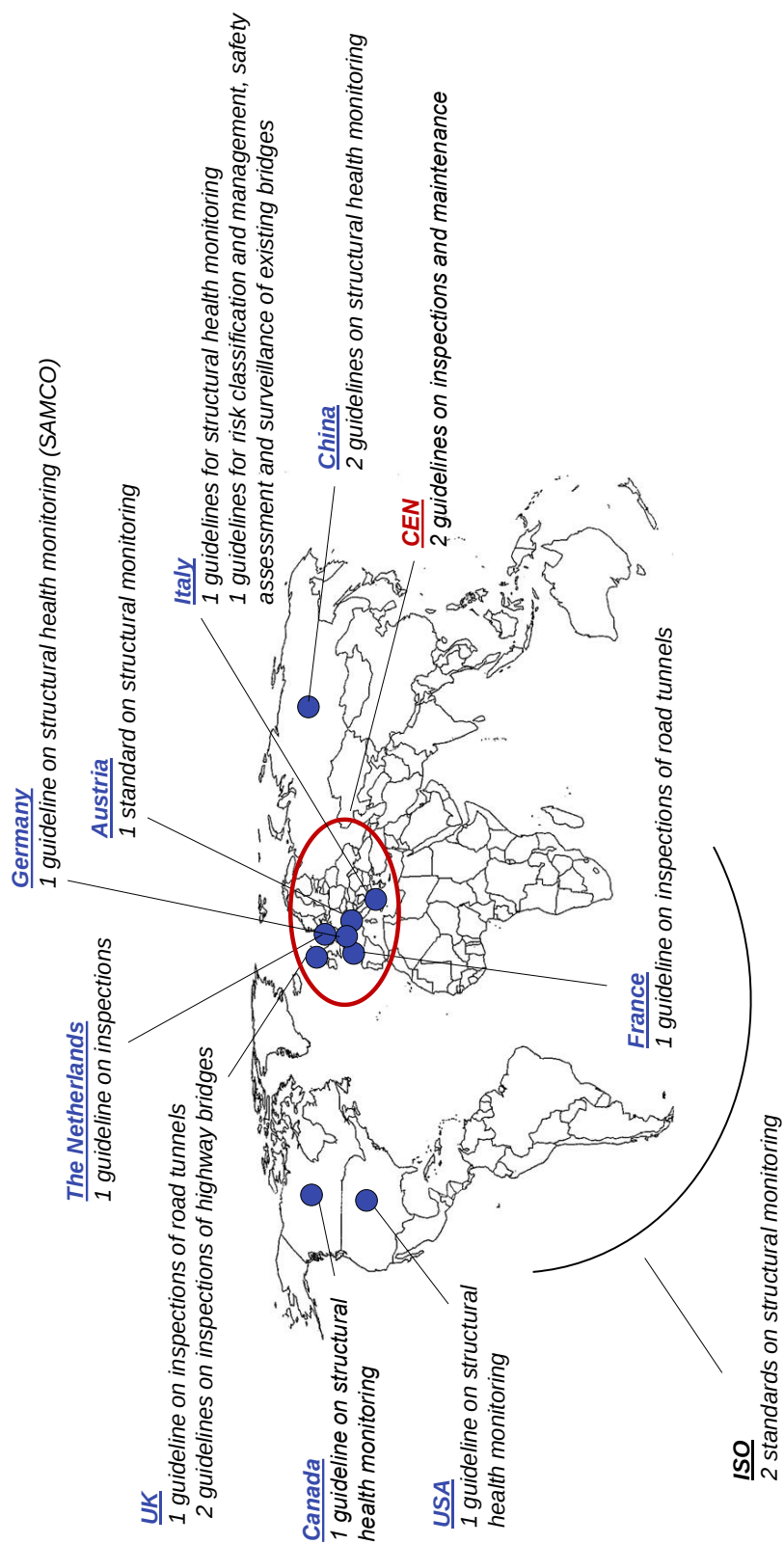


Figura 105 – Documenti di riferimento attualmente disponibili in ambito di progettazione di sistemi e strategie SHM (per gentile concessione di [171])

La declinazione della tematica della qualificazione nel senso di “validazione del sistema SHM” rispetto ai suoi scopi (identificazione del danno, stima della localizzazione ed estensione del danno, definizione della prognosi, supporto al controllo e alla manutenzione, approfondimento della conoscenza, etc.) appare, pertanto, un approccio particolarmente promettente e percorribile, poiché da un lato consente di tenere in considerazione il sistema e la strategia SHM nella sua totalità, dall’altro può essere condotto all’interno dello stato attuale di standardizzazione.

Nel seguito, si presentano i risultati delle attività svolte, mirate alla formulazione e alla proposta di una procedura di qualificazione di un sistema SHM. A tal fine, in particolare, il paragrafo 4.2 riporta una descrizione del panorama della certificazione e della qualificazione dei prodotti, con riferimento specifico alla Marcatura CE dei prodotti da costruzione, per valutare vantaggi e/o criticità rispetto ad un’eventuale mutuazione dell’organizzazione concettuale e procedurale di quest’ultimo per qualificare i sistemi SHM.

4.2 Il quadro normativo europeo per la qualificazione dei prodotti da costruzione

La Marcatura CE secondo l’approccio riportato nel CPR [170] si fonda sull’obiettivo di abbattere le barriere tecniche al commercio dei prodotti da costruzione all’interno del Mercato Unico Europeo: tutti i Paesi devono permettere la vendita di prodotti da costruzione recanti il marchio CE, senza richiedere ulteriori marchi o certificati. Tale principio è stato istituito sin dal 1988, con la prima formalizzazione della procedura di marcatura secondo la direttiva 89/106/EEC (detta CPD, Construction Product Directive [172]) e poi consolidato con il successivo ed attuale regolamento [170]. Grazie ad esso, l’industria delle costruzioni ha accresciuto notevolmente il suo valore rappresentando attualmente una porzione considerevole del PIL europeo.

Per raggiungere l’obiettivo, la metodologia regolata dal CPR si avvale di quattro elementi principali:

- un sistema di specifiche tecniche armonizzate;
- un sistema concordato di valutazione della conformità per ogni famiglia di prodotto;
- una rete di organismi notificati;
- la marcatura CE dei prodotti.

Un prodotto da costruzione (PdC) viene definito come qualsiasi prodotto o kit fabbricato e immesso sul mercato per essere incorporato in modo permanente in opere di costruzione o in parti di esse e la cui prestazione incide sulla prestazione delle opere di costruzione rispetto ai requisiti di base delle opere stesse. La certificazione dei PdC si può classificare in “obbligatoria” e “volontaria” (in quest’ultimo caso si parla di “percorso EOTA”, dal nome dell’organismo europeo responsabile

dell'intero impianto operativo di certificazione). Un PdC che rientra nel campo di applicazione di una norma armonizzata deve essere obbligatoriamente marcato CE prima di essere immesso sul mercato. Viceversa, se un prodotto, generalmente innovativo, si discosta dal campo di applicazione di questa o richiede un particolare metodo di verifica, il Fabbrikante del PdC può richiedere (volontariamente) di ottenere la Marcatura CE e quindi lo sviluppo di un Documento per la Valutazione Europea (EAD). Le specifiche tecniche armonizzate (sia norma armonizzata che EAD) di un prodotto da costruzione per un uso specifico definiscono i metodi di valutazione, di dichiarazione e di controllo delle caratteristiche essenziali, che influiscono sulla capacità di un prodotto da costruzione di soddisfare i sette requisiti di base riferiti alle opere di costruzione:

1. Resistenza meccanica e stabilità,
2. Sicurezza in caso di incendio,
3. Igiene, salute e ambiente,
4. Sicurezza e accessibilità in uso,
5. Protezione contro il rumore,
6. Risparmio energetico e ritenzione di calore,
7. Uso sostenibile delle risorse naturali.

Nello specifico, l'allegato informativo ZA della norma armonizzata si compone di una prima tabella (ZA.1) che elenca le caratteristiche essenziali e gli eventuali livelli di soglia se previsti dal mandato della Commissione Europea al CEN/CENELEC; la sezione n. 2 dell'EAD elenca caratteristiche essenziali e metodi di valutazione delle prestazioni ad esse relative (espresse come livello, classe o descrizione). In caso di certificazione obbligatoria, il fabbricante deve valutare tutte le prestazioni previste nell'allegato ZA. Diversamente, per un prodotto innovativo ricadente nella certificazione volontaria, il fabbricante può scegliere le prestazioni che (volontariamente) è interessato a determinare e dichiarare.

A valle del processo di valutazione delle performance, l'approccio obbligatorio prevede un documento di sintesi detto Rapporto di Prova, rilasciato da un laboratorio incaricato, sulla base del quale il fabbricante redige una dichiarazione, detta Dichiarazione di Prestazione (DoP – Declaration of Performance), con cui si assume formalmente le responsabilità circa la veridicità dei valori in essa riportati rispetto a quelli assicurati dal PdC.

Per la certificazione volontaria, i risultati della valutazione, insieme ad una descrizione funzionale delle caratteristiche principali del PdC e delle istruzioni di montaggio, sono riportati all'interno di un documento specifico, detto Valutazione Tecnica Europea (ETA – European Technical Assessment).

L'organo che è responsabile del processo di valutazione delle performance del PdC è detto TAB (Technical Assessment Body). Attualmente, ITC-CNR rappresenta uno dei principali TAB in Italia. Anche in questo caso, il fabbricante redige una DoP, con cui si assume formalmente le responsabilità circa la veridicità dei valori in essa riportati rispetto a quelli assicurati dal PdC.

