

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

- Sede di Forlì -

CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA MECCANICA

Classe: LM-33

TESI DI LAUREA

In: Settore ING-IND/13 - Meccanica Applicata alle Macchine

**Analisi comparativa di tecniche di monitoraggio per la
rilevazione di perdite in condotte idriche**

CANDIDATO

Barbara Bravi

RELATORE

Prof. Marco Troncosi

CORRELATORI

Ing. Alberto Martini

Ing. Davide Nascetti

Anno Accademico 2012/2013

Sessione III

INDICE

Sommario	1
Introduzione	3
Capitolo 1- Analisi dei rumori e delle vibrazioni	5
1.1 Introduzione	5
1.2 Il moto d'onda	5
1.3 Le vibrazioni meccaniche	8
1.4 Le onde sonore	9
1.5 Accoppiamento fluido-struttura	10
1.5.1 Interazioni fluido-struttura in condotte riempite di liquido	13
Capitolo 2- Le Emissioni Acustiche	21
2.1 Introduzione	21
2.2 Lineamenti di teoria	23
2.3 La propagazione delle onde di AE	26
2.3.1 L'attenuazione	28
2.3.2 La velocità d'onda	32
2.4 Struttura dei segnali	34
2.5 Segnali di AE e parametri fondamentali	37
2.6 Rilievo	42
2.7 Architettura e strumentazione	46
2.8 Vantaggi e svantaggi	46
2.9 Analisi dei parametri di AE	48
2.9.1 Analisi dei parametri di AE nella propagazione di cricche	48
2.9.2 Analisi dei parametri di AE nella ricerca di perdite idriche	51
Capitolo 3- Metodi per la ricerca di perdite idriche in tubazioni in plastica	53
3.1 Introduzione	53
3.2 La gestione delle DMA	54
3.2.1 Perché usare le DMA	55
3.2.2 Teoria del controllo delle DMA	55
3.3 Teoria delle perdite	57
3.3.1 Stima delle perdite	61
3.4 Programma di controllo delle perdite	63

3.4.1 Verifiche dell'acqua	63
3.4.2 Indagini per il rilevamento di perdite	64
3.4.3 Attrezzatura per l'individuazione delle perdite	65
Capitolo 4- Analisi comparativa di segnali acquisiti tramite accelerometri e idrofono	75
4.1 Obiettivo della ricerca	75
4.2 Il circuito di prova	75
4.3 La catena di misura	77
4.3.1 L'accelerometro	78
4.3.2 L'idrofono	79
4.3.3 Le schede d'acquisizione	80
4.4 Esecuzione delle rilevazioni	81
Capitolo 5- Analisi dei segnali e risultati	85
5.1 L'algoritmo d'analisi	85
5.2 Risultati dell'analisi nel dominio del tempo	87
5.3 Risultati dell'analisi spettrale	97
5.4 Conclusioni	104
Capitolo 6- Monitoraggio di emissioni acustiche per il rilievo di perdite idriche	105
6.1 Obiettivo della ricerca	105
6.2 L'impianto sperimentale	105
6.3 Strumentazione utilizzata	106
6.3.1 Il sensore	107
6.3.2 USB AE Node	110
6.3.3 Il software	111
6.4 Esecuzione delle rilevazioni	111
Capitolo 7-Analisi dei segnali e risultati	115
7.1 Analisi dei segnali	115
7.2 Risultati dell'analisi nel dominio del tempo	116
7.3 Risultati dell'AE Parameter Analysis	128
7.4 Conclusioni	134
Conclusioni e sviluppi futuri	137
Appendice A- Uso del software AEwin	139
Bibliografia	149

SOMMARIO

In molti sistemi di distribuzione idrici una percentuale significativa di acqua viene persa passando dagli impianti di trattamento alle utenze, a causa di danneggiamenti nei diversi componenti delle reti. Le perdite idriche sono un problema costoso, non solo in termini di spreco di una preziosa risorsa naturale, ma anche in termini economici.

L'obiettivo principale di questo lavoro è stato quello di identificare possibili sviluppi per le attrezzature e metodi già esistenti al fine di rilevare in modo automatico perdite idriche in condotte in plastica. A questo proposito è stata studiata l'efficacia di metodi basati sull'analisi di vibrazioni e suoni. In particolare ci si è concentrati sull'uso di accelerometri e idrofoni e, successivamente, sull'uso di sensori di emissioni acustiche.

Dopo una prima fase di ricerca approfondita sulla dinamica dei fenomeni vibro-acustici che si verificano nelle condotte, sulla teoria delle emissioni acustiche, sulla caratterizzazione di segnali di perdita in condotte in plastica e sulle principali attrezzature usate attualmente per l'individuazione delle perdite, si è passati alla fase sperimentale.

La fase sperimentale può essere distinta in due parti.

La prima ha avuto come obiettivo il confronto tra segnali acquisiti da accelerometro e idrofono relativamente all'efficacia nell'individuazione di perdite idriche mediante apposito algoritmo ed ha coinvolto numerosi test sul campo, eseguiti sotto condizioni controllate in un impianto di rilevamento perdite sperimentale, appositamente costruito, adiacente alla sede della Divisione Reti R & S di Hera a Forlì.

La seconda fase, invece, ha avuto come obiettivo la determinazione dell'efficacia del metodo delle emissioni acustiche per l'individuazione di perdite idriche ed ha visto l'esecuzione di altrettanti test, eseguiti sotto condizioni controllate, in un impianto sperimentale più semplice del precedente.

INTRODUZIONE

In molti sistemi di distribuzione idrici una percentuale significativa di acqua viene persa passando dagli impianti di trattamento alle utenze, a causa di danneggiamenti nei diversi componenti delle reti. Le perdite idriche sono un problema costoso, non solo in termini di spreco di una preziosa risorsa naturale, ma anche in termini economici. Inoltre le tubazioni danneggiate costituiscono un rischio per la salute pubblica, poiché ogni rottura è un potenziale punto di ingresso per i contaminanti nonché potenziale causa di danni alle strutture urbane. Per questi motivi i gestori delle reti idriche sono alla continua ricerca di metodi efficaci per il controllo delle perdite.

Essendo le reti di distribuzione idriche nel sottosuolo non è possibile individuare eventuali perdite con una semplice ispezione visiva fino a quando non sia evidente una fuoriuscita superficiale di acqua, con conseguente spreco di ingenti quantità di questa risorsa. Da qui la necessità di adottare tecniche che permettano l'individuazione automatica della perdita ancora prima che questa diventi visibile, in modo da procedere alla sua localizzazione e riparazione nel minor tempo possibile. Le tecniche per l'individuazione automatica di perdite prevedono un monitoraggio continuo dello stato della condotta e l'invio di un segnale al centro di controllo in caso di perdita.

Gli strumenti attualmente adottati nella maggior parte dei casi sono di natura vibro acustica, ossia permettono di individuare le perdite captando i suoni e le vibrazioni che queste producono.

Dichiarazione del problema

L'efficacia dei metodi e delle attrezzature vibro acustiche esistenti per l'individuazione delle perdite idriche è stata ampiamente dimostrata in passato. Generalmente queste attrezzature sono considerate soddisfacenti da molti gestori delle reti idriche solo nel caso di condotte metalliche, mentre per condotte in plastica essi sono scettici sull'efficacia di tali metodi. Infatti i problemi normalmente associati all'individuazione delle

perdite con metodi vibro acustici sono più accentuati nel caso di condotte in plastica. Questi problemi includono:

- Segnali interferenti derivanti dal traffico di veicoli pesanti e pedonale, dal flusso di acqua nelle condotte stesse e da rumori di perdite adiacenti
- Attenuazione del segnale lungo la condotta e nel terreno
- Insufficiente sensibilità o range di frequenza delle attrezzature di misura e di ascolto

Segnali interferenti semplicemente mascherano i suoni della perdita rendendoli difficili da individuare. Anche segnali significativamente attenuati possono passare inosservati dal momento che vengono facilmente mascherati dai segnali interferenti o perché scendono al di sotto del rumore di fondo dell'attrezzatura utilizzata. La gravità dei problemi per condotte in plastica è legato a due ragioni. Per prima cosa i segnali nelle condotte in plastica sono attenuati maggiormente rispetto al caso di condotte in metallo. In secondo luogo, le frequenze dominanti del segnale nelle condotte in plastica sono molto minori di quelle dominanti in condotte in metallo. Le attrezzature esistenti potrebbero non avere la sensibilità richiesta e/o un range di frequenza ampio tale da estendersi fino alle basse frequenze presenti in condotte in plastica.

Metodi efficaci sono necessari ai gestori dei sistemi idrici nei loro sforzi per controllare le perdite. Per condotte in plastica l'efficacia dei metodi esistenti non è ben stabilita e non è ben documentata dall'industria dell'acqua. Questi tipi di condotte, tuttavia, vengono sempre più utilizzate in sistemi idrici di tutto il mondo.

L'obiettivo principale di questo lavoro è stato quello di identificare possibili sviluppi per le attrezzature e metodi già esistenti al fine di rilevare in modo automatico perdite idriche in condotte in plastica. A questo proposito è stata studiata l'efficacia di metodi basati sull'analisi di vibrazioni e suoni. In particolare ci si è concentrati sull'uso di accelerometri e idrofoni e, successivamente, sull'uso di sensori di emissioni acustiche.

CAPITOLO 1

ANALISI DEI RUMORI E DELLE VIBRAZIONI

1.1 Introduzione

Rumori e vibrazioni sono spesso trattati separatamente nello studio della dinamica e talvolta ci si dimentica che in realtà i due aspetti sono correlati: semplicemente rumori e vibrazioni si riferiscono al trasferimento di energia molecolare in mezzi differenti (generalmente in fluidi e solidi rispettivamente). Nel trattare il problema della ricerca di perdite idriche in condotte tramite l'analisi di vibrazioni e rumori risulta necessario considerare questi due argomenti contemporaneamente. Per fare questo bisogna considerare il concetto di dualità onda-modo, in particolare risulta conveniente pensare al rumore in termini di onde e alle vibrazioni in termini di modi (che sono due punti di vista diversi per guardare lo stesso fenomeno fisico). La dinamica delle vibrazioni meccaniche può quindi essere studiata sia in termini di onde che in termini di modi. Le vibrazioni hanno a che fare (così come il rumore) con il comportamento oscillatorio dei corpi e affinché questo moto oscillatorio esista, un corpo deve possedere inerzia ed elasticità. L'inerzia permette a un elemento all'interno del corpo di trasferire momento dinamico agli elementi adiacenti ed è legata alla densità. L'elasticità è la proprietà secondo la quale esercitando su un elemento una forza che tende a spostarlo, questo tende a ritornare nella sua posizione di equilibrio una volta cessata l'azione di questa forza. Quindi il rumore è legato al moto oscillatorio in fluidi mentre le vibrazioni sono legate al moto oscillatorio in solidi.

1.2 Il moto d'onda

Per capire al meglio il processo che sta alla base dei concetti appena illustrati è necessario considerare il moto d'onda.

Questo può essere descritto come un fenomeno tramite il quale una particella perturbata va a collidere con quelle adiacenti trasferendo ad esse momento dinamico. Dopo questa collisione, le particelle oscillano attorno alle loro posizioni di equilibrio senza avanzare in nessuna particolare

direzione (non c'è trasporto netto di particelle nel mezzo). Il disturbo comunque si propaga con una velocità caratteristica del mezzo stesso, della cinematica del disturbo e di eventuali forze esterne al mezzo. Il moto d'onda può essere descritto usando sia modelli molecolari che particulati. I primi sono complessi e ingombranti, perciò in generale si preferisce utilizzare i secondi per l'analisi di rumore e vibrazioni, intendendo per particulato un volumetto largo abbastanza da contenere milioni di molecole tale da essere considerato un mezzo continuo, ma abbastanza piccolo in modo che le variabili termodinamiche e acustiche siano costanti.

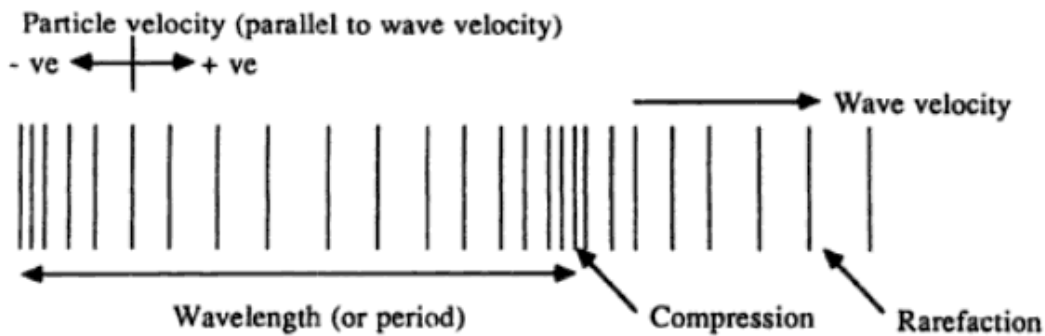
A questo punto è necessario ricordare che i solidi possono immagazzinare energia sia a taglio che a compressione, quindi diversi tipi di onde sono possibili in essi, come onde longitudinali, flessionali, onde di taglio e onde torsionali. Al contrario i fluidi possono immagazzinarla solo a compressione, quindi saranno presenti solo onde longitudinali. Il moto d'onda può essere derivato semplicemente dal bilancio tra le energie cinetica e potenziale, con quest'ultima immagazzinata in forme diverse per i diversi tipi d'onda. Le onde di compressione, ad esempio, immagazzinano energia in deformazioni longitudinali, mentre le onde flessionali la immagazzinano in deformazioni flessionali.

È possibile sintetizzare le proprietà dei principali tipi di moto d'onda che si incontrano nei solidi e nei fluidi. Per prima cosa, bisogna considerare due diverse velocità associate ad ogni tipo di moto d'onda armonico:

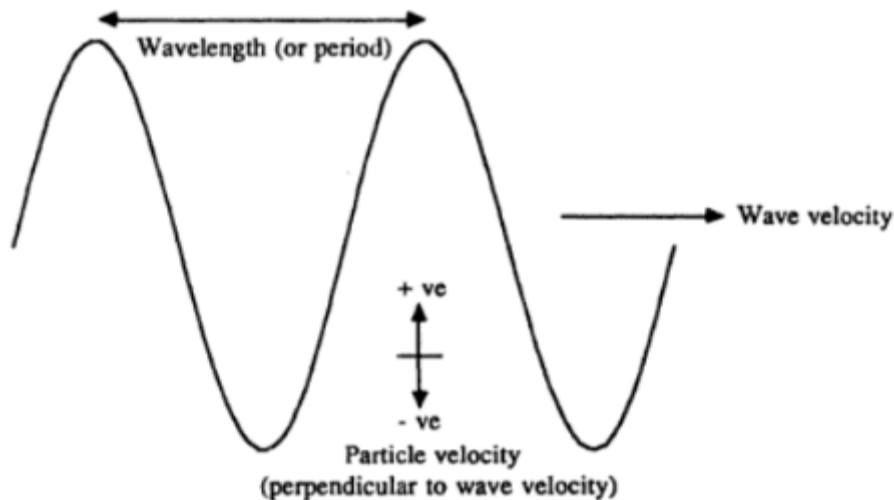
- Velocità alla quale il disturbo si propaga attraverso il mezzo
- Velocità delle particelle oscillanti nel mezzo (questa è una misura dell'ampiezza del disturbo che produce l'oscillazione ed è legata al livello di vibrazione o di pressione sonora misurata).

Questi due tipi di velocità associate alle onde armoniche sono rappresentate in figura 1.1 per il caso di moti d'onda longitudinale e flessionale su una superficie libera arbitraria. Per l'onda longitudinale ci sono regioni alternate di espansione e compressione delle particelle di massa e le velocità delle particelle e dell'onda sono nella stessa direzione. Sono onde di questo tipo le onde di propagazione del suono in aria e le onde longitudinali in barre ad esempio. Per l'onda flessionale la velocità di oscillazione delle particelle è perpendicolare alla direzione di propagazione

dell'onda. Sono moti d'onda di questo tipo i moti flessionali di piastre, gusci ecc.



a) Onda longitudinale



b) Onda flessionale

Figura 1.1- Illustrazione delle velocità d'onda e delle particelle

Le onde flessionali sono l'unico tipo di onde strutturali che contribuiscono direttamente alla radiazione di rumore all'esterno e alla trasmissione attraverso le strutture, proprio perché la velocità delle particelle (e quindi lo spostamento strutturale) è perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda, come si può notare dalla figura 1.1b. Questo produce un effettivo disturbo delle particelle di fluido adiacenti e risulta in un effettivo scambio di energia tra struttura e fluido. Inoltre, a differenza di tutti gli altri tipi di onde, la velocità delle onde flessionali varia con la frequenza. Questi concetti sono alla base del funzionamento delle strumentazioni acustiche attualmente più utilizzate nella ricerca di perdite idriche e descritte nel capitolo precedente.

1.3 Le vibrazioni meccaniche

Le vibrazioni possono essere studiate dal punto di vista del moto d'onda. Ogni sistema continuo (come ad esempio la condotta) ha le masse e le forze elastiche distribuite in modo continuo. Questi sistemi consistono in un infinito numero di particelle e richiedono quindi un infinito numero di coordinate per descrivere il moto (sono presenti un infinito numero di frequenze naturali e di modi di vibrare). Il sistema deve essere modellato in modo che il moto di ciascun punto nel sistema possa essere specificato in funzione del tempo. Le risultanti equazioni differenziali che descrivono il moto delle particelle sono le equazioni d'onda e descrivono la propagazione della stessa in un solido (o in un fluido nel caso di suoni).

La propagazione delle onde nei solidi è un argomento molto complesso ed è quindi necessario considerare solo quelle onde che sono direttamente rilevanti per lo studio delle vibrazioni. Si riporta di seguito un breve sommario di questi diversi tipi d'onda.

- *Onde puramente longitudinali*: questi tipi d'onda hanno spostamenti delle particelle solo nella direzione di propagazione dell'onda e avvengono generalmente in larghi volumi solidi (es. onde sismiche).
- *Onde quasi longitudinali*: hanno spostamenti delle particelle che non sono puramente nella direzione di propagazione dell'onda (es. onde longitudinali nel campo delle frequenze udibili in strutture ingegneristiche).
- *Onde piane trasversali*: esistono nei corpi solidi a causa della presenza di tensioni di taglio.
- *Onde torsionali*: esistono quando travi sono eccitate da momenti torsionali. (La velocità d'onda è identica a quella delle onde piane trasversali).
- *Onde puramente flessionali*: esistono quando la lunghezza d'onda è grande rispetto alle dimensioni della sezione della struttura.
- *Onde flessionali corrette*: gli effetti dell'inerzia di rotazione e deformazioni a taglio sono incluse in questi tipi di onde.
- *Onde di Rayleigh*: queste si verificano alle alte frequenze e in strutture larghe e spesse. Sono essenzialmente onde superficiali con l'ampiezza che diminuisce penetrando nella superficie. La velocità di queste onde è dello stesso ordine di grandezza delle onde trasversali

piane. Queste onde saranno importanti per una successiva analisi delle emissioni acustiche.

Secondo studi approfonditi è stato accertato che i due tipi d'onda importanti per lo studio di rumore e vibrazioni nel caso di condotte idriche risultano essere le onde quasi longitudinali e le onde puramente flessionali. Le onde quasi longitudinali (sia nel fluido che nella struttura) hanno velocità elevate (~ 5200 m/s per l'acciaio) e sono onde ad alta impedenza (essendo questa il rapporto tra l'ampiezza dell'onda e la velocità di oscillazione delle particelle). Le onde flessionali (solo nella struttura) hanno velocità che variano in funzione della frequenza (comunque significativamente minori di quella delle onde precedenti) e sono onde a bassa impedenza. In particolare le onde flessionali essendo a bassa impedenza permettono di trasmettere energia sonora oltre a quella vibrazionale. Le altre onde, invece, essendo ad alta impedenza, sono efficienti a trasmettere solo energia vibrazionale.

1.4 Le onde sonore

Il suono è un'onda di pressione che si propaga attraverso un mezzo elastico ad una certa velocità caratteristica. Si tratta di un trasferimento molecolare di energia e non può quindi passare attraverso il vuoto. Come detto prima, affinché il moto d'onda esista, il mezzo deve possedere inerzia ed elasticità e, mentre le vibrazioni sono legate a moti d'onda in elementi strutturali, il rumore è legato al moto d'onda in fluidi (liquidi e gas). In particolare ci sono due meccanismi fondamentali responsabili della generazione del rumore:

- *Vibrazione di corpi solidi* risultante nella generazione e nella radiazione di energia sonora – generalmente ci si riferisce a queste onde sonore col termine “*Structure-born sound*”
- *Rumori indotti nel flusso* risultanti da fluttuazioni di pressione provocate da turbolenze e da flussi non stazionari – generalmente ci si riferisce a queste onde col termine “*Fluid-born sound*” o suono aerodinamico.

Un esempio che combina entrambe i meccanismi di generazione del suono è proprio il flusso ad alta velocità di fluidi in condotte.

In caso di perdita due distinti rumori sono prodotti quando l'acqua in pressione fuoriesce dalla condotta.

Il primo è prodotto da un'onda d'urto ("shock wave") che si crea quando l'acqua è forzata ad uscire attraverso l'apertura (la pressione differenziale deve superare 15 psi affinché si generino sostanziali onde sonore tali da essere individuate). Questi suoni sono normalmente nel range di 500÷800 Hz e viaggiano a distanze notevoli, di conseguenza possono essere individuati a centinaia di piedi di distanza dal luogo reale di rottura.

Il secondo rumore generato è tipicamente nel range di 20÷250 Hz ed è prodotto dall'impatto del flusso dell'acqua col terreno che circonda la condotta, così come dall'acqua che circola attraverso la cavità causata dalla perdita. Queste onde viaggiano attraverso il terreno e sono quindi confinate a distanze molto più corte prima di essere attenuate e non essere più distinguibili dal rumore di fondo. Queste onde sonore a più bassa frequenza possono essere usate per aiutare ad individuare l'esatta posizione della rottura mentre l'operatore continua ad ascoltare con gli appositi strumenti lungo la condotta.

Ci sono molti suoni trasmessi dalle condotte come i rumori dell'acqua che si muove attraverso e attorno a varie pertinenze, rumori di pompaggio e rumori della strada. Ogni sistema di distribuzione ha la propria unica firma acustica che cambia da un punto del sistema ad un altro. Ci vuole tempo per riconoscere e capire i vari suoni che fanno parte del normale funzionamento del sistema. Gli strumenti acustici sono appunto progettati per assistere l'operatore nell'individuazione e identificazione di suoni caratteristici di perdite. Un operatore esperto con conoscenza del funzionamento del sistema di distribuzione è un fattore chiave per un'individuazione efficace.

1.5 Accoppiamento fluido-struttura

Precedentemente sono stati introdotti e discussi i concetti di dualità onda-modo. È necessario utilizzare l'approccio d'onda (*Fundamental Wave Approach*) per comprendere le caratteristiche essenziali delle vibrazioni meccaniche e come esse si legano alla trasmissione del suono. Queste interazioni tra onde sonore e vibrazioni meccaniche di strutture solide costituiscono una parte importante del controllo ingegneristico di rumori e

vibrazioni e si adattano molto bene peraltro al nostro problema di ricerca delle perdite tramite l'analisi delle vibrazioni.

Si riporta di seguito una tipica sezione di condotta (figura 1.2).

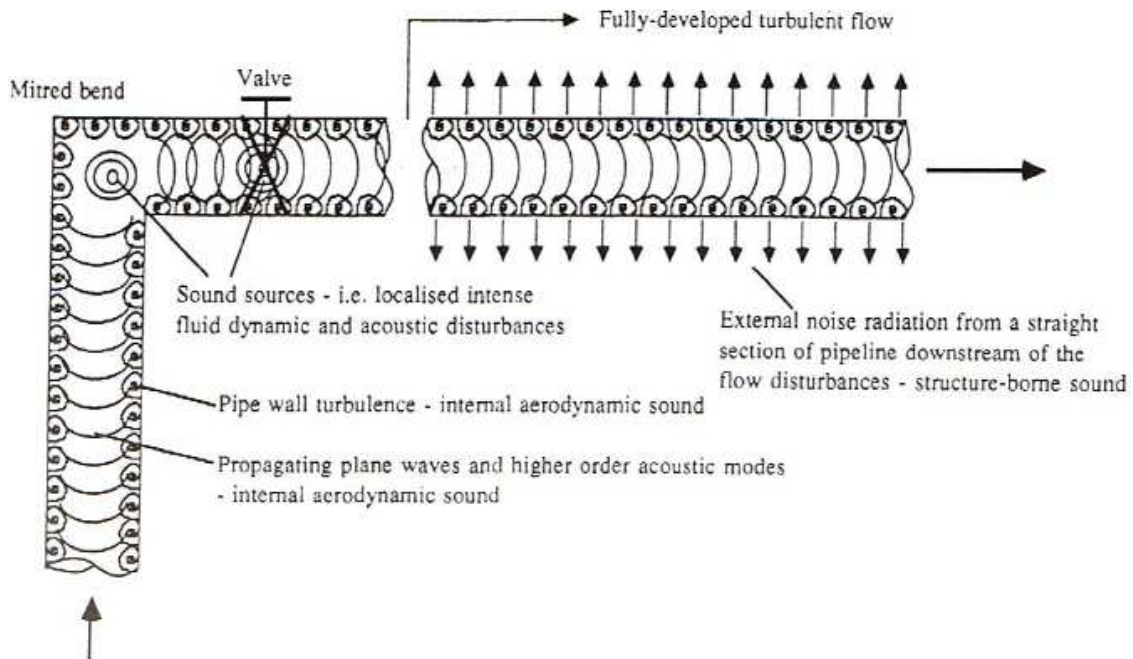


Figura 1.2- Modello schematico delle onde generate all'interno di una condotta idrica

In condizioni di funzionamento normale (assenza di perdita) mentre l'acqua scorre nella condotta, all'interno di questa si propagano onde di pressione piane e turbolenze a parete (suoni aerodinamici interni) per tutta la lunghezza della stessa alle quali si uniscono onde sonore generate da eventuali discontinuità del flusso (dovute ad esempio alla presenza di spigoli, valvole ecc) come si può notare nella figura 1.2.

In presenza di perdita oltre a questi fenomeni all'interno della condotta si aggiungono fluttuazioni di pressione causate dalle turbolenze e onde sonore generate appunto dalle discontinuità che la perdita stessa causa nel flusso. In particolare quando l'acqua in pressione fuoriesce dalla condotta (a causa della rottura) genera un suono che può viaggiare attraverso la parete della condotta.

In generale la perdita crea un getto turbolento il quale interagendo con la parete della condotta risulta in significative fluttuazioni di pressione turbolente generando così un rumore del flusso interno alla condotta che è aerodinamico – la sorgente del suono è distribuita lungo l'intera lunghezza

all'interno della condotta. Questo a sua volta eccita la struttura internamente e, di conseguenza, la struttura vibra e irradia rumore nel mezzo esterno circostante.

Inoltre l'acqua passando attraverso la rottura incrementa la sua velocità. Se questa è abbastanza alta la pressione nel punto della perdita può cadere al di sotto della tensione di vapore del liquido e formare bolle di vapore. Quando una bolla implode si creano onde d'urto le quali impattando contro la parete solida della tubazione risultano in rumori e vibrazioni. Il meccanismo di generazione del segnale di perdita può essere o a basse frequenze a causa della separazione del flusso instabile al punto di fuga o ad alte frequenze a causa della cavitazione. Questo verrà approfondito nel paragrafo successivo.

Fluttuazioni di pressione in prossimità di qualunque superficie genereranno un carico di radiazione acustica sulla superficie stessa (vibrazioni) che va ad aggiungersi a qualunque eccitazione meccanica della superficie che sarà la sorgente primaria di vibrazione. Se il mezzo fluido è un gas, il carico di radiazione acustica è generalmente molto basso e il campo di pressione sonora nelle regioni lontano dalla sorgente può essere stimato dalle velocità delle particelle delle onde flessionali sulla superficie della struttura. Se invece il mezzo fluido è un liquido (come nel caso di nostro interesse) allora il carico di radiazione acustica può diventare molto significativo e se ne deve tenere conto – questo carico modifica le forze che agiscono sulla struttura e bisogna tenere conto dell'accoppiamento fluido-struttura (la struttura si dice in questo caso “Fluid-loaded”).

Gli effetti del *Fluid-loading* su strutture vibranti sono i seguenti:

- Le frequenze naturali della struttura sono alterate (effetti maggiori si hanno per bassi numeri d'onda)
- Si verifica un forte accoppiamento tra fluido e struttura
- L'impedenza della struttura è alterata
- Le caratteristiche della sorgente sono modificate

1.5.1 Interazioni fluido-struttura in condotte riempite di liquido

Uno dei fenomeni che si verifica generalmente nelle condotte idriche in caso di perdite è il così detto *colpo d'ariete*. Questo è una forma di flusso non stazionario, generato da cambiamenti improvvisi delle condizioni inizialmente stazionarie del flusso legati a vari fenomeni come la rapida chiusura o apertura di valvole, l'accensione o spegnimento di pompe e appunto rotture nella condotta. A causa di ciò si verificano delle ampie variazioni di pressioni transitorie.

Il colpo d'ariete non porta solo ad alte pressioni, ma anche a basse pressioni le quali comportano il pericolo di crollo del tubo, specialmente nel caso di condotte interrate. Quando la pressione scende al di sotto di un certo valore, avviene il fenomeno della *cavitazione*. È necessario fare una distinzione tra cavitazione gassosa e vaporosa. La *cavitazione gassosa* avviene quando la pressione scende al di sotto della pressione di saturazione del gas. Questo è un processo relativamente lento se comparato alla *cavitazione vaporosa*, la quale avviene quando la pressione scende alla pressione del vapore. Questo tipo di cavitazione si forma nel liquido. Quando questa appare come piccole bolle disperse nel liquido in grandi lunghezze del tubo, si parla di cavitazione distribuita. Quando invece la cavitazione si fonde e forma un'unica bolla locale che occupa la gran parte della sezione trasversale della condotta, si parla di cavitazione a colonna. Questo si verifica generalmente vicino a specifici punti della condotta come valvole, pompe, curve e punti alti. Solo occasionalmente avviene in punti intermedi quando due onde di rarefazione si incontrano. Il collasso di questo fenomeno è in genere accompagnato da aumenti di pressione quasi istantanei.

Durante questo processo ci sono molte forze dinamiche in gioco e, quando queste forze fanno muovere il sistema, vi sono significative interazioni tra fluido e condotta così che questi non possono essere trattati separatamente. È quindi necessario tenere conto di *meccanismi di interazione*. Di seguito sono mostrate schematicamente l'interazione fluido-struttura (FSI) e alcune sorgenti di eccitazione (Figura 1.3).

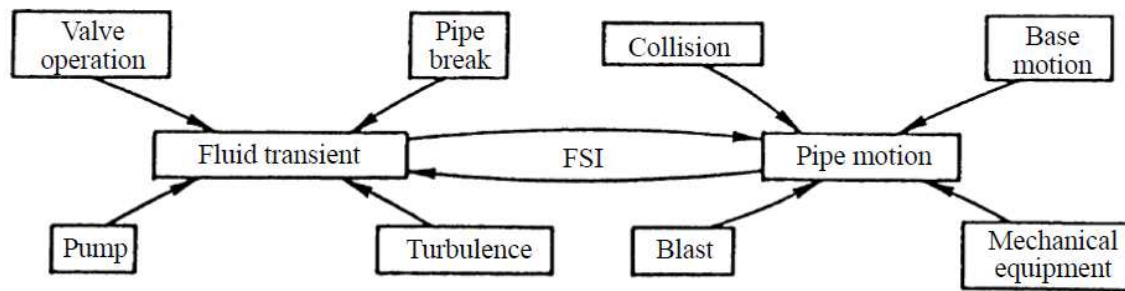


Figura 1.3- Sorgenti di transitori nel fluido e di moti nella condotta

In particolare si possono distinguere 3 fenomeni di interazione tra fluido e condotta:

- Accoppiamento per attrito: attrito reciproco tra fluido e condotta
- Accoppiamento di Poisson: mette in relazione le pressioni nel liquido alle tensioni assiali (longitudinali) nella condotta attraverso la contrazione o l'espansione radiale della parete della condotta. L'accoppiamento di Poisson conduce inoltre a onde precursori. Queste sono onde di disturbo nel liquido che viaggia più veloce e quindi in anticipo rispetto alle classiche onde del colpo d'ariete.
- Accoppiamento ai giunti: agisce in uno specifico punto della condotta ad esempio in presenza di valvole (a differenza dei primi due accoppiamenti che agiscono lungo l'intera condotta). Un esempio è il gomito vibrante che induce onde di pressione nel liquido attraverso un'azione combinata di compressione e decompressione.