Per poter ottenere e mantenere la Marcatura CE, successivamente al completamento del processo di valutazione delle prestazioni, i fabbricanti assicurano che siano attuate procedure per garantire che la produzione in serie conservi la prestazione dichiarata. A tal proposito, il CPR [170] prevede cinque differenti sistemi di valutazione e verifica della costanza della prestazione (AVCP – Assessment and Verification of Constancy of Performance) con gradi di coinvolgimento degli Organismi terzi (NB – Notified Body) differenti nella valutazione della costanza di prestazione del prodotto in base alla pertinente specifica tecnica. Per ogni famiglia di prodotto, il sistema di AVCP è stato concordato dagli Stati membri e dalla Commissione europea, sulla base delle implicazioni del prodotto sulla salute e sicurezza e sulla particolare natura del processo di produzione del prodotto stesso. I sistemi, in particolare, sono elencati di seguito in ordine di importanza decrescente (ovvero di restrittività dei processi di controllo decrescente):

- Sistema 1+,
- Sistema 1,
- Sistema 2+,
- Sistema 3,
- Sistema 4.

Le procedure di valutazione e verifica della costanza di prestazione del prodotto sono riportati nella pertinente specifica tecnica armonizzata. Una volta effettuate le attività previste dal sistema di valutazione e verifica della costanza di prestazione del prodotto, il fabbricante redige la DoP e marca CE il prodotto.

A partire dal 1 luglio 2013, i prodotti da costruzione immessi sul mercato unico Europeo che rientrano nel campo di applicazione di una norma armonizzata (hEN) o sono conformi ad ETA devono essere accompagnati dalla Dichiarazione di Prestazione all'atto dell'immissione di tale prodotto sul mercato.

La dichiarazione di prestazione non è richiesta per i prodotti da costruzione che rientrano in una norma armonizzata, quando:

- A. il prodotto è realizzato in un unico esemplare o su misura mediante un processo non in serie per un ordine specifico ed è installato in un'unica identificata opera di costruzione. Il

fabbricante è responsabile della sicurezza dell'installazione del prodotto, in conformità alle normative nazionali applicabili e sotto la responsabilità dei soggetti incaricati della sicurezza dell'esecuzione delle opere di costruzione, designati ai sensi delle normative nazionali applicabili;

- B. il prodotto è fabbricato in cantiere per essere incorporato nell'opera in conformità alle norme nazionali applicabili e sotto la direzione dei responsabili per la sicurezza dell'esecuzione delle opere di costruzione ai sensi delle norme nazionali applicabili;
- C. il prodotto è fabbricato in modo tradizionale o in un modo appropriato per la conservazione del patrimonio, mediante un procedimento non industriale e destinato al restauro di opere di costruzione ufficialmente protette come parte di un patrimonio tutelato o in ragione del loro particolare valore architettonico o storico, nel rispetto delle normative nazionali applicabili.

Con particolare riferimento al caso A, il fabbricante dei PdC che rientrano nel campo di applicazione di una norma armonizzata e fabbricati in unico esemplare o su specifica del committente in un processo non in serie può sostituire la parte della valutazione delle prestazioni relativa al sistema di AVCP applicabile con una documentazione tecnica specifica che dimostri l'equivalenza delle procedure utilizzate con quelle fissate nella norma armonizzata. Se il sistema di AVCP previsto per tale prodotto è 1 + o 1, la documentazione tecnica specifica deve essere verificata da un organismo di certificazione di prodotto notificato.

Un approfondimento specifico deve essere destinato al caso della qualificazione della categoria di PdC destinati all'uso strutturale in Italia. Infatti, nel capitolo 11 delle Norme tecniche per le costruzioni (D. M. del 17 gennaio 2018 - [173]) si definiscono materiali e prodotti per uso strutturale quelli che consentono ad un'opera ove questi sono incorporati permanentemente di soddisfare in maniera prioritaria il requisito base delle opere numero 1 (BWR 1) “resistenza meccanica e stabilità” di cui all'allegato 1 del CPR [170].

La norma, inoltre, cita testualmente: “I materiali e prodotti per uso strutturale devono essere:

- identificati univocamente a cura del fabbricante, secondo le procedure di seguito richiamate;
- qualificati sotto la responsabilità del fabbricante, secondo le procedure di seguito richiamate;
- accettati dal Direttore dei lavori mediante acquisizione e verifica della documentazione di identificazione e qualificazione, nonché mediante eventuali prove di accettazione”.

In particolare, per quanto attiene l'identificazione e la qualificazione, possono configurarsi i seguenti casi:

- a) materiali e prodotti per i quali sia disponibile, per l'uso strutturale previsto, una norma europea armonizzata il cui riferimento sia pubblicato su GUUE; al termine del periodo di coesistenza il loro impiego nelle opere è possibile soltanto se corredati della “Dichiarazione di Prestazione” e della Marcatura CE, prevista al Capo II del Regolamento UE 305/2011;
- b) materiali e prodotti per uso strutturale per i quali non sia disponibile una norma europea armonizzata oppure la stessa ricada nel periodo di coesistenza, ma per i quali sia prevista la qualificazione con le modalità e le procedure indicate nelle presenti norme; è fatto salvo il caso in cui, nel periodo di coesistenza della specifica norma armonizzata, il fabbricante abbia volontariamente optato per la Marcatura CE;
- c) materiali e prodotti per uso strutturale non ricadenti in una delle tipologie a) o b): in tali casi il fabbricante dovrà pervenire alla Marcatura CE sulla base della pertinente “Valutazione Tecnica Europea” (ETA), oppure dovrà ottenere un “Certificato di Valutazione Tecnica” rilasciato dal Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, previa istruttoria del Servizi Tecnico Centrale, anche sulla base di Linee Guida approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, ove disponibili; con decreto del Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, su conforme parere della competente Sezione, sono approvate Linee Guida relative alle specifiche procedure per il rilascio del “Certificato di Valutazione Tecnica”.

Va, dunque, evidenziato che, sebbene in termini generali la marcatura CE non sia obbligatoria per i prodotti da costruzione non coperti da norme armonizzate, quando si ricade nell'ambito della sicurezza delle costruzioni il legislatore italiano individua come modalità prioritaria per la qualificazione dei prodotti da costruzione ad uso strutturale la marcatura CE sulla base di una ETA.

4.2.1 Discussione

La descrizione dell'approccio e delle procedure che caratterizzano la Marcatura CE dei prodotti da costruzione riportati nel paragrafo precedente, consente di identificarne ed analizzarne alcuni aspetti critici ed altri significativi rispetto ad una possibile mutuazione ai fini della qualificazione di sistemi SHM.

Innanzitutto, l'approccio di certificazione usato per la marcatura CE non può essere direttamente applicato per la qualificazione di un sistema SHM, in quanto quest'ultimo non risponde a nessuna delle definizioni fondamentali riportate all'interno del CPR [170]. La letteratura tecnica e scientifica, infatti, riconosce comunemente che la progettazione di un sistema di monitoraggio strutturale (SHM) non è univoca, ma dipende da una serie di aspetti come ad esempio gli scopi, la tipologia di struttura monitorata, la strategia di misurazione perseguita, tra molti altri ancora, così come pure dagli

stakeholder coinvolti nel processo [119]. Pertanto, il sistema SHM non ricade nell'insieme dei sistemi prodotti in serie. Esso non viene generalmente installato su di una struttura per l'intera vita utile della stessa. Le sue caratteristiche, ovvero le proprietà e i parametri tecnici principali che ne descrivono le prestazioni, non possono essere considerate essenziali in quanto non influiscono direttamente sul rispetto dei requisiti di base da parte della struttura su cui esso è installato. Dal punto di vista più operativo, poi, per l'attuale mancanza di standardizzazione, già sottolineata nel paragrafo 4.1, risulta impossibile procedere ad una qualificazione seguendo le medesime strategie che caratterizzano la marcatura CE.

Nonostante le numerose criticità evidenziate, sfruttare almeno in parte il robusto e consolidato schema alla base del processo di qualificazione relativo alla marcatura CE può rappresentare un valido ed utile riferimento per la definizione di una nuova specifica procedura di qualificazione per sistemi SHM, che però non può prescindere dalla considerazione dello scenario di monitoraggio all'interno del quale lo stesso è chiamato ad operare per il raggiungimento di fissati scopi. La procedura è illustrata nel paragrafo 4.3.

4.3 Procedura di qualificazione “scenario-based” di un sistema di monitoraggio strutturale per l'ingegneria civile

Alla luce di quanto discusso nei precedenti paragrafi, si è proceduto allo sviluppo di una procedura di qualificazione, specificamente formulata per sistemi SHM. La procedura, come formulata nel seguito, è di tipo “scenario-based” e si prefigge come obiettivo principale la valutazione della rispondenza di un dato sistema SHM ad uno scenario applicativo preventivamente identificato. Tale rispondenza viene determinata mediante il calcolo di un parametro sintetico, denominato “fattore di efficienza” (o Efficiency rating – ER).

La procedura proposta viene illustrata in maniera schematica nel flowchart riportato Figura 106.

Dal punto di vista generale, la qualificazione del sistema SHM avviene seguendo un processo multilivello che prevede:

- l'analisi del sistema di monitoraggio SHM oggetto di valutazione e della strategia su cui esso si fonda;
- l'analisi dello scenario applicativo, a partire dagli scopi che il monitoraggio deve perseguire, e degli aspetti operativi e ambientali che possono condizionarne l'operatività;
- la valutazione della rispondenza tra le caratteristiche di prestazione garantite dal sistema SHM e i target richiesti dallo scenario in cui esso è chiamato ad operare.