I principali effetti dell'interazione fluido-struttura dipendono dal problema. Se confrontate con le previsioni derivanti da analisi disaccoppiate, quelle che tengono conto dell'accoppiamento fluido-condotta possono condurre a: pressioni e tensioni più basse o più alte, cambiamenti nelle frequenze naturali del sistema e maggiori smorzamenti e dispersioni nella pressione e tensione.

In figura 1.4 si riporta l'effetto dell'accoppiamento di Poisson. In (a) il fluido sta scorrendo a una velocità V e con una pressione di riferimento $P=0$. In (b) il fluido è fermato istantaneamente e questo risulta in un aumento di pressione che si propaga alla velocità c_f attraverso il fluido. L'aumento di pressione è accompagnato da un'espansione radiale della parete della condotta come mostrato in (c). A causa di questa espansione

radiale, la condotta si accorcia dietro e si allunga davanti all'aumento di pressione. L'allungamento si rivela come un'onda d'urto assiale che si propaga a una velocità c_t attraverso la condotta e causa una contrazione radiale della parete della condotta come si può notare in (c). La contrazione radiale causa un aumento di pressione secondaria nel fluido come mostrato in (b). In genere ci si riferisce a questo aumento secondario col termine di onda precursore perché si propaga ad una velocità c_t generalmente più alta della velocità di propagazione c_f del primo aumento di pressione.

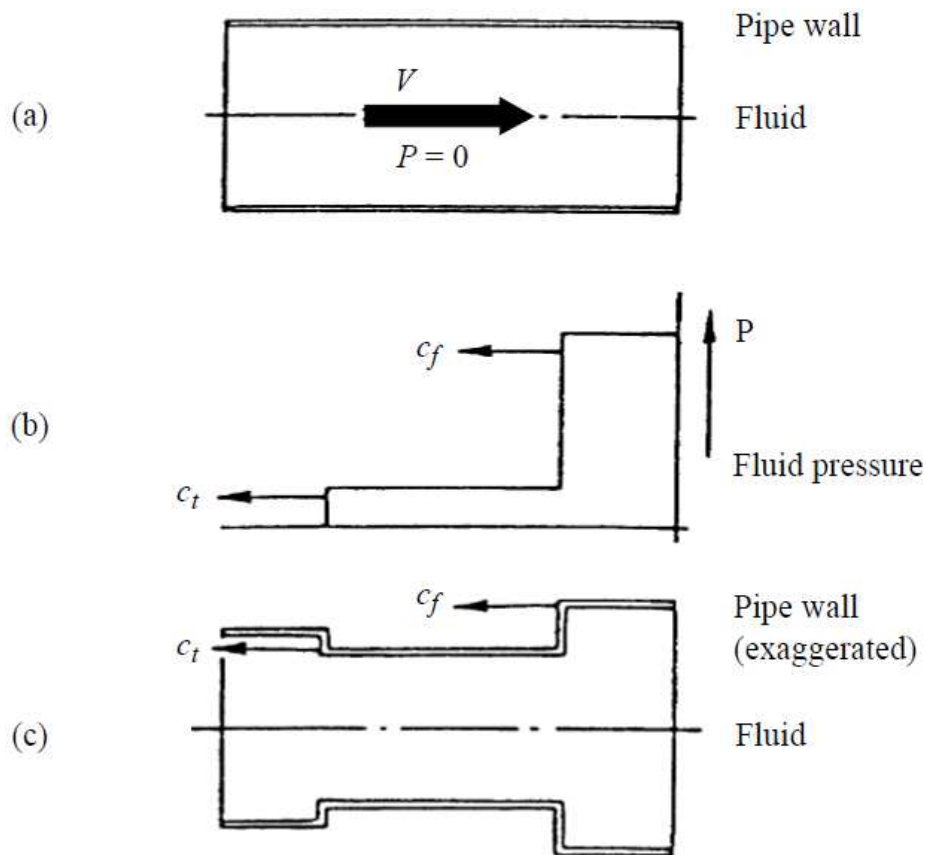


Figura 1.4- Accoppiamento di Poisson

In figura 1.5 si riporta l'effetto dell'accoppiamento ai giunti. Quando l'onda di pressione passa il gomito sulla destra in (a), la differenza di pressione netta tra i due gomiti causa il movimento del ponte come si può notare in (b). A causa del movimento la pressione cala sulla destra ed aumenta nel gomito di sinistra, come mostrato in maniera semplificata in (b). Il movimento del ponte di tubi induce onde di pressione nel fluido che a loro volta influenzano il moto del ponte.

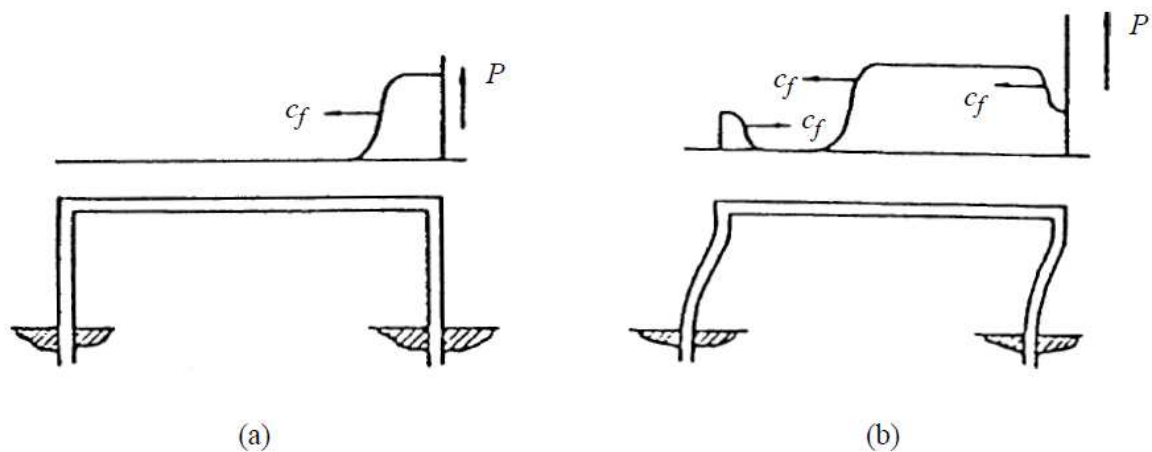


Figura 1.5- Accoppiamento ai giunti

Approfonditi studi in passato dimostrarono che gli effetti di Poisson avvengono quando le forze d'inerzia assiali nella parete del tubo non sono trascurate. In questo caso onde assiali si propagano lungo il tubo. Per quanto riguarda l'influenza delle forze d'inerzia radiali invece si dimostrò che solo per piccole lunghezze d'onda (alte frequenze) le inerzie radiali sia della parete del tubo che del fluido sono importanti portando così la velocità d'onda a variare con la lunghezza d'onda (Korteweg 1878). In particolare da un trattamento completo della combinazione di vibrazioni assiali e radiali in un tubo riempito di liquido, che tiene conto anche dell'accoppiamento di Poisson, si possono distinguere tre classi di vibrazioni (Lamb 1898):

- Onde di pressione del fluido (accoppiate a vibrazioni assiali del tubo)
- Vibrazioni assiali della parete del tubo (accoppiate alle onde di pressione del fluido)
- Vibrazioni radiali del sistema

Per lunghezze d'onda elevate (cioè basse frequenze) le onde di pressione e le onde di tensione assiale sono predominanti. Le vibrazioni radiali invece sono importanti solo per basse lunghezze d'onda (cioè alte frequenze). Osservando le pratiche comuni all'interno della ricerca di perdite idriche la comunità rivela che l'individuazione delle perdite è eseguita con maggiore successo su segnali a bassa frequenza, suggerendo che sono queste le frequenze eccitate dalla perdita e quelle che si propagano più efficacemente lungo la struttura. In aggiunta, recenti lavori in Canada su condotte idriche in plastica hanno confermato che la maggior parte dell'energia di perdita

per condotte interrate è concentrata e si propaga a frequenze al di sotto dei 200 Hz. È quindi di nostro interesse la dinamica a bassa frequenza del sistema, molto al di sotto della frequenza di ring della condotta (frequenza per la quale la lunghezza d'onda longitudinale è uguale alla circonferenza della condotta, usata per definire il limite superiore per la trasmissione del rumore all'interno della condotta, al di sopra della quale la trasmissione è minima).

In particolare a frequenze molto minori della frequenza di ring quattro tipi di onde sono responsabili della maggior parte del trasferimento di energia (figura 1.6): 3 onde assialsimmetriche ($n=0$) e l'onda $n=1$, associata al raggio di curvatura. Delle onde $n=0$, la prima, chiamata $s=1$, è l'onda dominante nel fluido (*Fluid-born wave*); la seconda, $s=2$, è l'onda assiale dominante nella parete (*Structure-born wave*); la terza, $s=0$, è un'onda di torsione disaccoppiata dal fluido. Come detto prima, per lunghezze d'onda elevate (cioè basse frequenze) sono predominanti le onde longitudinali, mentre le onde flessionali sono significative solo alle alte frequenze, da qui il fatto di considerare solo i primi due modi. Sono quindi le prime due onde a coinvolgere il moto del guscio e del fluido. Inoltre è stato trovato che, alle frequenze di nostro interesse, l'onda nel fluido ($s=1$) è quella predominante.

4 TIPI DI ONDE RESPONSABILI DELLA MAGGIOR PARTE DEL TRASFERIMENTO DI ENERGIA

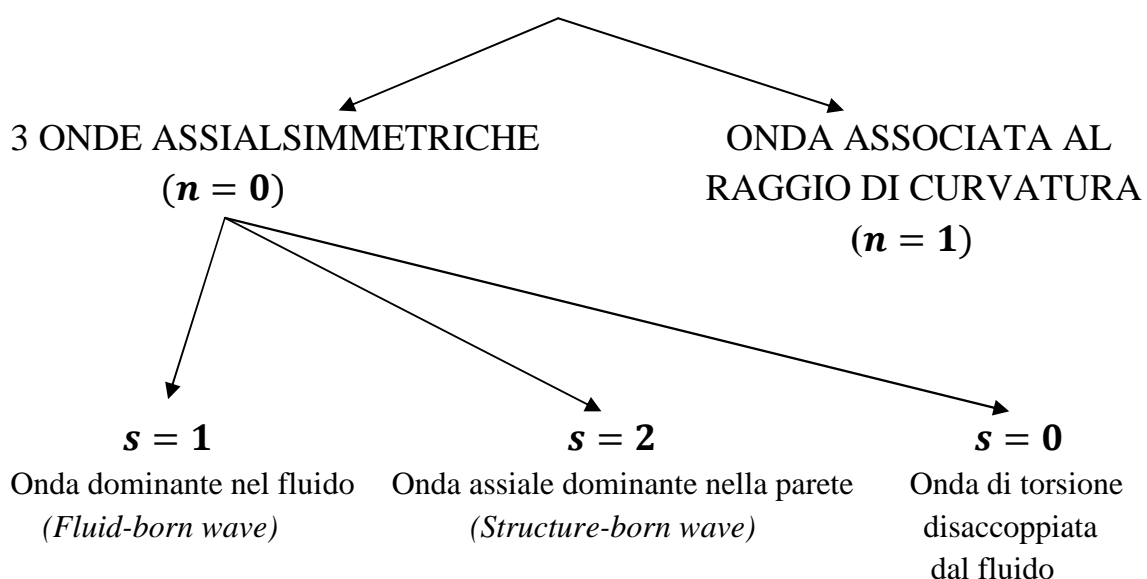


Figura 1.6- Schema dei tipi principali di onde

Si riporta in seguito un semplice schema dei fenomeni descritti, rilevanti al fine dello studio del nostro problema (Figura 1.7).

PERDITA

Cambiamento improvviso delle condizioni stazionarie del flusso



COLPO D'ARIETE



VARIAZIONI DI PRESSIONE TRANSITORI ALL'INTERNO DEL FLUIDO

Effetto improvviso legato alla portata di fuga indotta dalla propagazione dell'onda di pressione nella posizione della perdita



3 FENOMENI D'INTERAZIONE TRA FLUIDO E PARETE

- Accoppiamento per attrito
- Accoppiamento di Poisson
- Accoppiamento ai giunti



3 CLASSI DI VIBRAZIONI

- Onde di pressione nel fluido
- Vibrazioni assiali della parete
- Vibrazioni radiali della parete



INFINITO NUMERO DI MODI DI PROPAGAZIONE D'ONDA

(alle basse frequenze solo i primi 2 modi sono significativi)

- s=1 onda di pressione nel fluido
- s=2 onda di tensione assiale nella parete del tubo

Figura 1.7- Schema fenomenologia legata alle perdite

Tutto quello illustrato finora ha costituito la base per l'impostazione delle rilevazioni effettuate al fine di caratterizzare il comportamento di accelerometro e idrofono e confrontare le prestazioni dei due nella ricerca di perdite idriche.

CAPITOLO 2

LE EMISSIONI ACUSTICHE

2.1 Introduzione

La tecnica del rilievo dell'emissione acustica è un metodo di diagnosi non distruttivo basato sull'acquisizione di segnali ultrasonori (20 kHz÷1 MHz) comunemente usato per l'individuazione e la localizzazione di difetti in strutture e componenti caricati meccanicamente. Le emissioni acustiche possono fornire informazioni sull'origine della discontinuità (difetto) in un componente tensionato e anche sul suo successivo sviluppo quando il componente è soggetto a tensioni continue e ripetitive [1].

Quando un solido è soggetto a una tensione di una certa intensità questo rilascia energia la quale viaggia in forma di onde elastiche ad alta frequenza. Queste onde o oscillazioni sono percepite da un sensore piezoelettrico, contenente generalmente cristalli di piombo-zirconato di titanio, che a sua volta ne converte l'energia in una tensione. Questa tensione viene poi elettronicamente amplificata e, tramite l'uso di appositi circuiti, processata come segnale di emissione acustica (AE, dall'inglese Acoustic Emission). L'analisi dei dati comprende la caratterizzazione dei segnali secondo la localizzazione della sorgente, l'intensità del voltaggio e il contenuto in frequenza. L'insorgenza di questo fenomeno si riscontra in situazioni di svariata natura quali deformazioni meccaniche e fratture, trasformazioni di fase, corrosione, attrito e processi di natura magnetica.

Oltre ai segnali derivanti dalle AE ci possono essere segnali derivanti da altre cause come rumore (noise) o da sorgenti di AE non rilevanti per l'obiettivo del test. Le cause principali del rumore (noise) sono:

- Attrito
- Impatti

Le fonti d'attrito sono stimulate da carichi strutturali che causano movimenti ai connettori mobili, bulloni allentati ecc. Le fonti di impatto invece possono includere pioggia, polvere portata dal vento o oggetti volanti. Una parte rilevante nei test che sfruttano le AE consiste quindi

nell'abilità di eliminare tutte queste sorgenti di rumore e concentrarsi su quello rilevante ai fini della prova, selezionando un appropriato setup, prendendo precauzioni pratiche per prevenire il più possibile sorgenti di rumore e riconoscendo e rimuovendo il rumore dai dati registrati. Tutto questo dipende molto dall'esperienza di chi effettua le misure ed è necessario avere un ampio campo di dati su cui basarsi per effettuare una corretta interpretazione dei risultati.

Le emissioni acustiche, presentandosi in forma di onda elastica, sono sempre accompagnate da vibrazioni. Allo scopo di eliminare dai rilievi le componenti oscillatorie parassite dovute alle vibrazioni della struttura e ai rumori, le strumentazioni per il rilevamento e l'analisi delle AE prendono in considerazione solamente una parte dello spettro delle frequenze ricevute, mediante l'uso di filtri. In particolare l'AE, come appena detto, ha una frequenza compresa tra 20 kHz e 1 MHz, in realtà però le vibrazioni a più basse frequenze (20÷100 kHz) possono essere mascherate da rumori esterni e quelle a più alta frequenza tendono a smorzarsi molto rapidamente, per cui il campo di indagine dell'AE si riduce all'intervallo 100÷700 kHz.

Con questa tecnica è quindi possibile individuare e localizzare la nascita e la crescita di cricche dovute a varie cause e, con riferimento al nostro problema, anche la presenza di perdite di fluido da corpi solidi.

L'analisi delle AE come mezzo diagnostico per la caratterizzazione dei materiali soggetti a sollecitazioni meccaniche ebbe un forte impulso durante gli anni '60 quando la disponibilità di idonea strumentazione scientifica e di trasduttori sufficientemente sensibili permisero l'applicazione su larga scala di tali tecniche. Da quel momento queste onde sono state ampiamente osservate in numerose applicazioni ed al termine emissione acustica è stata associata una normativa da parte dell'American Society for testing and materials (ASTM E 1316-99, ANSI/ASTM E 610-77). Joseph Kaiser con i suoi collaboratori nei primi anni '50, è generalmente accreditato di aver iniziato in modo sistematico la comprensione del fenomeno di AE. Sua è ad esempio la scoperta di quello che oggi viene chiamato "Effetto Kaiser" secondo cui, andando a caricare per la prima volta un pezzo metallico fino ad un certo livello di tensione, si possono rilevare AE anche in assenza di difetti di tipo evolutivo (cioè

difetti che tendono a propagarsi al variare del carico, come le fratture); se si scarica il pezzo e lo si ricarica una seconda volta, non si avrà nessuna AE finchè il livello di carico non supererà quello massimo raggiunto nel ciclo precedente (a partire da questo punto si inizieranno ad avere nuove AE).

2.2 Lineamenti di teoria

Le tecniche di AE, nelle prime applicazioni, cioè fino ai primi anni '70, sono state usate senza una sufficiente conoscenza dei fondamenti fisici del fenomeno.

Intorno alla metà degli anni '70, è stata sviluppata una teoria fondamentale da Stephens e i suoi collaboratori, partendo da conoscenze ben consolidate sulla dinamica delle dislocazioni e delle fratture e sulla sismologia teorica (i fenomeni di AE hanno caratteristiche analoghe a quelli sismici, eccetto per la scala) che, assieme agli sviluppi sul rilevamento ed il riconoscimento dei segnali, hanno permesso di sviluppare trasduttori a capacità che danno per gli spostamenti una risposta elettrica molto più fedele rispetto a quella dei primi trasduttori utilizzati.

Sono possibili due approcci, uno diretto, che permette di passare dalla sorgente al segnale misurato (chiamato anche *forward problem*), ed uno inverso, che permette di risalire alle proprietà della sorgente a partire dal segnale misurato (chiamato anche *inversion problem*). Questi due tipi di problemi sono interconnessi tra di loro e di difficile risoluzione. Ancora oggi, teorie esatte e corrispettivi riscontri sperimentali si possono ottenere soltanto con strutture di geometria molto semplice.

In genere una sorgente di AE può essere rappresentata mediante uno sforzo localizzato in un punto r_0 , la cui intensità ad un certo istante varia improvvisamente: questo sforzo viene descritto matematicamente da un tensore $\sigma(r_0, t)$, dove t è il tempo. Si può ritenere con buona approssimazione che il problema sia lineare in quanto, di solito, la lunghezza d'onda del segnale elastico generato dalla variazione di σ è grande rispetto alle dimensioni della sorgente.

Sotto tali condizioni lo spostamento $u(r_0, t)$ nel punto r_0 all'istante t può essere espresso dall'integrale di convoluzione:

$$u(r_0, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(r, r_0, t - \tau) \sigma(r_0, \tau) d\tau$$

dove G è una grandezza che descrive la funzione di trasferimento del mezzo, chiamata funzione di Green e rappresenta lo spostamento nella struttura nel punto r all'istante t causato da uno sforzo impulsivo verificatosi nel punto r_0 all'istante τ ($t < \tau$). La determinazione di G costituisce un problema matematico piuttosto complesso, che è stato specificato da vari autori in diversi casi, come, ad esempio, quando l'evento di AE viene descritto da una forza localizzata, da un centro di dilatazione ecc.

Possono essere utili alcune considerazioni quantitative sul segnale prodotto da una dislocazione in moto. E' possibile mostrare, usando la funzione di Green sotto condizioni estremamente semplificate, che lo spostamento u_{max} rilevato dal n trasduttore posto alla distanza h dalla sorgente è:

$$u_{max} = \frac{kav}{h}$$

in cui il coefficiente k dipende dal materiale, v è la velocità media della dislocazione ed a è la distanza da percorrere. Ad esempio per dislocazioni in acciai si stima $k \approx 10^{-14} s$. Se il trasduttore ha una sensibilità per lo spostamento pari a x , il segnale può essere rilevato se ha $v = 10^{14} hx$. Misurazioni di rumore effettuate in laboratorio indicano per x un valore di 10^{-13} ; per tanto, supponendo che h sia di 10 cm essendo la velocità di propagazione delle onde elastiche nell'acciaio di 3000 m/s, si ottiene $a \approx 0.3 mm$. Questo valore è molto maggiore di quello usualmente percorso da una dislocazione, quindi il moto di una singola dislocazione non può essere assunto come potenziale sorgente di AE. Tuttavia, essendo stati osservati segnali molto intensi durante le deformazioni di snervamento, tali segnali sono da attribuire al moto cooperativo di centinaia o migliaia di dislocazioni.

Analoghe considerazioni possono essere fatte a proposito della crescita di una microcricca; si trova che la variazione di $1 \mu m$ delle sue dimensioni può dar luogo ad AE.

Un aspetto fisico importante riguarda la dipendenza della frequenza delle AE dalla dimensione del difetto. Fintanto che la dimensione della cricca è sufficientemente piccola, le strutture vibranti saranno piccole e le AE saranno, di conseguenza, di alta frequenza. Non appena la dimensione del difetto aumenta, sia per allargamento del difetto precedente, che per coalescenza di difetti già esistenti, le AE diventeranno di frequenza

progressivamente più bassa, mentre altri difetti continueranno a rilasciare alcune AE di frequenza ancora alta. Come mostrato da Gregori [2], ci si aspetta come risultato che i segnali di AE registrati a certe frequenze decadranno lentamente, mentre il segnale a frequenze più basse aumenterà e raggiungerà il suo valore massimo. Questo è mostrato, qualitativamente, nella figura 2.1. Un prima descrizione di ogni fenomeno di AE può essere rappresentata in termini di una funzione δ di Dirac, assumendo che in un dato istante di tempo del processo tutto l'insieme di difetti o cricche condivida lo stesso andamento rispetto al tempo. Però una struttura fisica dovrebbe essere studiata andando a considerare il fatto che un difetto più grande rilascia energia ad una frequenza più bassa di un difetto più piccolo. Questo implica che alla funzione δ di Dirac si deve andare a sostituire una più realistica distribuzione di tipo lognormale.

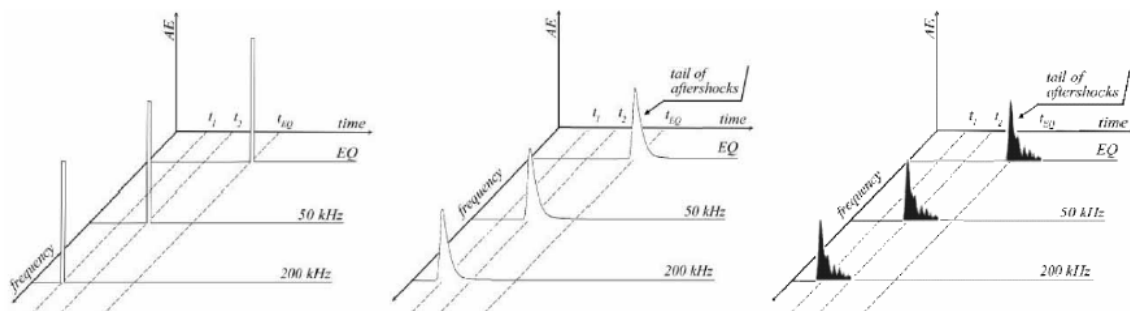


Figura 2.1- Emissione acustica nei solidi (approssimazione δ di Dirac, distribuzione lognormale, andamento reale)

La distribuzione puramente lognormale si dimostra essere molto adatta per descrivere, ad ogni data frequenza, i principali aspetti della coda osservata nei rilevamenti di AE. Nella realtà della natura l'effetto di reazione a catena potrebbe deviare da tale supposizione. Si preferisce quindi fornire una misura quantitativa dell'evoluzione temporale del sistema trattando la reazione a catena che implica AE di frequenza progressivamente più bassa.

Comunque, per l'estrema varietà dei fenomeni che danno luogo ad Emissioni Acustiche, una teoria del tutto generale in grado di spiegare la sua comparsa non è ancora stata elaborata.

Nel caso di controlli non distruttivi non si può dire niente a priori sul valore delle varie grandezze che caratterizzano il segnale; sono sempre necessarie prove per la caratterizzazione della condizione di funzionamento "normale", variabile a seconda del tipo di applicazione. In caso di

danneggiamento (scostamento dalla condizione di funzionamento normale) si rileveranno fenomeni a maggiore energicità (vedi parag. 2.5).

2.3 La propagazione delle onde di AE

Col termine emissione acustica, come accennato prima, si indica un transitorio di onde elastiche di una certa frequenza (20 kHz÷1MHz) nella struttura e nel fluido generate da un rapido rilascio di energia da una sorgente localizzata all'interno e/o sulla superficie del materiale (la sorgente può essere ad esempio una frattura o, con riferimento al nostro problema, una perdita di fluido da un corpo solido).

Il breve impulso proveniente dalla sorgente è solo l'inizio del processo di emissione acustica. L'energia acustica di deformazione emessa dal materiale si trasmette infatti secondo le modalità di propagazione delle onde elastiche nei solidi, che è un fenomeno generalmente molto complesso. Per prima cosa una struttura presenta molte superfici che riflettono ripetutamente l'onda. In secondo luogo, i solidi (a differenza dei liquidi) sopportano forze di taglio così come quelle di compressione, di conseguenza esisteranno differenti tipi d'onda (modi) che possono essere eccitati simultaneamente.

In particolare queste onde si dividono in due grandi categorie in funzione di come percorrono il materiale perturbato:

- *Onde di corpo o di volume (body waves)*: sono quelle onde che si propagano dalla sorgente, attraverso il volume del mezzo interessato, in tutte le direzioni. Esistono due tipi di onde di corpo generate contemporaneamente dalla sorgente: onde longitudinali e onde trasversali.
 - *Onde longitudinali*: sono onde simili alle onde sonore e corrispondono a compressioni e rarefazioni del mezzo in cui viaggiano; al loro passaggio le particelle del materiale attraversato compiono un moto oscillatorio nella direzione di propagazione dell'onda. Sono le più veloci e quindi le prime avvertite dal sensore. Vengono anche chiamate onde di pressione.
 - *Onde trasversali*: sono onde che provocano, nel materiale attraversato, oscillazioni perpendicolari alla loro direzione di

propagazione. Non possono propagarsi in mezzi fluidi e raggiungono velocità che si aggirano solitamente intorno al 60-70% della velocità delle onde longitudinali (per questo vengono avvertite dal sensore sempre dopo le onde longitudinali). Ulteriori onde trasversali vengono generate dall'incidenza delle onde longitudinali sull'interfaccia esistente tra due mezzi aventi differenti velocità acustiche, tramite una conversione parziale dell'energia delle onde longitudinali in onde trasversali.

- *Onde superficiali (surface waves)*: vengono a crearsi a causa dell'intersezione delle onde di corpo con una superficie di discontinuità fisica. Queste onde si propagano guidate lungo la superficie e la loro energia decade esponenzialmente con la profondità. Dalla sorgente vengono generate direttamente solo le onde longitudinali e trasversali, ma non le onde superficiali. L'ampiezza di queste onde (e quindi l'energia associata ad esse) è notevolmente maggiore di quella delle onde di corpo. Tra le onde di superficie è possibile distinguere: onde di Rayleigh e onde di Lamb.
 - *Onde di Rayleigh*: quando un'onda trasversale assieme ad un'onda longitudinale incide su una superficie libera vengono in parte riflesse e in parte si genera un'ulteriore onda, data dalla composizione vettoriale delle due, che si propaga sulla superficie stessa e viene chiamata appunto onda di Rayleigh. Il loro moto è vincolato in uno spazio verticale contenente la direzione di propagazione dell'onda.
 - *Onde di Lamb*: sono generate dall'incontro delle onde trasversali con la superficie libera e fanno vibrare la superficie sul piano orizzontale in direzione ortogonale rispetto alla direzione di propagazione dell'onda.

La ripartizione dell'energia emessa secondo queste diverse modalità di propagazione dipende in modo assai complesso dalla distanza dal punto di emissione e dallo spessore del materiale interessato dalla propagazione. Si può affermare che si verifica una successione di fenomeni caratterizzata principalmente dalla velocità di propagazione dei vari tipi di onde. Le prime micro vibrazioni giungono ai sensori sotto forma di onde longitudinali a cui seguono quelle di Lamb, quelle trasversali e infine

quelle di Rayleigh (vedi parag. 2.3.2). Per la localizzazione del difetto è importante stabilire il tempo di arrivo di uno di tali fenomeni al sensore. Infatti, analogamente al principio alla base dell'uso dei correlatori, per la localizzazione sono necessari almeno due sensori di AE, da collocare in due punti che delimitano il difetto (sorgente di AE) [3]. Se la sorgente si trova ad una distanza "x" dal primo sensore, allora $x = (L - v\Delta t)/2$, dove L è la distanza tra i due sensori (nota), v è la velocità dell'onda nel mezzo in cui si propaga (nota) e Δt è la differenza tra i tempi di arrivo dell'onda a ciascun sensore. Sarebbe conveniente assumere come tempo di arrivo quello delle onde longitudinali, perché, essendo le prime, hanno il fronte d'onda non mascherato da sovrapposizioni di altri fronti d'onda; tuttavia l'energia associata a tali onde non è molto rilevante ed inoltre queste si attenuano più facilmente degli altri tipi d'onda. Per questi motivi si preferisce conteggiare i tempi di arrivo delle onde trasversali, il cui fronte d'onda è ancora ben definito a meno che non sia eccessiva l'energia associata alle onde di Lamb, cosa che si verifica solo quando lo spessore della zona esaminata è estremamente piccolo.

Comunque quello dell'emissione acustica è un fenomeno estremamente veloce. Il tipico moto della sorgente di AE termina in pochi microsecondi. L'onda poi impiega qualche millisecondo per raggiungere il sensore e qualche centesimo di secondo per scomparire.

Aspetti del processo di propagazione dell'onda che risultano particolarmente importanti nella tecnologia delle AE sono:

- L'attenuazione, cioè la perdita di ampiezza man mano che l'onda si allontana dalla sorgente. Questo risulta importante nell'individuazione di onde provenienti da sorgenti distanti.
- La velocità d'onda, cioè la velocità alla quale il disturbo viaggia attraverso la struttura. Questa è importante per alcune tecniche di localizzazione della sorgente [1].

2.3.1 L'attenuazione

Man mano che l'onda acustica viaggia attraverso la struttura, la sua ampiezza diminuisce. Questo fenomeno è noto col nome di attenuazione ed è illustrato (per una piastra d'acciaio) in figura 2.2. In

questa figura l'ampiezza è graficata sull'asse delle ordinate usando la scala in decibel. In questa scala ciascun incremento di 20 decibel corrisponde a un incremento di 10 volte della tensione di picco del segnale. Il grafico mostra che la tensione di picco del segnale a una distanza di 9 piedi dalla sorgente è circa un trentesimo di quella in prossimità della sorgente. La scala in decibel è universalmente usata e molto conveniente poiché, essendo logaritmica, condensa il range estremamente vasto delle ampiezze del segnale. In particolare è una misura logaritmica dell'ampiezza del segnale di emissione acustica riferita a $1 \mu\text{V}$.