Per quanto riguarda l'analisi del sistema di monitoraggio (si faccia riferimento alla parte sinistra del diagramma di flusso di Figura 106), la procedura eredita, in parte, gli schemi concettuali ed operativi alla base della certificazione dei prodotti da costruzione. Assimilando, infatti, un sistema SHM ad un'opera civile (Figura 107), si può osservare che, come quest'ultima è costituita da prodotti da costruzioni, il primo è determinato a partire da una serie di differenti componenti e procedure (sensori, sistema di acquisizione, trasmissione, storage, etc.). In entrambi i casi, ovvero sia per un sistema SHM che per un'opera civile, le caratteristiche o proprietà specifiche dei componenti (dette caratteristiche essenziali nel caso dei prodotti da costruzione) influenzano considerevolmente le performance globali (Figura 107a). Queste ultime sono espresse in relazione al soddisfacimento dei requisiti di base delle opere da costruzione (BWR) per i prodotti da costruzione, mentre una formulazione analoga e standardizzata non esiste, ad oggi, per i sistemi SHM, sebbene possano essere individuati alcuni aspetti fondamentali rispetto ai quali ciascuna componente fornisce un contributo (Figura 107b). Adottando una nomenclatura analoga, i requisiti relativi ad un sistema SHM possono essere definiti “requisiti di base di sistema” (Basic System Requirements – BSR).

Le caratteristiche specifiche e le relative prestazioni dei prodotti da costruzione possono essere determinate in accordo alle metodologie previste negli standard di riferimento eventualmente disponibili ed essere espresse come valore numerico, range o mediante descrizione, a seconda della natura della proprietà considerata. Una standardizzazione analoga per le caratteristiche specifiche delle componenti e delle procedure che costituiscono un sistema SHM non è ad oggi disponibile. Tuttavia, applicando un approccio analogo a quello alla base della marcatura CE ai sistemi SHM, è necessario innanzitutto identificare in maniera dettagliata e completa le caratteristiche specifiche di interesse. Nel capitolo 2 è stato presentato un dettagliato, sebbene non esaustivo, studio di letteratura finalizzato a determinare le caratteristiche specifiche delle varie possibili componenti dei sistemi SHM. In Tabella 17, se ne riporta, a titolo di esempio, una sintesi relativa ad alcune delle principali caratteristiche specifiche delle componenti di un sistema SHM per il monitoraggio dinamico di un'opera civile. Per ciascuna caratteristica specifica, è possibile determinare una prestazione; quest'ultima, adottando l'approccio della marcatura CE dei PdC, potrà essere espressa sotto forma di:

- livello (cioè un singolo valore numerico);
- classe (cioè una soglia o un intervallo);
- descrizione (quanto le prime due forme non posso essere adoperate, si può definire la prestazione mediante descrizione grafica, o testuale, etc.).

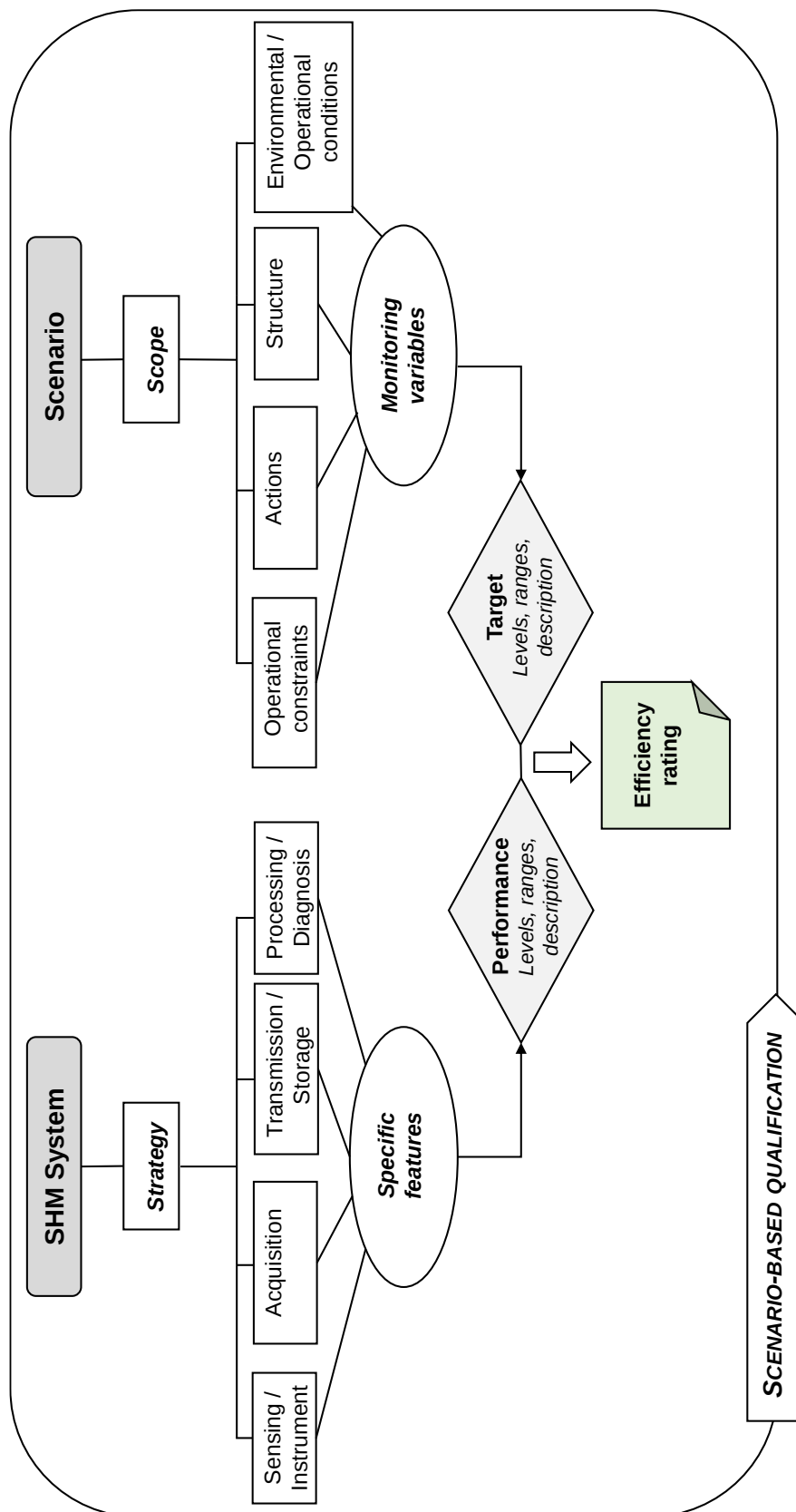


Figura 106 - Schema dell’approccio di qualificazione “scenario-based” di un sistema di monitoraggio strutturale in ambito civile