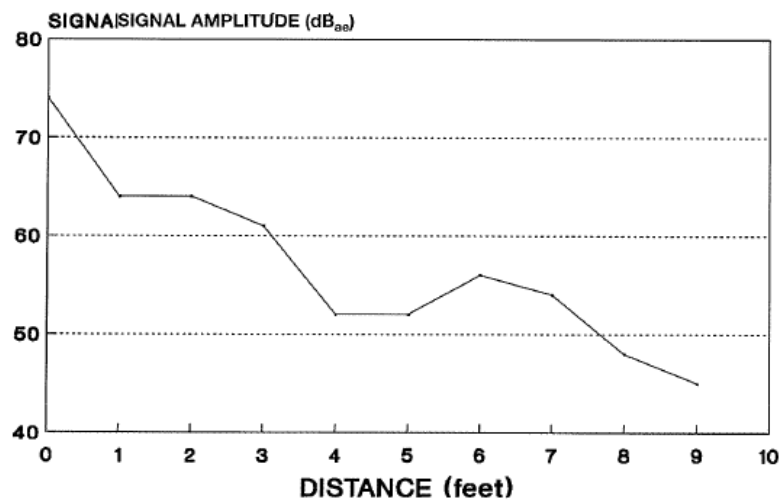


Figura 2.2- Attenuazione, ampiezza decrescente con la distanza

L'attenuazione è legata a diversi fattori. Nella maggior parte delle strutture quelli importanti sono la diffusione geometrica, la riflessione ai bordi e l'assorbimento. Quando la sorgente è molto vicina al sensore il primo fattore è il più importante, mentre a distanze maggiori di due piedi gli ultimi due sono quelli prevalenti. La comprensione di questi effetti è importante anche per l'identificazione del rumore estraneo di cui si è parlato in precedenza.

Gli effetti della diffusione geometrica sono fondamentali per la propagazione dell'onda. Il principio base è che l'onda tende a diffondersi per tutto il volume della struttura vicino alla sorgente. In teoria, per una struttura larga in tutte le dimensioni (semispazio infinito), l'onda si diffonderebbe semplicemente e continuerebbe ad attenuarsi. Nelle strutture reali invece i bordi forzano l'onda a rimanere in uno spazio confinato così che l'attenuazione dovuta a

questo fenomeno è limitata. In una struttura piccola e ben definita, come ad esempio una barra, la diffusione geometrica è minima e l'onda può viaggiare a grande distanza. I dati mostrati nella figura precedente (Figura 2.2) mostrano questa relazione (in modo approssimativo). La curva scende rapidamente a brevi distanze e più gradualmente a distanze maggiori.

La seconda causa più importante dell'attenuazione è la riflessione ai bordi e alle discontinuità geometriche. Ogni volta che l'onda incontra una discontinuità parte della sua energia è riflessa. Le discontinuità producono anche conversioni dei modi. Questi effetti sono particolarmente importanti in geometrie complesse di molte strutture, dove ci possono essere cambiamenti in direzione, connessioni, irrigidimenti e altri confini lungo il percorso acustico dalla sorgente al sensore.

La terza causa di attenuazione è l'assorbimento. Qui le energie elastica e cinetica nell'onda sono assorbite e convertite in calore dal materiale attraverso cui l'onda passa. L'acciaio assorbe molto poco alle frequenze utilizzate per i test con le emissioni acustiche. I non metalli invece tendono ad assorbire più energia. L'assorbimento inoltre è maggiore alle alte frequenze a causa delle lunghezze d'onda minori. Il meccanismo di riduzione dell'ampiezza con la distanza per l'assorbimento è diverso da quello visto per la diffusione. In questo caso infatti c'è un assorbimento di un costante numero di decibel per piede dalla sorgente. Questo è lo stesso ad ogni distanza dalla sorgente. Ad esempio, se c'è una riduzione di 6 dB dopo che l'energia ha viaggiato per un piede, ci sarà una ulteriore riduzione di 6 dB dopo che questa ha viaggiato di un altro piede e così via.

Le misurazioni dell'attenuazione sono eseguite in modo semplice con l'uso di una sorgente di AE simulata. Quella più largamente usata è la rottura di una mina di matita premuta contro un componente strutturale, come mostrato in figura 2.3. Quando la mina è premuta contro la struttura, la forza applicata produce una deformazione locale con immagazzinamento di energia che viene improvvisamente rilasciata quando la mina si rompe. Con una buona tecnica l'onda risultante è abbastanza riproducibile. La matita Hsu (così chiamata dal

nome dello sviluppatore della tecnica) e l'adattatore di Nielsen sono aiuti convenienti e poco costosi che sono stati enormemente preziosi nei test pratici[4][5].

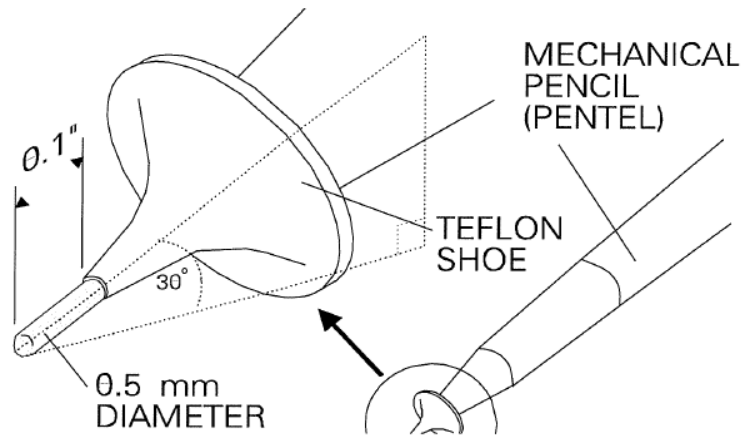


Figura 2.3- Sorgente Hsu-Nielsen

La rottura della mina crea un impulso localizzato e di breve durata che è molto simile a una naturale sorgente di emissione acustica come la frattura. Inoltre l'ampiezza della sorgente così simulata risulta all'interno del range di quelle delle tipiche fratture. La matita Hsu è stata così ben accettata come sorgente simulata di AE tanto che in molte procedure per il monitoraggio di vaste aree la distanza massima consentita per il sensore è basata sulla capacità di individuare la rottura della matita da qualunque punto nell'area di ispezione. Inoltre la procedura usuale per la creazione di grafici come quello di figura 2.2 consiste nella rottura della mina più volte ciascuna a distanze diverse dal sensore e quindi nella registrazione dell'ampiezza per ciascuna rottura. Le ampiezze per ciascuna distanza sono ampiezze medie e sono queste ad essere graficate in funzione della distanza. La curva di attenuazione è un importante aiuto nella determinazione della collocazione del sensore nelle specifiche applicazioni. Infatti in molte applicazioni delle AE l'obiettivo dell'ispezione è il monitoraggio dell'intera struttura. In questo caso è molto importante che tutte le parti della struttura siano all'interno del raggio di individuazione di almeno un sensore.

2.3.2 La velocità d'onda

I calcoli per la localizzazione della sorgente sono basati sul tempo di arrivo dell'onda dalla sorgente al sensore, i quali dipendono dalla velocità con cui le onde viaggiano. La comprensione e la previsione delle velocità d'onda è un importante aspetto della scienza della fisica acustica.

Un importante tipo d'onda nei test alle AE delle strutture è l'onda di Lamb [1]. Questo tipologia d'onda è stata così chiamata dopo Horace Lamb che nel 1920 sviluppò la teoria matematica della propagazione delle onde sinusoidali in piastre finite. Questo tipo di teoria intende descrivere la propagazione delle onde in termini di modi d'onda – modelli del moto oscillatorio che può propagarsi in maniera stabile mantenendo la loro forma man mano che si propagano. Nelle piastre Lamb identificò due famiglie di modi d'onda (sono le due tipologie di onde di Lamb) e sviluppò equazioni per descrivere la loro velocità di propagazione. Nella prima famiglia il moto è simmetrico rispetto al piano medio della piastra, mentre nella seconda è antisimmetrico. I membri principali di queste famiglie sono chiamati modi s_0 e a_0 rispettivamente. La forma del moto di questi modi è illustrata nella figura seguente (Figura 2.4).

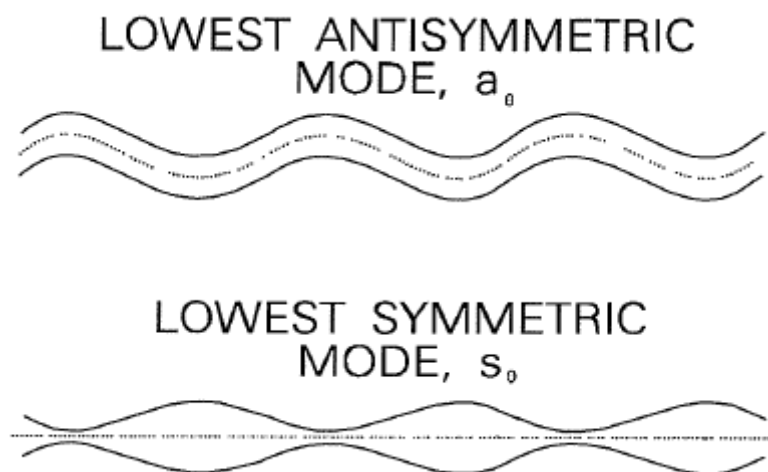


Figura 2.4- Modi di base delle onde di Lamb in piastre

Il modo s_0 , spesso chiamato “modo longitudinale”, è un movimento increspato in cui la piastra è alternativamente stirata e compressa nella direzione del moto d'onda. Accoppiato con questo movimento nel

piano i lati della piastra si muovono verso l'interno e verso l'esterno simmetricamente mentre le increspature attraversano la piastra. Per produrre questo tipo di moto d'onda le forze eccitanti devono essere parallele alla piastra. Anche un improvviso rilascio di tensioni nel piano tenderà a produrre un moto di questo tipo.

Il modo a_0 , spesso chiamato “modo flessionale”, è un modo in cui la piastra si incurva con le due superfici che si muovono nella stessa direzione. La maggior parte del moto è trasversale alla piastra, mentre quello nel piano della piastra risulta relativamente piccolo. Forze eccitanti perpendicolari alla piastra producono questo tipo di moto d'onda. In aggiunta a queste, forze parallele alla piastra, ma con un certo offset dalla mezzeria producono lo stesso tipo di moto.

I modi d'onda comunque viaggiano indipendentemente e non interferiscono tra loro. Diversi modi d'onda possono viaggiare allo stesso momento nello stesso materiale; in questo caso il moto in ciascun punto nel materiale è semplicemente la somma dei moti dei vari modi.

I due modi delle onde di Lamb viaggiano a diverse velocità. Ad esempio, a frequenze di 300÷500 kHz in una piastra d'acciaio spessa 0.25 pollici, il modo a_0 viaggia ad una velocità di circa 3000÷3300 m/s. Il modo s_0 viaggia più lentamente. Quindi il primo modo raggiungerà il sensore un po' prima. Nel settare i sistemi di localizzazione della sorgente di AE i tecnici solitamente devono introdurre nel pc le posizioni dei sensori e la velocità dell'onda che verrà usata nei calcoli per la localizzazione. Le posizioni dei sensori sono specificati in genere in pollici e in questo caso la velocità deve essere espressa in pollici al secondo.

Il modo a_0 dell'onda di Lamb (modo flessionale) è quello più importante nei test alle emissioni acustiche. Questo infatti produce solitamente un'onda a maggiore ampiezza rispetto al modo s_0 e in tipiche strutture viaggia anche più velocemente per cui arriva al sensore per primo. Gli altri membri delle due famiglie di onde di Lamb (chiamati a_1, s_1 , ecc.) possono viaggiare più velocemente rispetto ai modi a_0 e s_0 , ma le loro ampiezze tendono ad essere basse

e di conseguenza questi termini risultano relativamente poco importanti.

Un altro tipo di onde elastiche che viaggiano nei solidi e significative nei test non distruttivi alle alte frequenze sono le onde di Rayleigh. Nei mezzi isotropi solidi le particelle della superficie si muovono in ellissi in piani normali alla superficie stessa e paralleli alla direzione di propagazione. In superficie e alle basse profondità questo moto è retrogrado. Le più profonde particelle del materiale si muovono in ellissi più piccole con un'eccentricità che cambia con la profondità. Alle più grandi profondità il moto diventa ante retrogrado. La profondità di spostamenti rilevanti nel solido è circa uguale alla lunghezza dell'onda acustica. Le onde di Rayleigh sono distinte dagli altri tipi di onde acustiche (come le onde di Lamb che sono tipi di onde dirette in uno strato o le onde longitudinali e flessionali che sono confinate nella grande massa). Queste sono confinate vicino alla superficie e la loro ampiezza nel piano, quando generate da una sorgente puntiforme, decade come $1/r$ dove r è la distanza radiale.

Le onde di superficie quindi decadono molto più lentamente con la distanza di quanto lo fanno le onde di massa le quali si disperdono in 3 dimensioni da una sorgente puntiforme ed è per questo che risultano di fondamentale importanza nei test alle AE.

2.4 Struttura dei segnali

In pratica l'evento di emissione acustica (vedi parag. 2.5) è costituito da un treno di onde la cui velocità di propagazione dipende dalla natura del materiale stesso, in cui la prima parte è composta dalle onde longitudinali e trasversali (e in parte anche dalle onde superficiali di Lamb), mentre la seconda è data dalla sovrapposizione tra le onde superficiali (di Rayleigh e di Lamb) e quella frazione di onde dirette che sopraggiungono successivamente a causa delle riflessioni multiple, sempre presenti in un mezzo finito. Tali andamenti possono essere riconosciuti negli esempi di segnale mostrati nelle figure seguenti (Figure 2.5 e 2.6).

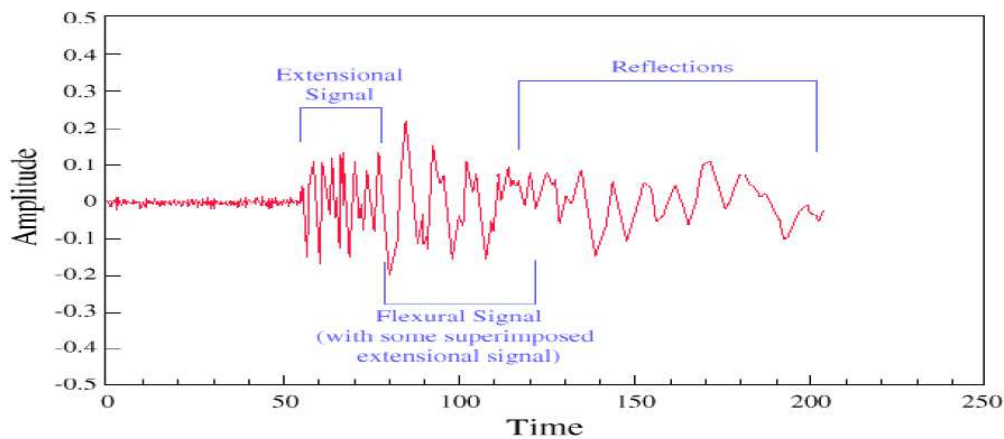


Figura 2.5- Segnale di AE nel quale varie componenti sono mostrate

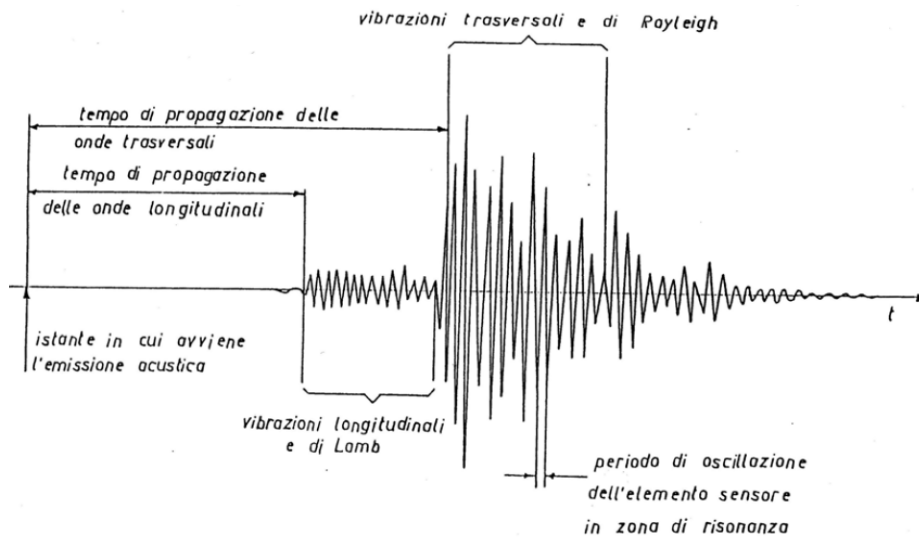


Figura 2.6- Tipico impulso di AE nel quale varie componenti sono mostrate

In molti casi la determinazione della sorgente generatrice dell'evento di emissione acustica e del meccanismo che l'ha prodotta è assai difficile. Questo è dovuto alla sovrapposizione temporale di diversi processi tra cui i prodotti secondari come le riflessioni. Nel caso ad esempio della crescita di fratture in materiali eterogenei, alla sorgente primaria rappresentata dal moto della punta della frattura si sovrappongono gli effetti dovuti alla frizione tra le facce formate dalla frattura stessa o da fratture preesistenti. Inoltre, anche se il segnale proviene da una sorgente primaria, le sue caratteristiche possono essere alterate o rese più rumorose da fattori legate alla propagazione delle onde nel mezzo. In particolare, grandi difetti preesistenti agiscono da risonatori e da centri di diffusione, modificando il segnale. Infine, regioni con minore resistenza alla frattura o differente composizione possono avere un comportamento più fragile con

conseguente aumento dell'ampiezza dei segnali. Quindi la natura del fenomeno è così articolata che una univoca definizione di Emissione Acustica appare difficile.

In generale si può dire che i segnali si presentano come: impulsi isolati nel tempo (eventi di "burst"), formati da un fronte di salita molto rapido seguito da un andamento esponenzialmente decrescente dovuto anche alla risposta del trasduttore (Figura 2.7), e da segnali stazionari o quasi stazionari, privi di decadimenti, nei quali i singoli eventi di AE sono talmente ravvicinati da non essere distinguibili, di ampiezza minore rispetto all'evento di burst, dovuto sia alla dispersione del mezzo sia ad altre cause come viscoelasticità, attrito interno ecc. In particolare le componenti impulsive (segnali di burst) sono causate dall'innesco di fratture e dalla loro crescita, mentre la parte continua del segnale è dovuta alle deformazioni plastiche (l'energia coinvolta si traduce in lavoro plastico di deformazione speso per vincere la resistenza al moto delle dislocazioni; questo movimento produce all'interno del materiale la propagazione di un'onda di stress che giunta in superficie si manifesta come onda di AE) oltre che dal rumore esterno. Si riporta in figura 2.8 un tipico segnale di AE formato da una serie ravvicinata di impulsi di relativa grande ampiezza (burst) sovrapposti ad un segnale continuo di ampiezza minore.

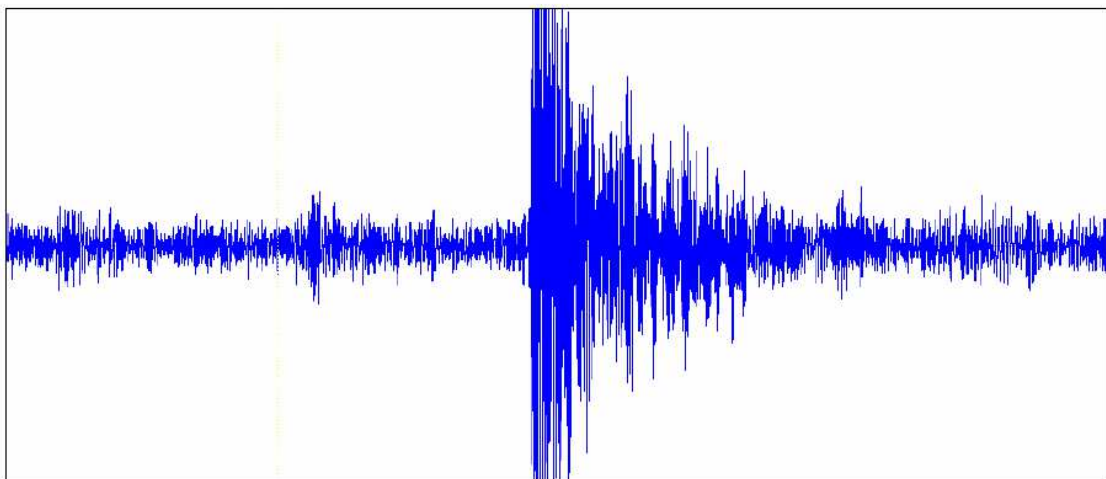


Figura 2.7- Evento di burst

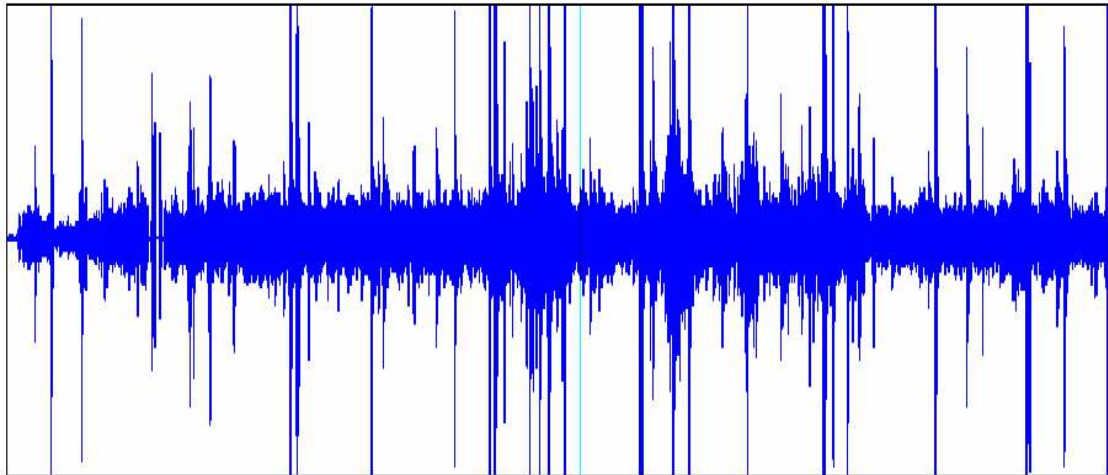


Figura 2.8- Segnali quasi stazionari a cui sono sovrapposti eventi di burst

2.5 Segnali di AE e parametri fondamentali

Osservata all'oscilloscopio un'Emissione Acustica si presenta con l'aspetto di una sinusoide smorzata ed è caratterizzata da alcune grandezze caratteristiche (Figura 2.9).

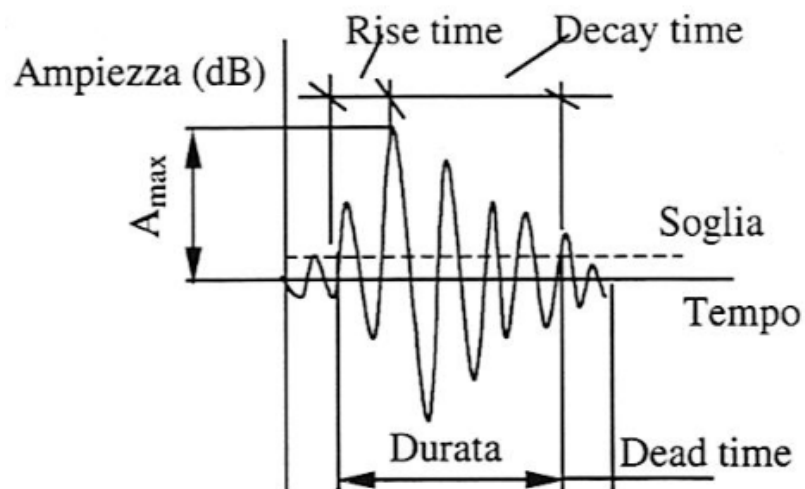


Figura 2.9- Rappresentazione schematica di un Evento di Emissione Acustica

Convenzionalmente, riferendosi alla sinusoide (forma d'onda), si parla di "Hit" di emissione acustica nel momento in cui il transitorio di AE viene individuato e processato da un certo canale; si parla invece di "Evento" nel momento in cui viene effettuata la localizzazione della sorgente di questa stessa emissione acustica.

Per chiarire questo concetto si supponga di avere due sensori a una certa distanza dalla sorgente di AE. Si supponga inoltre per semplicità che questa sorgente dia origine, in un certo istante, ad una e una sola emissione

acustica. In questo momento ciascuno dei due sensori individuerà e processerà una Hit (una hit individuata e processata dal primo sensore e una hit individuata e processata dal secondo sensore, per un totale di due hits derivanti entrambe dalla stessa sorgente). Con principi simili a quelli utilizzati nei correlatori, basandosi sui tempi d'arrivo delle onde a ciascun sensore, sulla loro velocità e sulla distanza dei sensori, sarà quindi possibile localizzare la sorgente. In questo momento sarà possibile parlare di "Evento" di emissione acustica riferendosi alla forma d'onda data dall'insieme delle forme d'onda delle due hits associate alla stessa sorgente [6].

In particolare con riferimento alle norme (ASTM E 1316) si danno le seguenti definizioni:

- Hit: termine per indicare che un dato canale ha individuato e processato un transitorio di emissione acustica
- Evento: un'onda di emissione acustica può essere individuata in forma di hit su uno o più canali. Un evento è un gruppo di hits ricevute da due o più canali da una singola sorgente la quale è localizzata.

In caso si abbia un solo canale quindi il numero di Hits è uguale al numero di Eventi.

Una forma d'onda è da conteggiare come un evento di AE (o Hit nel caso si abbia un unico canale), mentre i cicli al di sopra della soglia (treshold) sono chiamati conteggi (counts). Quindi il treshold è un livello di tensione predefinito che deve essere superato prima che il segnale di AE sia individuato e processato. Questo livello può essere impostato dall'utente a seconda del tipo di applicazione anche se in genere i valori utilizzati stanno sempre nel range di 40÷45 dB. Metodi per il conteggio di AE sono illustrati in figura 2.10. In caso di canali multipli, l'emissione di AE è monitorata in ciascuna locazione dei sensori, ma in alcuni di essi i segnali di AE potrebbero non essere osservati a causa dell'attenuazione o di percorso di propagazione non individuabile. Il numero di fenomeni contati in ciascuno dei canali corrisponde al numero di hits definite prima.

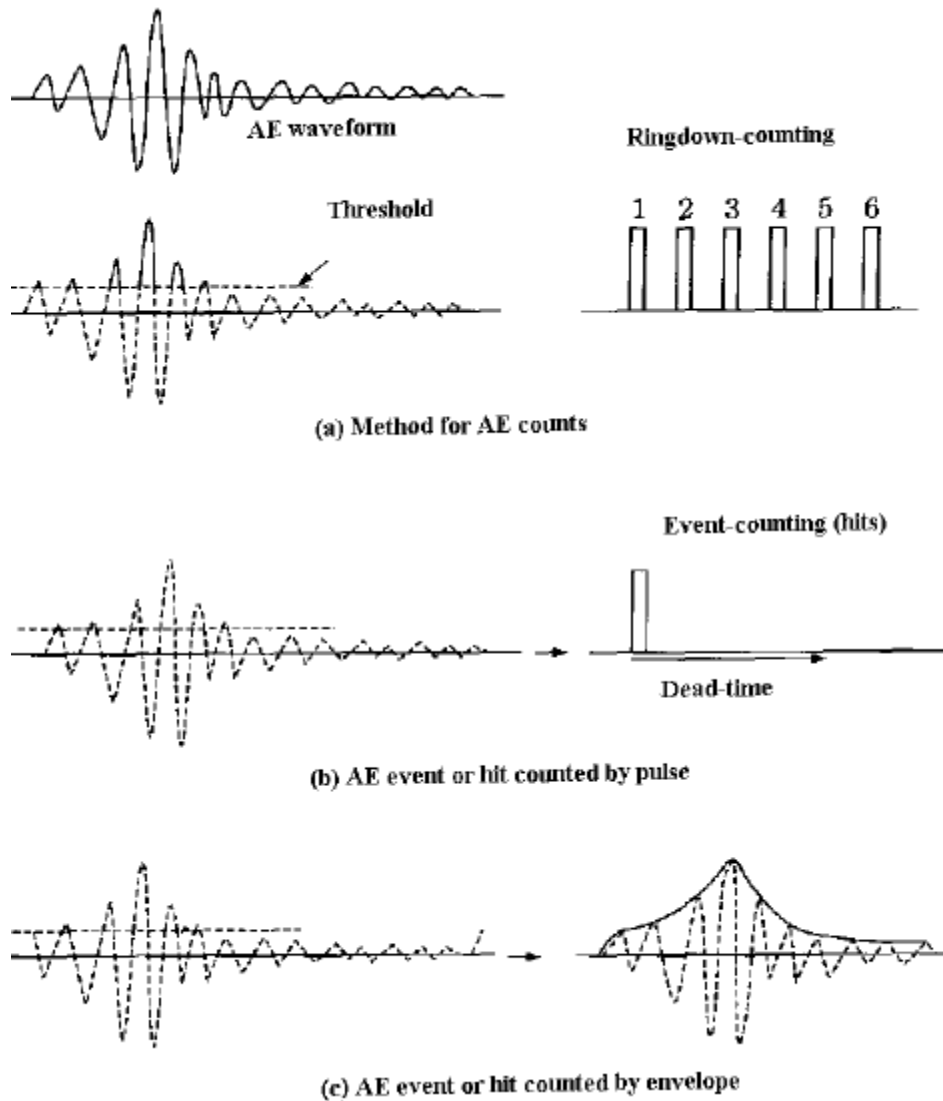


Figura 2.10- Metodi per il conteggio di AE

Le misure sono effettuate su caratteristiche significative del segnale come l'ampiezza, la durata, l'energia e i conteggi. Queste grandezze e il loro rapporto con la soglia di rilevamento sono illustrati meglio in figura 2.11, la quale mostra un tipico segnale di AE come curva tensione/tempo così come apparirebbe all'oscilloscopio. Un tipico segnale dura meno di un centesimo di secondo.

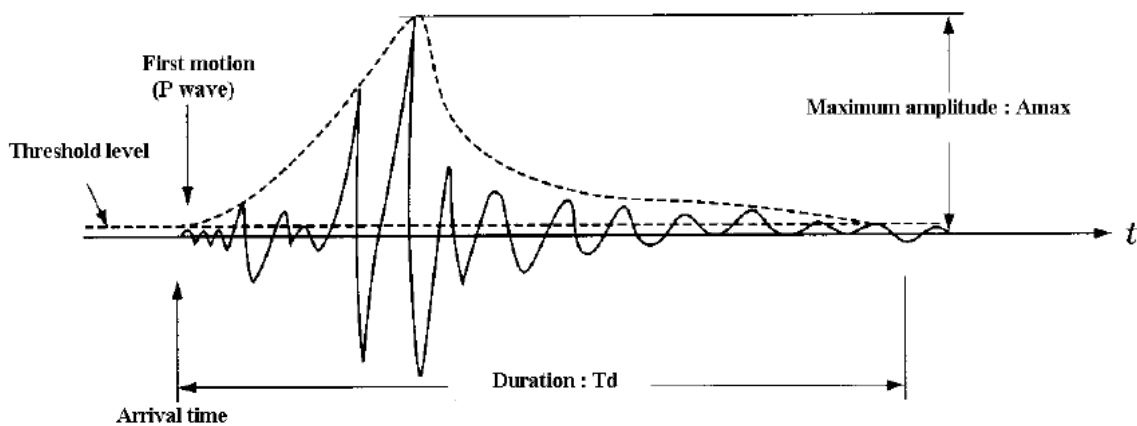


Figura 2.11- Caratteristiche chiave del segnale

La norma ASTM E 610-89 definisce la terminologia standard relativa alle grandezze ed ai fenomeni implicati nello studio delle emissioni acustiche. Ogni evento di AE è caratterizzato da:

- **Ampiezza (Amplitude):** si riferisce al valore più grande presente nella forma d'onda del segnale ed è legata al tipo di sorgente che l'ha prodotta, al materiale ed al suo stato di sollecitazione. È una delle misure più importanti dell'intensità del segnale ed è fondamentale dato che, come si vedrà in seguito, affinché un segnale venga individuato, la sua ampiezza deve superare un valore prefissato (Threshold). Viene generalmente misurata in dB, in una scala che va da 0 a 100. (0 dB corrisponde a un'ampiezza di 1 microvolt all'ingresso del preamplificatore)
- **Durata (Duration):** è il tempo trascorso tra il primo superamento del threshold e l'ultimo; viene misurato in microsecondi. Il rapporto tra la durata e l'ampiezza dà informazioni sulla forma del segnale.
- **Conteggi (Counts):** numero di volte per cui l'ampiezza del segnale supera una soglia prefissata. Si tratta in particolare degli impulsi di uscita del comparatore corrispondenti agli attraversamenti della soglia (vedi parag. 2.6). Una singola Hit può fornire solo pochi conteggi o centinaia di conteggi a seconda dell'intensità e della forma del segnale. Inizialmente i conteggi erano il mezzo più usato per descrivere e quantificare l'attività di AE, poi vennero sostituiti dall'energia. Comunque questi sono ancora utili per l'interpretazione dei dati e, usati insieme all'ampiezza o alla durata, possono dare importanti informazioni sulla forma del segnale.