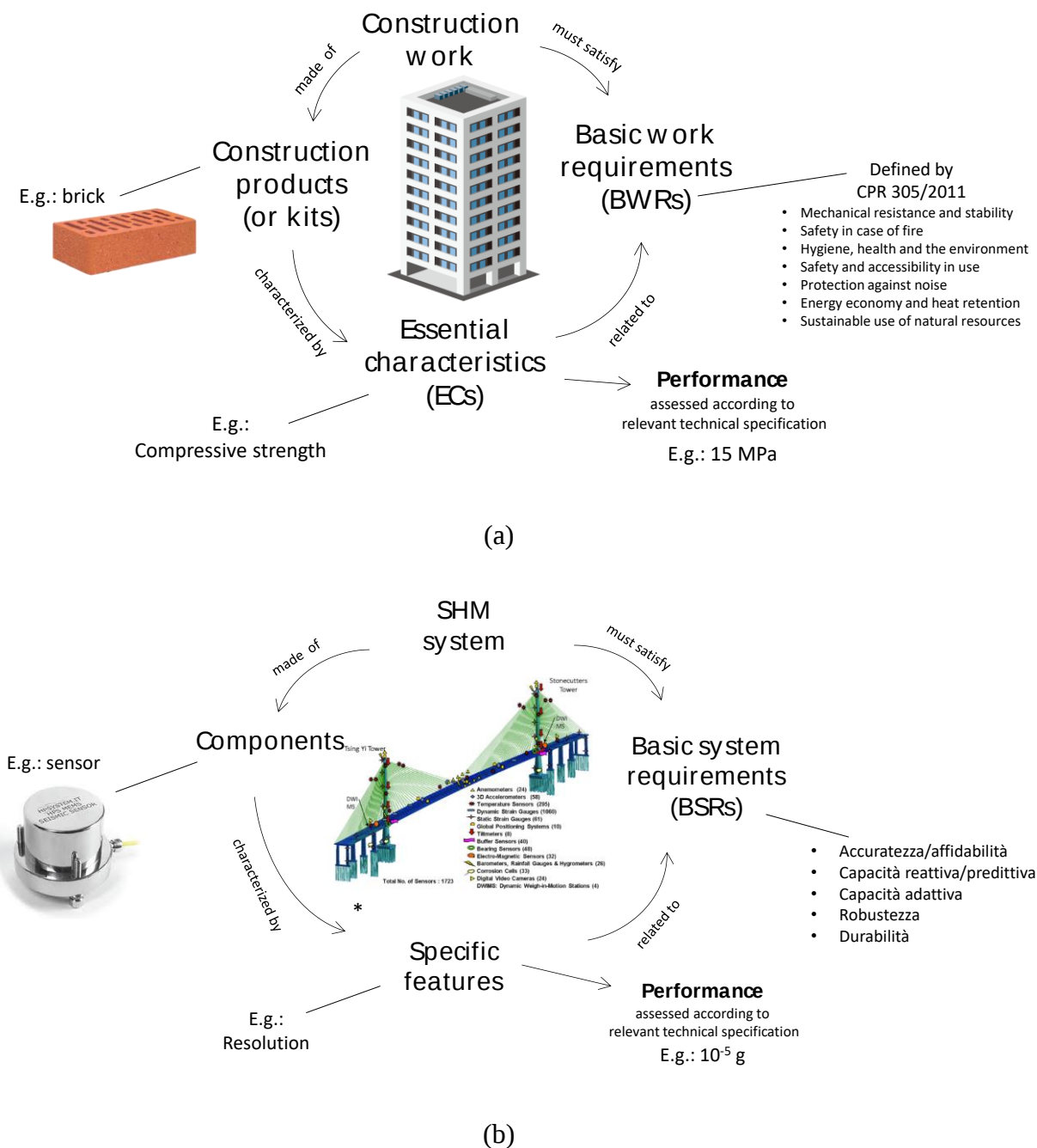


Figura 107 – Analogia alla base dell’approccio di qualificazione “scenario-based” di un sistema di monitoraggio strutturale in ambito civile

Tabella 17 – Esempio di un elenco di caratteristiche specifiche critiche per un caso di un sistema di monitoraggio dinamico

Caratteristiche specifiche				
Sensore	Acquisizione dati	Trasmissione dati	Storage	Elaborazione/Diagnosi
Sensibilità	Risoluzione	Modalità di trasmissione	Modalità	Approccio
Range di misura	Sincronizzazione	Distanza di trasmissione	Memorizzazione	Livello di Damage Detection
Risoluzione	Modalità di acquisizione	Velocità di trasmissione	Gestione	Damage features
Risposta in frequenza	Frequenza di campionamento	Throughput	Capacità	EOV
Linearità	Consumo di energia	Tipo di installazione	Tempo di accesso ai dati	Rilevazione di anomalie
Sensibilità trasversale	Tipo di alimentazione	Consumo di energia	Ridondanza	Controllo di malfunzionamenti
Shock limite	Tipo di installazione	Tipo di alimentazione	Formato dati	Metodi di analisi
Self-noise del sensore	Indice di protezione (IP)			Recovery
Offset	Architettura			Sorgente dei dati
Tempo di risposta	Numerosità			
Excitation voltage				
Range di temperatura				
Effetti termici				
Range di umidità				
Interferenza elettromagnetica				
Tipo di alimentazione				
Tipo di installazione				
Indice di protezione (IP)				
Layout				
Numerosità				

Al fine di assicurare la corretta applicazione della procedura di qualificazione è necessario procedere all'analisi dello scenario applicativo all'interno del quale il sistema oggetto di studio è chiamato ad operare. Nello specifico, occorre procedere innanzitutto all'identificazione degli scopi ai quali una eventuale strategia di monitoraggio deve rispondere. Quindi, è fondamentale definire in dettaglio gli aspetti fondamentali che contraddistinguono lo scenario (si veda Figura 106), come descritti in dettaglio nel capitolo 3 e qui di seguito brevemente richiamati:

- caratteristiche della struttura oggetto del monitoraggio (tipologia strutturale, dettagli costruttivi, etc.);
- azioni agenti sulla struttura rilevanti rispetto allo scopo del monitoraggio stesso (terremoto, carichi da traffico, vento, etc.)
- vincoli di tipo operativo che possono influenzare direttamente o indirettamente la definizione del sistema SHM (limitazioni sull'accessibilità in determinati punti, limiti di budget, etc.);
- condizioni operative e/o ambientali che possono influire sui dati strumentali del sistema SHM (temperatura, umidità, etc.).

La definizione sistematica dello scenario di monitoraggio consente l'identificazione delle variabili di monitoraggio, ossia dei parametri di risposta strutturale rilevanti ai fini della valutazione delle prestazioni e/o dello stato di salute della struttura.

La procedura di qualificazione proposta ha come obiettivo principale la valutazione della rispondenza del sistema di monitoraggio rispetto allo scenario identificato. A tal fine, la prima fase è la definizione dei cosiddetti target di performance richiesta. Questi ultimi rappresentano i requisiti minimi che il sistema SHM deve soddisfare per essere considerato compatibile con lo scenario di applicazione. Sulla base delle variabili di monitoraggio identificate, è possibile andare a identificare e quantificare i target associati allo scenario di riferimento sulla base, ad esempio, di evidenze consolidate di letteratura.

Il confronto delle performance attese del sistema SHM con i target di scenario consente di qualificare la rispondenza del sistema stesso allo scenario di interesse. La rispondenza della strategia di monitoraggio allo scenario di riferimento si traduce quantitativamente nella valutazione dell'ER del sistema di monitoraggio.

La procedura proposta prevede l'applicazione di due approcci distinti per la valutazione dell'ER, come di seguito definiti.

A. *Approccio Checklist*: la metodologia controlla quanti dei target legati allo scenario sono soddisfatti dalla strategia di monitoraggio e fornisce un risultato globale espresso in termini percentuali. Il risultato ottenuto è dato dal rapporto tra il numero di caratteristiche specifiche la cui performance soddisfa il target e il numero delle caratteristiche specifiche ritenute critiche per lo scenario esaminato. In forma contratta, l'ER può essere espresso mediante l'Eq. (79).

$$ER_A = \frac{n}{n_c} \quad (79)$$

Nell'Eq. (79), n rappresenta il numero di target rispettati, n_c il numero totale di caratteristiche specifiche determinate per il caso in considerazione.

B. *Valutazione quantitativa*: per ciascuna delle componenti del sistema SHM, la metodologia valuta in che percentuale i target legati allo scenario sono soddisfatti dalle prestazioni (ER parziale) e consente una valutazione disaggregata rispetto alle componenti del sistema espressa mediante un diagramma di Kiviat. Tale approccio fornisce un livello di informazione aggiuntiva, rispetto alla metodologia "A", che può consentire l'identificazione di eventuali punti deboli della strategia di monitoraggio proposta e agevolare l'implementazione di eventuali azioni correttive. In questo caso, per ciascun componente i -esimo del sistema, rispetto alla caratteristica specifica j -esima, si può determinare la percentuale di soddisfazione come riportata nell'Eq. (80), in cui $p_{i,j}$ è la prestazione, e $t_{i,j}$ è il target fissato.

$$ER_{B,j} = \frac{p_{i,j}}{t_{i,j}} \quad (80)$$

4.4 Applicazione ad un caso studio elementare

Al fine di valutare l'applicabilità della procedura proposta, come formulata al paragrafo precedente, la stessa è stata applicata in via preliminare con riferimento ad un caso applicativo elementare.

Si considerino due scenari di monitoraggio diversi, indicati come "A" e "B", rispettivamente. Per semplicità, si assuma che entrambi siano accomunati dalla stessa tipologia strutturale costituita da un

ponte a travata in c.a. con travi di impalcato a schema semplicemente appoggiato, mentre i rimanenti parametri di scenario sono diversi. In particolare, nel caso “A”:

- lo scopo principale del monitoraggio è la gestione dell'emergenza post-evento;
- l'azione di interesse è rappresentata dall'evento sismico di intensità elevata;
- le variabili di monitoraggio sono costituite dai valori di spostamento relativo (drift) misurati in testa alle pile;

Non sono presenti rilevanti vincoli operativi, e l'influenza delle variabili ambientali e/o operative è limitata.

Nel caso “B”, invece:

- lo scopo principale del monitoraggio è la manutenzione proattiva;
- l'azione di interesse è rappresentata dai carichi da traffico;
- le condizioni ambientali (temperatura) influenzano in maniera significativa i risultati del monitoraggio;
- le variabili di monitoraggio sono costituite parametri modali.

Si considerino due sistemi SHM, denominati “Sistema 1” e “Sistema 2”, entrambi candidati per l'applicazione sia allo scenario “A” che allo scenario “B”. Il primo è così costituito:

- accelerometri wireless provvisti di elaborazione on-board (range di misura ± 2 g; sensibilità 1 V/g) installati sulla sommità delle pile;
- procedura di elaborazione on-board capace di assicurare doppia integrazione delle accelerazioni e acquisizione/trasmissione dei dati con attivazione a trigger al di sopra di un predefinito valore di soglia.

Il “Sistema 2” è, invece, costituito da:

- accelerometri tradizionali con collegamento cablato (range di misura ± 0.25 g; sensibilità 10 V/g) installati sull'impalcato in maniera da garantire l'osservabilità dei modi fondamentali;
- sensori di temperatura (range di misura da -100°C a $+200^{\circ}\text{C}$);
- acquisizione e trasmissione dati in continuo;
- procedura di elaborazione: (i) OMA di tipo automatico per la stima dei parametri modali e (ii) compensazione degli effetti delle variabili ambientali ai fini dell'identificazione del danno.

In Tabella 18 si riportano i valori di performance e target determinati per il caso studio in esame.