- Tasso di conteggi (Counts Rate): numero di conteggi nell'unità di tempo.
- Conteggi fino al picco (Counts to peak): numero di conteggi prima di quello di ampiezza massima compreso.
- Energia del segnale: energia elastica totale rilasciata in ciascun evento. Convenzionalmente è misurata come:

$$\text{Energia} = \text{Ampiezza}^2 \times \text{Conteggi}$$

Si tratta dell'area sottostante all'involuppo della curva tensione/tempo (area sottostante alla linea tratteggiata in figura 2.11). Questa è un'altra importante misura dell'intensità del segnale ed è quella più largamente usata per misurare l'attività di AE. Quando una struttura produce molte emissioni in risposta ad un caricamento, le energie dei singoli segnali possono essere sommate per produrre un'energia totale. Tra tutte le tecniche usate per descrivere la quantità di emissione con un singolo numero questa è quella che ha avuto maggiore successo.

- Rise time: intervallo di tempo tra il primo superamento della soglia e il raggiungimento della massima ampiezza.
- Tempo di smorzamento: tempo che intercorre tra il raggiungimento del picco (massima ampiezza) e il termine dell'ultimo superamento di soglia.
- Tempo morto (Dead time): tempo trascorso il quale, se non si ha nessun superamento di soglia, si considera terminato l'evento. Questo può essere regolato dall'operatore (dal μs al ms) in funzione delle caratteristiche del materiale in esame. In particolare per i compositi (molto emissivi) deve essere molto breve (μs) in quanto si rischia di rilevare un unico evento di durata molto lunga; per i metalli invece, meno emissivi e migliori conduttori, è opportuno che sia più lungo (ms) in modo tale che l'eco del segnale, riflesso da una parete vicina, venga compreso nell'evento diretto e non si rischi di localizzare una seconda sorgente inesistente.

Numerose altre caratteristiche del segnale potrebbero essere misurate a seconda delle strumentazioni disponibili, ma quelle appena descritte sono le più utilizzate. Le tipiche strumentazioni in uso oltre a misurare le caratteristiche dei singoli segnali misurano generalmente anche il momento

in cui sono individuate e le variabili ambientali che possono causare l'attività.

In controlli non distruttivi, ogni scostamento dalla condizione di funzionamento "normale" si manifesterà con un incremento del numero di conteggi, dell'ampiezza e dell'energia del segnale

2.6 Rilievo

Per il rilievo delle onde di emissione acustica si utilizzano cristalli piezoelettrici i quali generano una tensione elettrica e una corrispondente separazione di carica quando vengono deformati. Nel sensore di EA la deformazione è prodotta dal moto dell'onda; si tratta della risposta elastica del cristallo piezoelettrico quando viene colpito dall'onda di stress in arrivo. L'elemento piezoelettrico è montato all'interno della custodia del sensore come mostrato in figura 2.12. Il segnale elettrico è generato dal materiale dell'elemento stesso, il quale non necessita di essere alimentato dall'esterno, e quando colpito da un impulso improvviso vibra alla sua frequenza risonante. Ci possono essere molte frequenze risonanti eccitate contemporaneamente. Se scosso da un moto vibratorio l'elemento piezoelettrico produrrà una corrispondente tensione oscillante alla stessa frequenza del moto. L'elemento presenta inoltre una risposta lineare; se il moto in ingresso è raddoppiato la tensione in uscita sarà anch'essa doppia.

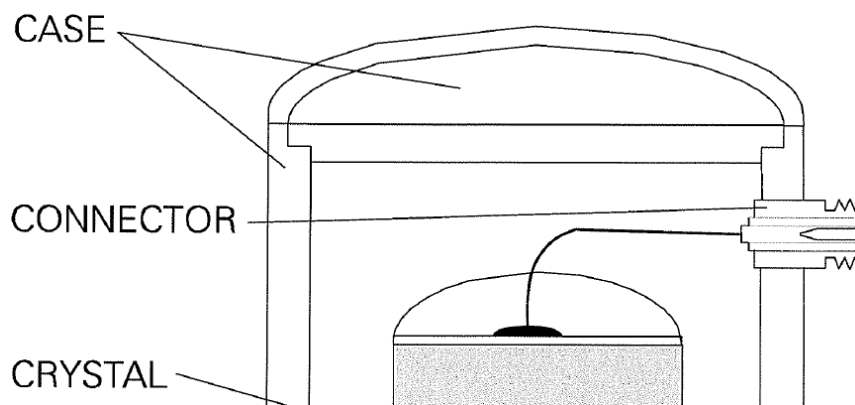


Figura 2.12- Sensore di AE schematico

Il rapporto tra ampiezza della tensione in uscita e ampiezza di quella in ingresso è una misura della sensibilità del sensore. È stato stabilito che questa dipende fortemente dalla frequenza del moto (numero di oscillazione per secondo) ed è migliore alla frequenza di risonanza

dell'elemento. Le curve di calibrazione mostrano come la sensibilità del sensore varia con la frequenza. Un esempio è mostrato in figura 2.13. Le forme di queste curve sono caratteristiche del tipo di sensore e variano ampiamente nella loro sensibilità e risposta in frequenza. Per una data famiglia di sensori le curve di calibrazione dei singoli sensori devono essere strettamente allineate. Con curve di calibrazione come quelle mostrate in figura 2.13 l'ampiezza del moto in ingresso deve essere specificata in unità di spostamento, velocità (metri/secondo) o pressione (microbar). In tutti i casi si riferisce all'ampiezza dell'oscillazione sinusoidale alla frequenza indicata sull'asse delle ascisse.

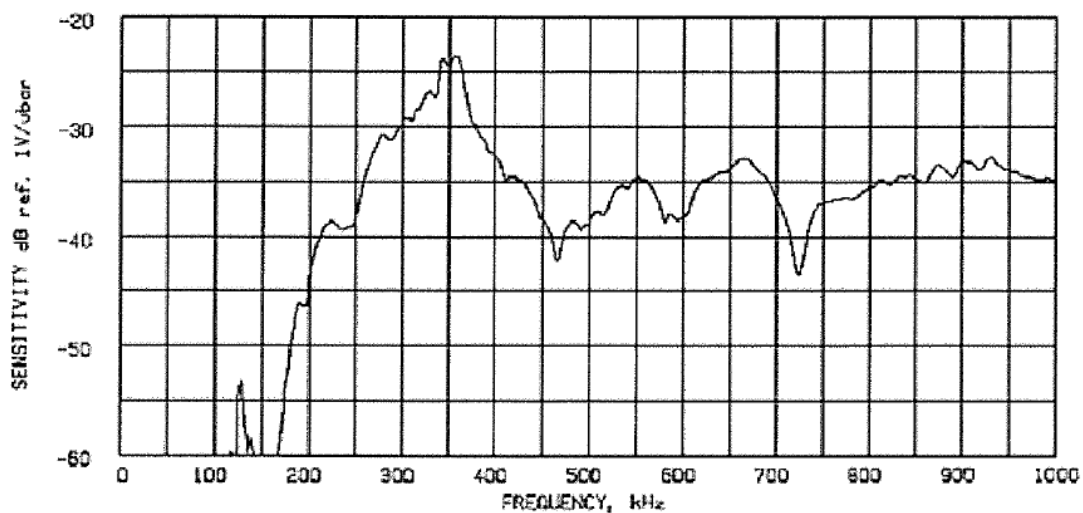


Figura 2.13- Tipica curva di calibrazione di un sensore

Queste curve in genere hanno l'asse delle ordinate (sensibilità) espressa in decibel, in particolare sui certificati di calibrazione del sensore hanno l'asse Y espresso in decibel relativo ad un livello di riferimento indicato, come 1 volt per m/s, cioè 0 dB significa una sensibilità di 1 volt per m/s. Come mostrato in figura 2.13, 6 dB equivale ad una sensibilità di 2 volt per m/s e così via. Matematicamente la formula è:

$$dB = 20 \log \left(\frac{S}{S_{ref}} \right)$$

dove S è la sensibilità e S_{ref} è il livello di riferimento, entrambi espressi in m/s.

La sensibilità del sensore dipende non solo dalla frequenza, ma anche dalla direzione del moto. A differenza degli accelerometri, attentamente progettati per misurare solo la componente del moto parallelo al loro asse, i

sensori di emissioni acustiche rispondono al moto in qualunque direzione. Quindi, per comprendere completamente il significato delle curve di calibrazione, è necessario conoscere il tipo e la direzione dell'onda usata per la calibrazione.

Nella progettazione dei sensori le priorità sono: alta sensibilità, risposta in frequenza ben definita e coerente, prestazioni elevate nell'ambiente di lavoro e immunità al rumore indesiderato. Quest'ultimo può anche includere interferenza elettromagnetica derivante da stazioni radio, sistemi di navigazione ecc. L'insensibilità a questi tipi di rumori è stata molto migliorata con lo sviluppo di sensori con preamplificatori integrati. Tali tipi di sensori hanno un preamplificatore costruito nell'alloggiamento insieme all'elemento piezoelettrico e per test in campo questi presentano grandi vantaggi rispetto alle tipologie di sensori precedenti che richiedevano preamplificatori separati da montare a pochi metri da essi.

Il sensore deve essere in buon accoppiamento acustico con la struttura da testare in modo da individuare il moto dell'onda di AE e fornire un segnale forte. Le tecniche di accoppiamento e di montaggio sono quindi molto importanti. Innanzi tutto un accoppiante acustico in forma di adesivo, liquido viscoso o grasso è applicato sulla superficie del sensore il quale viene poi premuto contro la struttura, la cui superficie deve essere liscia e pulita (risulta quindi necessaria una certa preparazione della stessa). Il sensore deve poi essere tenuto saldamente in posizione tramite l'uso di adesivi, basi magnetiche o altri mezzi. Infine, dopo il montaggio, le prestazioni del sistema vengono verificate simulando un segnale AE (in genere utilizzando la sorgente di Nielsen) e controllando la risposta del sistema.

Il segnale prodotto dal sensore viene amplificato e filtrato, individuato e misurato. Gli amplificatori aumentano la tensione del segnale per portarla ad un livello ottimale per il circuito di misura. Insieme a diversi stadi di amplificazione (generalmente sono presenti un preamplificatore e un amplificatore principale) nello strumento sono incorporati filtri. Questi definiscono il range di frequenza da utilizzare ed attenuano i rumori di fondo a bassa frequenza. Questi processi di amplificazione e filtraggio sono chiamati "condizionamento del segnale"(Figura 2.14). Essi puliscono il segnale e lo preparano per il processo di individuazione e misurazione.

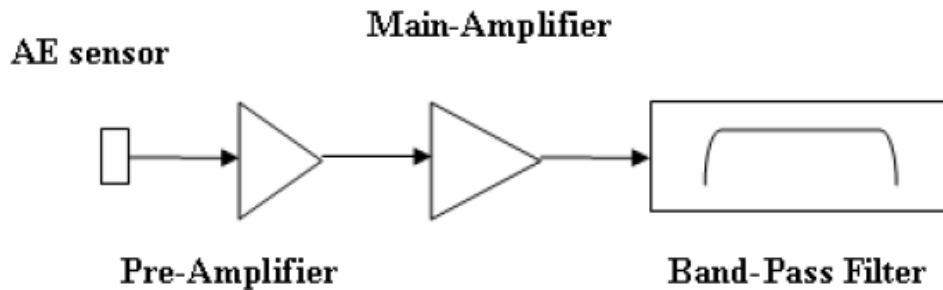


Figura 2.14- Sistema di condizionamento del segnale

Dopo il condizionamento il segnale viene mandato al circuito di individuazione. Si tratta di un comparatore elettronico che confronta il segnale amplificato con una tensione di soglia definita dall'operatore. Il principio è illustrato in figura 2.15. Ogni volta che la tensione supera la soglia ("treshold") il comparatore genera un impulso digitale. Il primo impulso prodotto contrassegna l'inizio del fenomeno ("hit"). Questo impulso è utilizzato per attivare il processo di misurazione del segnale. Man mano che il segnale continua ad oscillare al di sopra e al di sotto del livello di treshold, il comparatore genera ulteriori impulsi. Mentre accade questo circuiti elettronici misurano attivamente le caratteristiche chiave del segnale. Nel corso del tempo l'ampiezza del segnale si riduce ad un livello in cui non si ha più l'attraversamento della soglia. Dopo che un intervallo di tempo predeterminato (chiamato "Hit definition time") è trascorso senza qualsiasi ulteriore impulso dal comparatore, il sistema determina la fine dell'evento. Il processo viene quindi portato alla fine. Il circuito di controllo termina il processo di misura e passa i risultati ad un microprocessore. Infine il circuito di misura viene resettato e ripreparato per l'evento successivo.

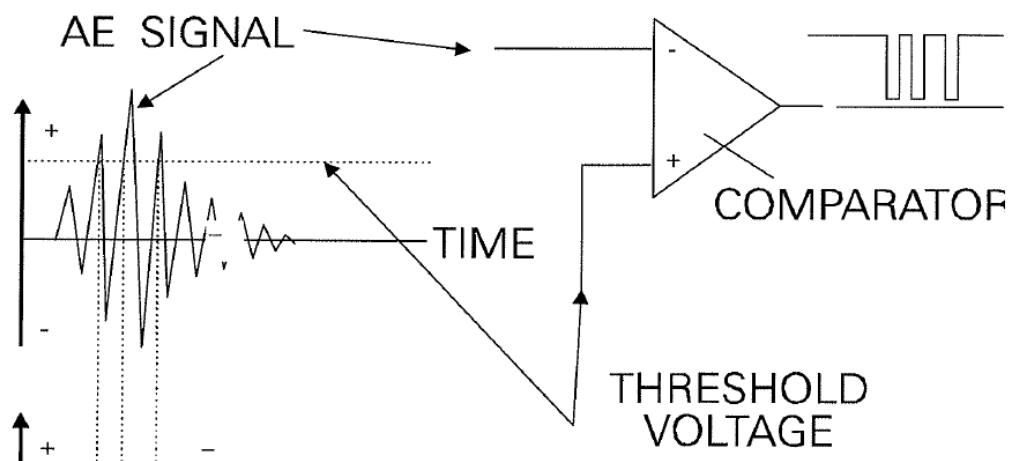


Figura 2.15- Individuazione del segnale tramite confronto col treshold

2.7 Architettura strumentazione

Il layout più comune per strumentazioni di AE è quello chiamato “Architettura basata su hit”. La tipica attività di emissione acustica consiste in una serie di segnali distinti che avvengono a intervalli di tempo irregolari e aventi forme e dimensioni diverse. Questo tipo di architettura è appunto progettata per un’efficiente misurazione e registrazione di questo tipo di attività. Si tratta di una strumentazione in cui il sistema rimane inattivo fino a quando il segnale è individuato dal circuito del threshold come detto in precedenza. Il segnale è misurato e un microprocessore immagazzina i dati registrati contenenti l’istante di individuazione e i risultati delle misure effettuate. Dopo questo il circuito di misura è resettato, pronto per l’hit successiva. Così l’informazione passata al computer consiste in una serie di dati relativi all’hit. Teoricamente l’insieme di dati relativi a ciascuna hit corrisponderanno all’individuazione di un evento di AE nel materiale della struttura sotto controllo. I dati dei test si accumulano nella memoria del computer e vengono mostrati a schermo oppure scritti su disco in accordo col design del sistema. Anche dati ambientali come pressione, forza, spostamento ecc possono essere misurati allo stesso tempo e i risultati scritti con i dati dei segnali.

Da questi dati ricevuti il computer può generare diversi tipi di display, sia durante l’acquisizione dei dati che in qualunque altro momento successivo mediante la riproduzione di file di dati scritti su disco o su altri supporti di memoria.

Il maggiore vantaggio di questo tipo di architettura è che offre una descrizione molto dettagliata delle emissioni, facendo un uso molto economico di spazio per immagazzinare dati. Inoltre è volta a una capacità di analisi dei dati completa e versatile.