Tabella 18 – Performance e target per il caso esemplificativo

Componente	Caratteristica specifica	Sistema 1	Sistema 2	Caso A	Caso B
Sensori accelerometrici	Sensibilità [V/g]	1	10	≥ 1	≥ 10
	Range di misura [g]	± 2	± 0.25	$> \pm 0.5$	$\leq \pm 0.5$
	Non linearità [%]	< 1	< 1	< 1	< 1
	Tempo di risposta [s]	10	10	< 0.01	N.C. *
	SNR [$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$]	12	0.1	> 1	< 1
Sensori di temperatura	Range di misura [$^{\circ}\text{C}$]	-	-100/200	N.C.	-2/30
	Risoluzione [$^{\circ}\text{C}$]	-	N.D.	N.C.	≤ 0.1
Sistema di acquisizione	Risoluzione [dB]	16	24	≥ 16	≥ 24
	Modalità di acquisizione** [-]	Trig	Cont	Trig	Cont
Elaborazione	OMA automatica [sì/no]	No	Sì	No	Sì
	Compensazione effetti ambientali [sì/no]	No	Sì	No	Sì
	Doppia integrazione accelerazioni [sì/no]	Sì	No	Sì	No

* N.D. sta per “non disponibile”; N.C. sta per “non critico”; C. sta per “critico”.

** Modalità di acquisizione: continua (cont), programmata (prog), manuale (man), a soglia (trig).

Il caso applicativo proposto evidenzia come il Sistema 1 risulti rispondente se applicato caso A, e scarsamente rispondente se applicato al caso B. Per il Sistema 2, viceversa, la rispondenza ai requisiti di monitoraggio è scarsa nel caso A, ed adeguata al caso B.

Dato l’obiettivo essenzialmente illustrativo del caso studio considerato rispetto all’applicabilità della procedura proposta, al fine del calcolo dell’ER si adopera esclusivamente l’approccio checklist. Se si considera la qualificazione del Sistema 1 nel Caso A, si ottiene $\text{ER} = 9/10 = 90\%$. Viceversa, se si considera il Sistema 1 nel Caso B, il valore di ER ottenuto è pari al 9%. Per il Sistema 2, il valore di ER più elevato si ottiene, come atteso, nel caso B, ed è pari all’81%; per il Caso A, il valore calcolato è $\text{ER} = 30\%$.

In definitiva, la procedura consente di ottenere i risultati attesi in termini di rispondenza dei due sistemi SHM rispetto ai due scenari considerati. La sua capacità di qualificazione è stata opportunamente valutata mediante l’applicazione al caso del dimostratore (OR6), come documentato nella relativa relazione finale.

5 IMPATTO ATTESO

La procedura di qualificazione proposta si configura come una possibile risposta alla crescente richiesta di qualificazione e/o validazione di sistemi di monitoraggio in ambito civile, stante la scarsa standardizzazione in tale contesto. Pertanto, essa può costituire un punto di partenza per lo sviluppo normativo di un approccio razionale alla qualificazione di sistemi SHM che potrebbe avere un impatto rilevante anche in ambito economico, stante l'esigenza degli stakeholders pubblici e privati di avere strumenti di supporto decisionale nella valutazione di soluzioni alternative o comunque competitive di monitoraggio strutturale.

6 CONCLUSIONI

L'intrinseca unicità dei sistemi SHM civili, progettati "case-by-case", rende estremamente difficoltoso il processo di standardizzazione che è alla base dei più consolidati approcci di certificazione. Tuttavia, l'esigenza di un processo di qualificazione di un sistema SHM risulta frequentemente invocato. Le attività condotte dal gruppo di lavoro nell'ambito dell'OR5, pertanto, hanno avuto come scopo principale la definizione di una procedura di qualificazione di sistemi di monitoraggio finalizzata ad ottenere una valutazione della rispondenza del sistema stesso rispetto ad uno scenario operativo di riferimento. A tal fine, le attività hanno previsto, innanzitutto, uno studio dettagliato dei sistemi di monitoraggio per opere civili, con riferimento alle loro componenti e procedure, mirato a identificare e caratterizzare le proprietà specifiche da considerare in ambito di qualificazione. Successivamente, è stata condotta un'analisi approfondita degli scenari di monitoraggio tipici dell'ambito civile, andando a caratterizzarne i parametri salienti rispetto a vari aspetti fino a definire le variabili del monitoraggio fondamentali. Infine, si è formulata e proposta una procedura di qualificazione "scenario-based" per la valutazione della rispondenza di un sistema di monitoraggio rispetto ad uno scenario predefinito.

I risultati ottenuti consentono di concludere che la strategia di qualificazione di sistemi SHM proposta rappresenta un risultato di significativa originalità nel contesto internazionale di settore, tenuto conto anche dei livelli non elevati di standardizzazione finora conseguiti, e può costituire un utile punto di partenza per uno sviluppo normativo organico nel settore. Tuttavia, la procedura di qualificazione applicata è da considerarsi, allo stato, ancora passibile di ulteriori sviluppi e miglioramenti. Infatti, sebbene i risultati ottenuti dalle applicazioni preliminari risultino promettenti, importanti approfondimenti appaiono necessari con particolare riferimento a: (i) la definizione sistematica di tutte le caratteristiche specifiche per le varie possibili componenti di un sistema di monitoraggio; (ii)

l'applicazione della procedura ad una pluralità di casi studio caratterizzati da differenti livelli di complessità. Tali aspetti potranno essere oggetto di indagine nell'ambito di future attività di ricerca.

7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] UNI/TR 11634:2016, Linee guida per il monitoraggio strutturale, Ente nazionale italiano di unificazione, UNI, Roma.
- [2] International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (ISHMII), ISHMII SHM CODE Level I, General Principles, Definitions and Approaches, ISHMII Task Force on Standardization,
- [3] Fema, H. M. (2003). Mr3 technical manual. Multi-hazard loss estimation methodology earthquake model.
- [4] Park, Y. J., & Ang, A. H. S. (1985). Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. Journal of structural engineering, 111(4), 722-739.
- [5] CEN 2005 (2005) European Standard EN 1998-3, Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance. Part 3: assessment and retrofitting of buildings. European Committee for Standardization, Brussels
- [6] Chung, W. H., et al. "Structural monitoring of Tsing Ma Bridge using fiber Bragg grating sensors." Engineering Structures (2003): 144-146.
- [7] UNI CEI 70099:2008, Vocabolario Internazionale di Metrologia - Concetti fondamentali e generali e termini correlati (VIM), Ente nazionale italiano di unificazione, UNI, Roma.
- [8] IEC 60050-300:2001 International Electrotechnical Vocabulary – Electrical and electronic measurements and measuring instruments.
- [9] IEC 60050-161:1990, International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 161: Electromagnetic compatibility.
- [10] IEC 60050-702:1992, International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 702: Oscillations, signals and related devices.
- [11] IEC 60050-192:2015, International Electrotechnical Vocabulary – Part 192: Dependability.
- [12] IEC 60050-426:2020, International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 426: Explosive atmospheres
- [13] Rainieri, C., Fabbrocino, G. (2014). Operational modal analysis of civil engineering structures. Springer, New York, 142, 143.
- [14] <https://www.luchsinger.it/contents/products/catalogo-estensimetri-per-testing.pdf>
- [15] CENELEC - EN 50290-1-1, Communication Cables - Part 1-1: General.
- [16] CEI EN 50290-1-2, Communication cables - Part 1-2: Definitions
- [17] ISO 11898-1:2003, Road vehicles — Controller area network (CAN) — Part 1: Data link layer and physical signalling.
- [18] CEI EN 61158-1, Industrial communication networks - Fieldbus specifications Part 1: Overview and guidance for the IEC 61158 and IEC 61784 series
- [19] Ohtsu, M. e Sakata, Y., 'Nondestructive crack identification by acoustic emission analysis and ultrasonic frequency response', Nondestructive testing of concrete elements and structures, vol. 23, pp. 171-181, 1991.
- [20] ISO 22096:2007. Condition monitoring and diagnostics of machines — Acoustic emission.
- [21] Kishinoue, T., 'An experiment on the progression of fracture', JIshin, vol. 6, pp. 25-31, 1934
- [22] Mogi, K., 'Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to earthquake phenomena', Bulletin of Earthquake Research Institute, vol. 40, pp. 125-173, 1962
- [23] Kaiser, J., 'Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen' (Information and conclusions from the measurement of noises in tensile stressing of metallic materials), Archiv für das Eisenhüttenwesen, vol. 4, pp. 43-45, 1953.
- [24] Sagar, R. V., Prasad, B. R. (2012). A review of recent developments in parametric based acoustic emission techniques applied to concrete structures. Nondestructive Testing and Evaluation, 27(1), 47-68.
- [25] Ye, X. W., Su, Y. H., Han, J. P. (2014). Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: A comprehensive review. The Scientific World Journal, 2014.
- [26] Sikarwar, S., Singh, S., Yadav, B. C. (2017). Review on pressure sensors for structural health monitoring. Photonic Sensors, 7(4), 294-304.
- [27] La Mendola, L., Oddo, M. C., Papia, M., Pappalardo, F., Pennisi, A., Bertagnoli, G., Di Trapani F., Monaco A., Parisi F., Barile, S. (2021). Performance of two innovative stress sensors imbedded in mortar joints of new masonry elements. Construction and Building Materials, 297, 123764.
- [28] Behnia, A., Chai, H. K., & Shiotani, T. (2014). Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission. Construction and Building Materials, 65, 282-302.

- [29] Nagayama T., Sim S.H., Miyamori Y., Spencer B.F. Jr. (2007). Issues in structural health monitoring employing smart sensors, *Smart Structures and Systems*, Vol. 3, pp. 299-329.
- [30] Krishnamurthy V., Fowler K. & Sazonov E. (2008). The effect of time synchronization of wireless sensors on the modal analysis of structures, *Smart Materials and Structures*, Vol. 17.
- [31] Lasassmeh S.M. & Conrad J.M. (2010). Time synchronization in wireless sensor networks: a survey, *Proceedings of The IEEE SoutheastCon Conference 2010*, pp. 242-245.
- [32] Ranganathan P. & Nygard K. (2010). Time synchronization in wireless sensor networks: a survey, *International Journal of UbiComp*, Vol. 1, pp. 92-102.
- [33] A. Tokogonon, C., Gao, B., Tian, G. Y., Yan, Y. (2017). Structural health monitoring framework based on internet of things: a survey. *IEEE Internet of Things J* 4 (3): 619–635.
- [34] F. Abate, M. Carratù, C. Liguori e V. Paciello, "Un misuratore di potenza intelligente a basso costo per IoT", *Misurazione: J. Int. Mea. Confederation*, vol. 136, pp. 59-66, 2018.
- [35] L. Angrisani, F. Bonavolontà, A. Liccardo, R. Schiano Lo Moriello, e F. Serino, "Contatori di potenza intelligenti in ambiente di realtà aumentata per la consapevolezza dei consumi elettrici- *Energie* - 11, n. 2303, 2018.
- [36] F. Abate, M. Carratù, C. Liguori, M. Ferro e V. Paciello, "Smart meter for the IoT", in *Proc. (I2MTC)*, pp. 1-6, 2018.
- [37] L. Angrisani, P. Arpaia, F. Bonavolontà e R. Schiano Lo Moriello, "Academic FabLabs for industry 4.0: experience at University of Naples Federico II", *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, vol. 2018.
- [38] G. Betta, G. Cerro, M. Ferdinandi, L. Ferrigno e M. Molinara, "Rilevamento e classificazione dei contaminanti attraverso una piattaforma personalizzata basata sull'IoT: un caso di studio", *IEEE Instrum. Mag.*, vol. 22, n. 6, pp. 35-44, dicembre 2019.
- [39] L. Angrisani, F. Bonavolontà, A. Liccardo e R. Schiano Lo Moriello, "Sull'uso della tecnologia LORA per la selettività logica nelle reti di distribuzione MV," *Energie*, vol. 11, n. 3079, 2018.
- [40] Magrin, D., Centenaro, M., & Vangelista, L. (2017, May). Performance evaluation of LoRa networks in a smart city scenario. In *2017 IEEE International Conference on communications (ICC)* (pp. 1-7). iee.
- [41] C. Orfanidis, L.M. M Feeney. Jacobsson, e P. Gunningberg, " Investigating interference between LoRa and IEEE 802.15. Reti 4g" in *Proc. (WiMob)*, pp. 1-8, 2017.
- [42] D. Capriglione, G. Cerro, L. Ferrigno e G. Miele, "Effects of real instrument performance of a energy detection-based spectrum sensing method", *IEEE Trans.*
- [43] D. Capriglione, G. Cerro, L. Ferrigno, G. Miele, "Analisi performance di uno schema di rilevamento dello spettro a due fasi per l'accesso allo spettro dinamico nelle bande TV", *Measurement*, vol. 135, pp. 661-671, 2019.
- [44] D. Capriglione, G. Cerro, L. Ferrigno, G. Miele, "Analisi e implementazione di un metodo di rilevamento dello spettro basato su wavelet per scenari SNR bassi", in *Proc. On World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, (WoWMoM)*, 7523585, 2016.
- [45] G. Betta, D. Capriglione, L. Ferrigno, G. Miele, "Influence of Wi-Fi computer interfaces on measurement apparatuses", *IEEE Trans. Mea.*, vol.
- [46] L. Angrisani e M. Vadursi. "Misurazioni interstrato per una caratterizzazione completa delle reti wireless in presenza di interferenze", *IEEE Trans. Mea.*, vol. 1148-1156, 2007.
- [47] R. H. Myers, D.C. Montgomery e C.M. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Designed Experiments*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley and Sons, 2016.
- [48] Wortmann, F.; Flüchter, K. Internet of things: technology and value added *Bus. Inf. Syst. Eng* 2015, 57, 211–214.
- [49] Atzori, L.; Iera, A.; Morabito, G. The internet of things: A survey. *Computer networks* 2010, 54, 2787–2805.
- [50] Bor, M.C.; Roedig, U.; Voigt, T.; Alonso, J.M. Do LoRa low-power wide-area networks scale? *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. ACM, 2016, pp. 59–67.
- [51] Centenaro, M.; Vangelista, L.; Zanella, A.; Zorzi, M. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications* 2016, 23, 60–67.
- [52] LoRa Alliance. LoRa Alliance Website. <http://www.lora-alliance.org>, 2017 (accessed March 2018)
- [53] Sanchez-Iborra, R.; Cano, M.D. State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services. *Sensors* 2016, 16, 708.
- [54] M. Carratù, M. Ferro, A. Pietrosanto and V. Paciello, "Smart Power Meter for the IoT," *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Porto, 2018, pp. 514-519.

- [55] Carratù, M., Ferro, M., Pietrosanto, A., & Sommella, P. (2017). Adopting smart metering RF networks for particulate matter distributed measurements. Paper presented at the 7th IMEKO TC19 Symposium on Environmental Instrumentation and Measurements, EnvIMEKO 2017, , 2017-August 50-55.
- [56] Semtech. Signal Concentrator Device. US US20160020932A1, 2016.
- [57] Keysight Technologies. The Internet of Things: Enabling Technologies and Solutions for Design and Test. Application Note 5992-1175EN, Keysight, <https://www.keysight.com>, 2017.
- [58] Rohde & Schwarz supports LoRa product testing for development and production. Press Release, Rohde & Schwarz, <https://www.rohde-schwarz.com>, 2016.
- [59] Tektronix. Wireless Connectivity Test. Application Note 37W-60960-0, Tektronix, <http://www.tek.com>, 2017.
- [60] Schweiger, K.; Zimmermann, H. Low-Voltage Low-Power Highly Linear Down-Sampling Mixer in 65nm Digital CMOS Technology. 2008 11th IEEE Workshop on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems, 2008, pp. 1–4.
- [61] Angrisani, L., Capriglione, D., Cerro, G., Ferrigno, L., Miele, G., On employing a Savitzky-Golay filtering stage to improve performance of spectrum sensing in CR applications concerning VDSA approach (2016) Metrology and Measurement Systems, 23 (2), pp. 295-308.
- [62] Capriglione, D., Cerro, G., Ferrigno, L., Miele, G., Analysis and implementation of a wavelet-based spectrum sensing method for low SNR scenarios, (2016) WoWMoM 2016 - 17th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks.
- [63] Angrisani, L., Capriglione, D., Cerro, G., Ferrigno, L., Miele, G., Optimization and experimental characterization of novel measurement methods for wide-band spectrum sensing in cognitive radio applications, (2016) Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 94, pp. 585-601.
- [64] M. Carratù, A. Pietrosanto, P. Sommella and V. Paciello, "Semi-active suspension system for motorcycles: From the idea to the industrial product," 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Houston, TX, 2018, pp. 1-6.
- [65] D. Capriglione, M. Carratù, A. Pietrosanto and P. Sommella, "Real-time implementation of an IFD scheme for motorcycle sensors," 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Houston, TX, 2018, pp. 1-6.
- [66] Angrisani, L.; Vadursi, M. On the optimal sampling of bandpass measurement signals through data acquisition systems. Measurement Science and Technology 2008, 19, 045102.
- [67] Candès, E.J.; Wakin, M.B. An introduction to compressive sampling. IEEE signal processing magazine 2008, 25, 21–30.
- [68] Haupt, J.; Castro, R.; Nowak, R.; Fudge, G.; Yeh, A. Compressive sampling for signal classification. Signals, Systems and Computers, 2006. ACSSC'06. Fortieth Asilomar Conference on. IEEE, 2006, pp. 1430–1434.
- [69] Wimalajeewa, T.; Chen, H.; Varshney, P.K. Performance limits of compressive sensing-based signal classification. IEEE Transactions on Signal Processing 2012, 60, 2758–2770.
- [70] Angrisani, L.; Bonavolontà, F.; D'Apuzzo, M.; Schiano Lo Moriello, R.; Vadursi, M. A compressive sampling-based method for power measurement of band-pass signals. Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013 IEEE International. IEEE, 2013, pp. 102–107.
- [71] Angrisani, L.; Bonavolontà, F.; Liccardo, A.; Schiano Lo Moriello, R.; Ferrigno, L.; Laracca, M.; Miele, G. Multi-channel simultaneous data acquisition through a compressive sampling-based approach. Measurement 2014, 52, 156 – 172.
- [72] Bonavolontà, F.; D'Apuzzo, M.; Liccardo, A.; Vadursi, M. New Approach Based on Compressive Sampling for Sample Rate Enhancement in DASs for Low-Cost Sensing Nodes. Sensors 2014, 14, 18915–18940.
- [73] Bonavolontà, F.; D'Apuzzo, M.; Liccardo, A.; Miele, G. A compressed sampling-based method compliant with IEC 61000-4-30 for harmonic and interharmonic measurements. 20th IMEKO TC4 International Symposium and 18th International Workshop on ADC Modelling and Testing Research on Electric and Electronic Measurement for the Economic Upturn, 2014.
- [74] De Vito, L.; Dobre, O.A. A compressive sampling-based method for classification and parameter estimation of FSK signals. Measurement 2017, 98, 439–444.
- [75] Chang, K.; Jang, J.S.; Iliopoulos, C. Music Genre Classification via Compressive Sampling. 11th International Society for Music Information Retrieval Conference, ISMIR 2010, Utrecht, Netherlands, 2010, pp. 387–392.
- [76] Angrisani, L.; Arpaia, P.; Bonavolontà, F.; Conti, M.; Liccardo, A. LoRa protocol performance assessment in critical noise conditions. Research and Technologies for Society and Industry (RTSI), 2017 IEEE 3rd International Forum on. IEEE, 2017, pp. 1–5.

- [77] Angrisani, L.; Bonavolontà, F.; Liccardo, A.; Schiano Lo Moriello, R. On the Use of LoRa Technology for Logic Selectivity in MV Distribution Networks. *Energies* 2018, 11, 3079.
- [78] Ruano Lin, E. LoRa protocol. Evaluations, limitations and practical test. Master's thesis, Institut national polytechnique de Grenoble, 2016.
- [79] Haxhibeqiri, J.; De Poorter, E.; Moerman, I.; Hoebeke, J. A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application. *Sensors* 2018, 18, 3995.
- [80] Baraniuk, R.G. Compressive sensing [lecture notes]. *IEEE signal processing magazine* 2007, 24, 118–121.
- [81] Razavi, S.A.; Ollila, E.; Koivunen, V. Robust greedy algorithms for compressed sensing. 2012 Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2012, pp. 969–973.
- [82] Yu, G.; Zhou, Y. General linear chirplet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2016, 70, 958–973.
- [83] Mann, S.; Haykin, S. The chirplet transform: Physical considerations. *IEEE Transactions on Signal Processing* 1995, 43, 2745–2761.
- [84] Peng, Z.; Meng, G.; Chu, F.; Lang, Z.; Zhang, W.; Yang, Y. Polynomial chirplet transform with application to instantaneous frequency estimation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2011, 60, 3222–3229.
- [85] Hsiao, Y.H.; Chen, C.C. Over-atoms accumulation orthogonal matching pursuit reconstruction algorithm for fish recognition and identification. *Pattern Recognition (ICPR)*, 2016 23rd International Conference on. IEEE, 2016, pp. 1071–1076.
- [86] Tropp, J.A.; Gilbert, A.C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit. *IEEE Transactions on information theory* 2007, 53, 4655–4666.
- [87] Needell, D.; Vershynin, R. Signal recovery from incomplete and inaccurate measurements via regularized orthogonal matching pursuit. *arXiv preprint arXiv:0712.1360* 2007.
- [88] Dai, W.; Milenkovic, O. Subspace pursuit for compressive sensing signal reconstruction. *IEEE transactions on Information Theory* 2009, 55, 2230–2249.
- [89] Needell, D.; Tropp, J.A. CoSaMP: iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples. *Communications of the ACM* 2010, 53, 93–100.
- [90] Blumensath, T.; Davies, M.E. Gradient pursuits. *IEEE Transactions on Signal Processing* 2008, 56, 2370–2382.
- [91] Angrisani, L.; Schiano Lo Moriello, R. Estimating ultrasonic time-of-flight through quadrature demodulation. *IEEE transactions on instrumentation and measurement* 2006, 55, 54–62.
- [92] Angrisani, L.; D'Arco, M.; Schiano Lo Moriello, R.; Vadursi, M. On the use of the warble transform for instantaneous frequency estimation. *Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No. 04CH37510)*. IEEE, 2004, Vol. 2, pp. 935–940.
- [93] George, G.; Oommen, R.M.; Shelly, S.; Philipose, S.S.; Varghese, A.M. A Survey on Various Median Filtering Techniques for Removal of Impulse Noise From Digital Image. 2018 Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS), 2018, pp. 235–238.
- [94] L. Angrisani, D. Capriglione, G. Cerro, L. Ferrigno, G. Miele, “The effect of Savitzky-Golay smoothing filter on the performance of a vehicular dynamic spectrum access method”, in *proc. of 20th IMEKO TC4 Symposium on Measurements of Electrical Quantities: Research on Electrical and Electronic Measurement for the Economic Upturn, Together with 18th TC4 International Workshop on ADC and DCA Modeling and Testing, IWADC 2014*, pp. 1116–1121.
- [95] G. Betta, D. Capriglione, G. Cerro, L. Ferrigno and G. Miele, “The effectiveness of Savitzky-Golay smoothing method for spectrum sensing in cognitive radios,” 2015 XVIII AISEM Annual Conference, Trento, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/AISEM.2015.7066819
- [96] Vishaga, S.; Das, S.L. A survey on switching median filters for impulse noise removal. 2015 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies, 2015, pp.1–6.
- [97] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (2020). Linee Guida per la Classificazione e Gestione del Rischio, la Valutazione della Sicurezza ed il Monitoraggio dei Ponti Esistenti. https://www.mit.gov.it/sites/default/files/media/notizia/2020-05/1_Testo_Linee_Guida_ponti.pdf.
- [98] Celebi, M. (2007). Health monitoring of buildings using threshold drift ratios - now an established method. The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure Vancouver, British Columbia, Canada.
- [99] Park, K.T., Kim, S.H., Park, H.S., and Lee, K.W. (2004). The determination of bridge displacement using measured acceleration. *Engineering Structures* 27, 371–378.

- [100] Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems (COSMOS). (2009). Strong motion record processing guidelines. (<http://www.cosmos-eq.org/recordProcessingPapers.html>).
- [101] Skolin, D. and Wallace, J.W. (2010). A critical assessment of interstory drift measurements. *Journal of structural engineering* 136, 1574-1584.
- [102] Naeim, F., Lee, H., Bhatia, H., Hagie, S., and Skliros, K. (2005b). CSMIP instrumented building response analysis and 3D visualization—Technical manual, John A. Martin & Associates, Inc., Los Angeles.
- [103] Skolnik, D., Nigbor, R. and Wallace, J. W. (2009). A quantitative basis for strong motion instrumentation specifications. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99, 3275–3283.
- [104] Yu, E., Skolnik, D., Whang, D., and Wallace, J. W. (2008). Forced vibration testing of a four story RC building utilizing the nees@UCLA mobile field laboratory. *Earthquake Spectra*, 24-4, 969–995.
- [105] Ansari, F. (2007). Practical implementation of optical fiber sensors in civil structural health monitoring. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18, 879–889.
- [106] Casas, J. R., and Cruz, P. J. S. (2003). Fiber optic sensors for bridge monitoring. *Journal of Bridge Engineering*, 8(6), 362–373.
- [107] Celebi, M., and Sanli, A. (2002). GPS in pioneering dynamic monitoring of long-period structures. *Earthquake Spectra*, 18, 47–61.
- [108] Tamura, Y., Matsui, M., Pagnini, L. C., Ishibashi R., and Yoshida A. (2002). “Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS.” *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 90(15), 1783–1793.
- [109] Nakamura, S. (2000). GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements. *Journal of Structural Engineering*, 126, 1413–1419.
- [110] Wahbeh, M. A., Caffrey, J. P., and Masri, S. F. (2003). A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems. *Smart Material and Structures*, 12, 785–794.
- [111] Bennett, K. D., and Batrone, C. B. (1997). Interstory drift monitoring in smart buildings using laser crosshair projection. *Optical Engineering*, 36, 1889–1892.
- [112] Schakoff R.J. (1992). *Pattern Recognition: Statistical, Structural and Neural Approaches*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, Sussex.
- [113] Farrar C., Doebling S. & Nix D. (2001). Vibration-based structural damage identification. *Philosophical Transaction A*, 359 (1778), 131.
- [114] Doebling S., Farrar C., Prime M. & Shevitz D. (1996). *Damage identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: a literature Review*. Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS, available online from Los Alamos National Laboratory, <http://library.lanl.gov/>.
- [115] Sohn H., Farrar C., Hemez F. et al. (2004). *A Review of Structural Health Monitoring Literature from 1996-2001*. Los Alamos National Laboratory Report LA-13976-MS, available online from Los Alamos National Laboratory, <http://library.lanl.gov/>.
- [116] Friswell M.I. & Mottershead J.E. (1995). *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- [117] Rytter A. (1993). *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structure*. Build Technology and Structural Engineering. Aalborg University, Aalborg, Denmark.
- [118] Worden K., Farrar C., Manson G. & Park G. (2007). The fundamental axiom of structural health monitoring. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 463(2082), 1639-1664.
- [119] Farrar C.R. & Worden K. (2012). *Structural Health Monitoring - a machine learning perspective*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
- [120] Cawley P. & Adams R. (1979). The locations of defects in structures from measurements of natural frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, 224(2), 359-374.
- [121] Rainieri. C., Fabbrocino, G. (2010) “Automated output-only dynamic identification of civil engineering structures,” *Mech Syst Sig Process* ; 24: 678-695.
- [122] Rainieri. C., Fabbrocino, G., Cosenza, E. (2011) “Near real-time tracking of dynamic properties for standalone structural health monitoring systems,” *Mech Syst Sig Process*; 25: 3010-3026.
- [123] Rainieri. C., Fabbrocino, G. [2010] “Automated output-only dynamic identification of civil engineering structures,” *Mech Syst Sig Process* ; 24: 678-695.

- [124] Rainieri, C., Fabbrocino, G., Cosenza, E. [2011] “Integrated seismic early warning and structural health monitoring of critical civil infrastructures in seismically prone areas,” *Struct Health Monit* ; 10: 291-308.
- [125] Reynders, E., Houbrechts, J., De Roeck, G. [2012] “Fully automated (operational) modal analysis,” *Mech Syst Sig Process* ; 29: 228-250.
- [126] Devriendt, C., El-Kafafy, M., Weijtjens, W., De Sitter, G., Guillaume, P. [2014] “Evaluation of different automated operational modal analysis techniques for the continuous monitoring of offshore wind turbines,” In: *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EUROODYN 2014, Porto, Portugal, 30 June - 2 July 2014*, pp. 2239-2246.
- [127] Weijtjens, W., De Sitter, G., Devriendt, C., Guillaume, P. [2014] “Automated transmissibility based operational modal analysis for continuous monitoring in the presence of harmonics,” In: *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EUROODYN 2014, Porto, Portugal, 30 June - 2 July 2014*, pp. 2231-2238.
- [128] Devriendt, C., El-Kafafy, M., Weijtjens, W., De Sitter, G., Guillaume, P. [2014] “Evaluation of different automated operational modal analysis techniques for the continuous monitoring of offshore wind turbines,” In: *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EUROODYN 2014, Porto, Portugal, 30 June - 2 July 2014*, pp. 2239-2246.
- [129] Peeters, B., Van der Auweraer, H., Guillaume, P., Leuridan, J. [2004] “The PolyMAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation?,” *Shock Vib* ; 11: 395-409.
- [130] Reynders, E., De Roeck, G. [2008] “Reference-based combined deterministic–stochastic subspace identification for experimental and operational modal analysis,” *Mech Syst Sig Process*; 22: 617-637.
- [131] Verboven, P., Parloo, E., Guillaume, P., Van Overmeire, M. [2002] “Autonomous structural health monitoring. Part I: Modal parameter estimation and tracking,” *Mech Syst Sig Process*; 16: 637-657.
- [132] Scionti, M., Lanslots, J.P. [2004] “Stabilization diagrams: pole identification using fuzzy clustering techniques,” *Adv Eng Software*; 36: 768-779.
- [133] Häckell, M.W., Rolfes, R. [2013] “Monitoring a 5 MW offshore wind energy converter – Condition parameters and triangulation based extraction of modal parameters,” *Mech Syst Sig Process* ; 40: 322-343.
- [134] Peeters, B., De Roeck, G. [1999] “Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis,” *Mech. Sys. Sig. Proc.* 13, 855-878.
- [135] Megalhaes, F., Cunha, A., Caetano, E. [2008] “Dynamic monitoring of a long span arch bridge,” *Eng. Struct.* 30(11), 3034–3044.
- [136] Tan, P.N., Steinbach, M., Kumar, V. [2006] *Introduction to data mining*. Reading: Pearson Addison-Wesley, p. 769.
- [137] Cardoso, J.F., Souloumiac, A. [1996] “Jacobi angles for simultaneous diagonalization,” *SIAM J Matrix Anal A*; 17: 161-164.
- [138] Rainieri, C. [2014] “Perspectives of Second-Order Blind Identification for Operational Modal Analysis of Civil Structures,” *Shock Vib* ; Article ID 845106, p. 9.
- [139] Peeters, B. [2000] *System identification and damage detection in civil engineering*. Ph.D. Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- [140] Rainieri, C., Fabbrocino, G. [2014 a] “Influence of model order and number of block rows on accuracy and precision of modal parameter estimates in stochastic subspace identification,” *International Journal of Lifecycle Performance Engineering*; 1: 317-334.
- [141] Rainieri, C., Fabbrocino, G. [2014 b] *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures: An Introduction and Guide for Applications*, New York: Springer, p. 322.
- [142] Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P. [2001] “Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition,” *Smart Mater. Struct.* 10(2001) 441–445.
- [143] Rainieri, C., Fabbrocino, G., Verderame, G.M. [2013] “Non-Destructive Characterization And Dynamic Identification Of A Modern Heritage Building For Serviceability Seismic Analyses,” *NDT&E Int* ; 60: 17-31.
- [144] Srikantha Phani, A., Woodhouse, J. [2007] “Viscous damping identification in linear vibration,” *J Sound Vib* ; 303: 475-500.

- [145] Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shunk, D.D., Stinemates, D.W., Nadler, B.R. [2003] "A review of structural health monitoring literature: 1996-2001" Rep. No. LA-13976-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, N.M.
- [146] Fan, W., Qiao, P. [2011] "Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study," *Structural Health Monitoring*, 10(1): 83–29.
- [147] Yan, Y.J., Cheng, L., Wu, Z.Y., Yam, L.H. [2007] "Development in vibration-based structural damage detection technique," *Mechanical Systems and Signal Processing* 21 (5) (2007) 2198–2211.
- [148] Friswell, M.I. [2007] "Damage identification using inverse methods," *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 393–410.
- [149] Nakamura, M., Masri, S.F., Chassiakos, A.G., Caughey, T.K. [1998] "A method for non-parametric damage detection through the use of neural networks," *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, vol. 27, 997–1010.
- [150] Hung, S.L., Kao, C.Y. [2002] "Structural damage detection using the optimal weights of the approximating artificial neural networks," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 31: 217–234.
- [151] Farrar, C.R., Doebling, S.W. [1997] "An Overview of Modal-Based Damage Identification Methods," *EUROMECH 365 International Workshop: DAMAS 97, Structural Damage Assessment Using Advanced Signal Processing Procedures*, Sheffield, U.K.
- [152] Capecchi, D. and Vestroni, F. [1999] "Monitoring of structural systems by using frequency data," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 28: 447–461.
- [153] Topole, K.G., Stubbs, N. [1995] "Non-destructive damage evaluation of a structure from limited modal parameters," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 24: 1427–1436.
- [154] Wang, Z, Lin, R.M., Lim, M.K. [1997] "Structural damage detection using measured FRF data," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 147:187–197.
- [155] Xu, Z.D., Wu, Z. [2007] "Energy damage detection strategy based on acceleration responses for long-span bridge structures," *Engineering Structures*, 29: 609-617.
- [156] Sampaio, R.P.C., Maia, N.M.M., Silva, J.M.M. [1999] "Damage detection using the frequency response function curvature method," *Journal of Sound and Vibration* 226(5), 1029 1042.
- [157] Ratcliffe, C.P. [1997] "Damage Detection Using A Modified Laplacian Operator On Mode Shape Data," *Journal of Sound and Vibration* 204(3), 505 517.
- [158] Limongelli, M.P. [2011] "The interpolation damage detection method for frames under seismic excitation," *Journal of Sound and Vibration*, 330. 5474–5489.
- [159] Limongelli, M.P. [2010] "Frequency response function interpolation for damage detection under changing environment," *MSSP* doi:10.1016/j.ymssp.2010.03.004.
- [160] Domaneschi, M., Limongelli, M.P., Martinelli, L. [2013] "Multi-Site Damage Localization in a Suspension Bridge via Aftershock Monitoring," *International Journal of Earthquake Engineering*, 3, pp. 56-72.
- [161] Limongelli, M.P. [2013] "Two dimensional damage localization using the interpolation method," *DAMAS 2013*. Dublin, July 8-10, 2013.
- [162] Limongelli, M.P. [2014] "Seismic health monitoring of an instrumented multistorey building using the Interpolation Method," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 43, pp1581-1602. doi: 10.1002/eqe.2411.
- [163] Rohrmann R. G., Baessler M., Said S., Schmid W. & Ruecker W. F. (2000). Structural Causes of Temperature Affected Modal Data of Civil Structures Obtained by Long Time Monitoring. In *Proceedings of IMAC 18, International Modal Analysis Conference*, San Antonio, TX, USA.
- [164] Johnson R A & Wichern D W (1992). *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice Hall.
- [165] Montgomery D (2005). *Introduction to Statistical Quality Control*. John Wiley & Sons.
- [166] Magalhães, F., Cunha, Á., & Caetano, E. (2012). Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection. *Mechanical Systems and signal processing*, 28, 212-228.
- [167] Farrar, C.R., Cornwell, P.J., Doebling, S.W., Prime, M.B. (2000) *Structural Health Monitoring Studies of the Alamosa Canyon and I-40 Bridges*. Los Alamos National Laboratory Report LA-13635-MS.

- [168] Nigbor, R.L., Diehl, J.G. (1997) Two years experience using OASIS Real-Time remote condition monitoring system on two large bridges. Structural Health Monitoring: Current Status and Perspective, Technomic Publishing, Palo Alto, CA.
- [169] Chang, P.C., Flatau, A., Liu, S.C.: Health monitoring of civil infrastructure. Struct. Health Monit. 2(3), 257–267 (2003).
- [170] Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 Laying Down Harmonised Conditions for the Marketing of Construction Products and Repealing Council Directive 89/106/EEC. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32011R0305>
- [171] IM-SAFE. www.im-safe-project.eu, <https://www.linkedin.com/company/im-safe-project/>, <https://cordis.europa.eu/project/id/95817>.
- [172] Council Directive 89/106/EEC of 21 December 1988 on the Approximation of Laws, Regulations and Administrative Provisions of the Member States Relating to Construction Products, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:31989L0106>.
- [173] NTC, 2018. D. M. 17-01-2018, “Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»”. Supplemento ordinario alla “Gazzetta Ufficiale”, n. 42 del 20 febbraio 2018 - Serie generale.