Ci sono poi altri tipi di architetture con obiettivi differenti, ma le più utilizzate risultano essere quelle appena descritte.

2.8 Vantaggi e svantaggi

A differenza della maggior parte degli altri metodi non distruttivi, nei test alle emissioni acustiche è la discontinuità stessa a rilasciare energia, fornendo il proprio segnale (in risposta alla tensione). Questi tipi di test

individuano un movimento (mentre gli altri metodi individuano delle discontinuità geometriche).

Vantaggi dei test alle emissioni acustiche:

- Le AE possono essere usate in tutte le fasi di analisi compresi:
 - Test di prova
 - Test di riqualificazione
 - Monitoraggio on-line di componenti e sistemi
 - Individuazione e localizzazione di perdite di fluido in corpi solidi
 - Monitoraggio di saldature in-process
 - Test e caratterizzazione di proprietà meccaniche
- Meno sensibili alla geometria
- Meno invasivi
- Monitoraggio globale
- Valutazione in tempo reale
- Scansione remota
- Rapporto prestazioni/prezzo elevato

Svantaggi dei test alle emissioni acustiche:

- Scarsa ripetibilità: ogni AE è causata da stress unici e ogni caricamento è sempre diverso dal precedente
- Attenuazione: la struttura sotto analisi attenua l'onda di stress acustico
- Storia: i test sono meglio eseguiti se la storia di carico della struttura è nota
- Rumore: le emissioni acustiche possono essere soggette a rumori estranei

I vantaggi e svantaggi rispetto agli altri metodi non distruttivi possono essere sintetizzati come nella seguente tabella:

Emissioni Acustiche	Altri metodi non distruttivi
Crescita/movimento di discontinuità Legate alle tensione/danno Meno sensibili alla geometria Ciascun caricamento è unico Meno invasive Monitoraggio globale Principali limitazioni: attenuazione, dipendenza dalla storia di carico e rumore	Presenza di discontinuità Legati alla forma Più sensibili alla geometria Ispezioni ripetibili Più invasivi Monitoraggio locale Principali limitazioni: dipendenza dall'orientamento della discontinuità e dalla vicinanza alla superficie

Tabella 1- Vantaggi e svantaggi del metodo delle AE

2.9 Analisi dei parametri di AE

Per quanto riguarda il problema di ricerca perdite in condotte idriche esistono già metodi non distruttivi in grado di individuare danni nelle condotte, ma tali metodi si sono dimostrati efficaci solo per sondare tratti limitati. Per rilevazioni in ampi tratti di condotta e a lungo termine sarebbe molto utile fare uso del metodo delle AE. A tal proposito è necessario utilizzare un procedimento che metta in relazione lo stato della condotta con i principali parametri di AE misurati. Questo procedimento, chiamato AE Parameter Analysis, è spiegato nei paragrafi successivi. In particolare il metodo è illustrato prima per il caso più generale di propagazione di cricche in strutture per poi passare al caso specifico di nostro interesse di analisi di perdite in condotte.

2.9.1 Analisi dei parametri di AE nella propagazione di cricche

Da studi effettuati in passato è possibile evidenziare due metodi per la classificazione di fratture tramite la tecnica dell'emissione acustica. Il primo di questi è un metodo basato sull'analisi dei parametri di AE (*AE parameter analysis*), mentre l'altro è un metodo basato sulle funzioni di Green semplificate per l'analisi del momento tensore (*SIGMA analysis*) noto come metodo basato sul segnale [7].

La "SIGMA analysis" si basa sulla teoria generalizzata delle AE [8], mentre la "Parameter analysis" deriva da relazioni empiriche ed è

quindi quest'ultima la tecnica su cui in genere ci si concentra maggiormente.

Nella "AE Parameter Analysis" i parametri di AE come numero di hits, conteggi, durata, ampiezza massima, energia e tempo di salita (mostrati in figura 2.16) registrati dal sistema di misura di AE (come visto nei paragrafi precedenti) sono utilizzati per il calcolo di alcune grandezze caratteristiche.

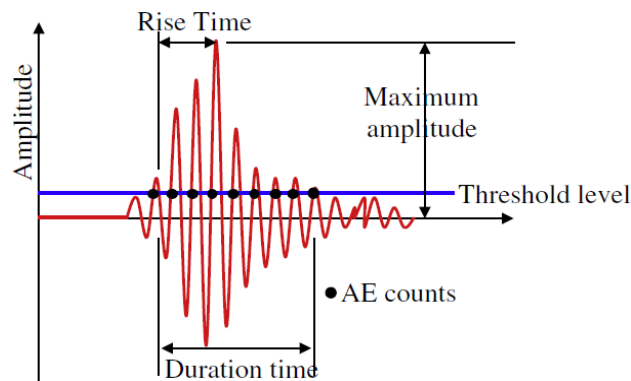


Figura 2.16- Parametri di AE in una Hit

In particolare, secondo questo metodo, al fine di classificare le cricche attive, è possibile utilizzare i parametri di AE quali tempo di salita e ampiezza massima per calcolare un parametro chiamato valore RA, mentre conteggi e durata sono utilizzati per ricavare la Frequenza Media in questo modo:

$$RA = \frac{\text{tempo di salita}}{\text{ampiezza massima}} \quad \left[\frac{ms}{V} \right]$$

$$\text{Frequenza Media} = \frac{\text{conteggi}}{\text{durata}} \quad [kHz]$$

La relazione tra questi due parametri costituisce un criterio di classificazione delle cricche; infatti calcolando questi valori per ciascuna hit e riportandoli in un grafico Frequenza Media/valore RA, si otterrà una nuvola di punti tramite la quale è possibile distinguere le cricche in: cricche di trazione (Tensile Cracks) e cricche di taglio (Shear Cracks) come mostrato in figura 2.17, anche se un criterio ben definito del rapporto tra il valore RA e la frequenza media per una classificazione univoca delle due tipologie di cricche non è ancora stato stabilito.

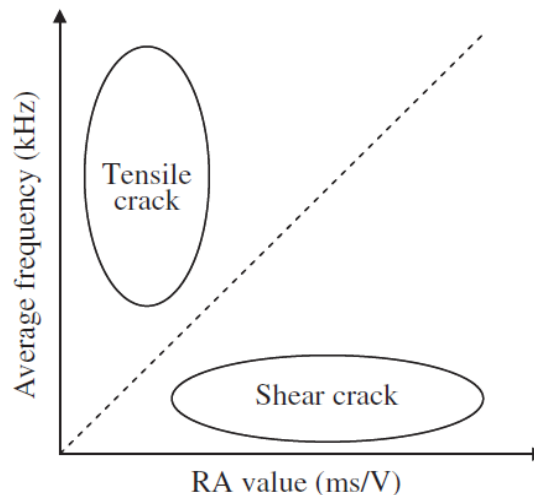


Figura 2.17- Relazione tra frequenza media e RA

Questi due parametri mostrano un cambiamento caratteristico man mano che la cricca cresce (la propagazione di una cricca esibisce firme acustiche differenti a seconda delle modalità di propagazione). La modalità di rottura a trazione, che include movimenti contrapposti dei lati della cricca, risulta in forme d'onda di AE con brevi tempi di salita e alte frequenze. Al contrario modalità di rottura a taglio esibiscono generalmente forme d'onda più lunghe con frequenze più basse e tempi di salita più lunghi [9].

Sulla base di quanto appena detto si possono definire eventi di AE di tipo trazione (Tensile-Type AE events), caratterizzati appunto da frequenze medie elevate e RA bassi e predominanti nella fase iniziale del processo di rottura, ed eventi di AE di tipo taglio (Shear-Type AE events), caratterizzati da frequenze medie basse e RA elevati e dominanti nella fase finale del processo di rottura.

Il comportamento relativo agli andamenti di AF e RA così come quello degli altri parametri di AE consente di trarre conclusioni generali, indipendenti dal tipo di materiale considerato, basate solamente sullo stato della frattura (segnali emessi a stadi diversi della frattura presentano firme diverse). In particolare le prove sperimentali hanno mostrato che è possibile caratterizzare le fasi di danneggiamento in modo molto affidabile utilizzando solo due o tre parametri monitorati durante il controllo non distruttivo, quali appunto Frequenza Media, RA ed Energia [10]. Il beneficio principale di questo approccio che utilizza il monitoraggio dei parametri di AE è

che specifiche firme acustiche possono essere associate a specifici modelli di danno.

2.9.2 Analisi dei parametri di AE nella ricerca di perdite idriche

È possibile adattare quanto detto finora al nostro problema di ricerca perdite in condotte idriche. Secondo prove effettuate in passato il comportamento delle AE in condotte idriche è dipendente dallo stato della condotta stessa; quest'ultimo può quindi essere valutato tramite l'analisi dei parametri di AE. È inoltre possibile stabilire una relazione tra il tasso di AE e il grado di perdita tramite la "Rate Process Theory", la quale permette una valutazione quantitativa del danno nella condotta [11]. In queste prove sensori hanno individuato AE generate da perdite di acqua in condotte principali e, basandosi sulla caratteristiche delle AE, è stato possibile valutare l'entità del danno.

In particolare in questi studi [11] facendo uso della "AE Parameter Analysis", come mostrato precedentemente, sono state analizzate le Hits usando i parametri RA e frequenza media. Il comportamento delle AE generate in caso di presenza di perdita è stato confrontato con quello in caso di assenza di perdita in termini di valore di RA e Frequenza Media e si è giunti alla seguente conclusione:

- Tensile-Type AE events: sono per lo più osservati in caso di presenza di perdita e sono generati appunto da perdite idriche e da cricche nelle condotte.
- Shear-Type AE events: si osservano per lo più in condizioni normali (assenza di perdita) e sono generate dal normale flusso di acqua in condotta (Figura 2.18).

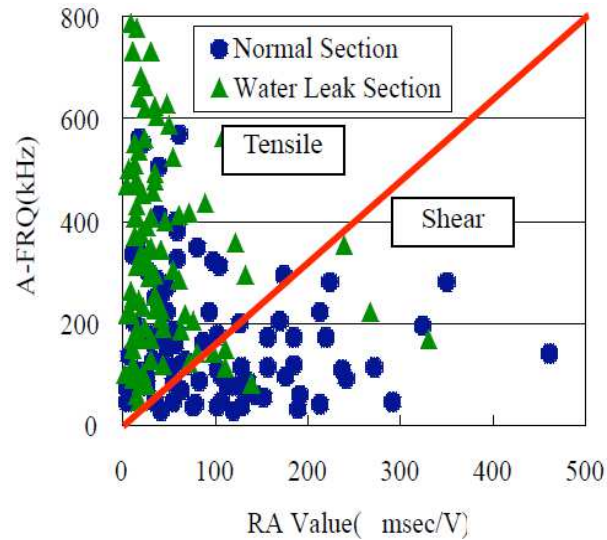


Figura 2.18- Relazione tra Frequenza Media e RA nei casi di presenza e assenza di perdita in condotte idriche

Inoltre in caso di presenza di perdita si nota un sostanziale aumento dell'attività di AE, in particolare il numero di hits nell'unità di tempo (AE Hits/Time) aumenta, così come l'energia associata a ciascuna Hits, mentre in caso di assenza di perdita l'attività di AE si mantiene più o meno costante. Quindi per la valutazione di perdite in sistemi idrici l'analisi dei parametri di AE si dimostra uno strumento efficace.

È possibile dare anche una valutazione quantitativa del danno applicando la "AE Rate Process Analysis" [11]. Infatti, come appena detto, l'aumento di attività di AE in condotte idriche è associato alla generazione di microcricche e alla presenza di perdite. In aggiunta l'attività di AE sembra variare in modo tanto più evidente quanto più alta è la variazione di pressione interna (comportamento delle AE generate strettamente legato al livello di pressione interna).

In conclusione l'attività di AE si dimostra strettamente correlata a perdite di acqua o danni della condotta e può essere analizzata tramite l'analisi dei parametri di AE (per discriminare tra il caso di presenza di perdita e assenza di perdita) e tramite la teoria Rate Process (per dare una valutazione quantitativa della perdita).

L'efficacia di tale metodo è già stata provata in molti casi per condotte principali in plastica, ma non ancora per i rami utenze, i quali, essendo di diametro inferiore, smorzano maggiormente le AE.

CAPITOLO 3

METODI PER LA RICERCA DI PERDITE IDRICHE IN TUBAZIONI DI PLASTICA

3.1 Introduzione

In molti sistemi di distribuzione dell'acqua una percentuale significativa di questa è persa passando dagli impianti di trattamento agli utenti. Secondo un'indagine condotta nel 1991 dall'International Water Supply Association (IWSA), il tasso di perdita o di acqua non contabilizzata è tipicamente nel range del 20-30% della produzione (Cheong 1991). Nel caso di qualche sistema, in genere di quelli più vecchi, la percentuale di acqua persa può salire fino al 50% (AWWA 1987). L'acqua non contabilizzata è di solito attribuita a varie cause, comprese perdite, errori di misura e furti. Secondo il sondaggio quella per perdita è la causa maggiore.

Le perdite idriche sono un problema costoso, non solo in termini di spreco di una preziosa risorsa naturale, ma anche in termini economici. La perdita economica primaria legata alle perdite idriche è il costo dell'acqua grezza, il suo trattamento e trasporto. Le perdite inevitabilmente risultano anche in una perdita economica secondaria in forma di danneggiamento della rete di tubazioni, ad esempio erosione e grandi rotture della condotta e in forma di danneggiamento alle fondamenta di strade ed edifici. Oltre alle perdite economiche e ambientali causate dal problema in esame, le tubazioni danneggiate costituiscono un rischio per la salute pubblica, poiché ogni rottura è un potenziale punto di ingresso per i contaminanti se si manifestano crolli di pressione nel sistema.

La pressione economica, il riguardo al rischio della salute pubblica e il semplice bisogno di conservare l'acqua spingono i gestori del sistema idrico a implementare programmi di controllo delle perdite. In passato sono stati fatti sforzi significativi per sviluppare questi programmi, inclusi verifiche dell'acqua e indagini di rilevazioni delle perdite. Come risultato procedure di programmi sistematici per il controllo delle perdite idriche sono oggi ben stabiliti e ampiamente usati. Per esempio, il manuale "Water

audits and leak detection” dell’America Water Works Association (AWWA) fornisce procedure dettagliate per le verifiche dell’acqua e sondaggi per l’individuazione delle perdite [12].

3.2 La gestione delle DMA

Una DMA (dall’inglese District Metered Area) o distretto viene definita come un’area ben delineata di un sistema di distribuzione, creata di solito tramite la chiusura di valvole o la completa disconnessione di tubazioni, nella quale la quantità di acqua che entra ed esce viene misurata, come mostrato in figura 3.1. Il concetto di gestione di DMA venne introdotto per la prima volta nell’industria dell’acqua del Regno Unito nei primi anni ’80 nell’elaborato “Report 26 Leakage Control Policy & Pratiche” [13], trattante appunto il problema del controllo delle perdite idriche.

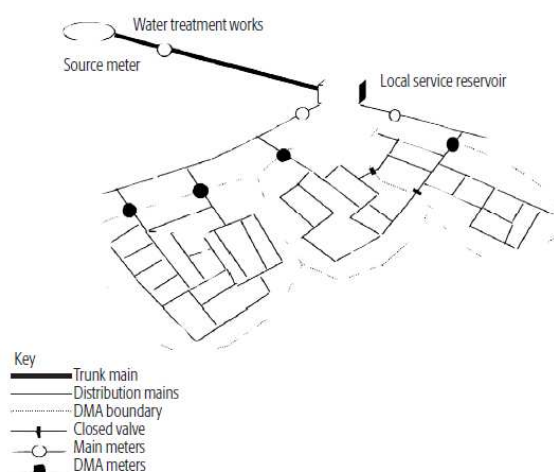


Figura 3.1- Divisione della rete di distribuzione in DMA

L’analisi del flusso, in particolare di quello notturno, permette di quantificare il livello di perdita nel distretto. In questo modo il professionista non solo determina se qualche attività può essere intrapresa per diminuire le perdite, ma confronta anche i livelli di queste nei vari distretti per valutare più precisamente dove e quando è più vantaggioso concentrare l’attività di localizzazione. Esiste un manuale (il Manuale IWA) [14] rivolto al personale avente poca o nessuna esperienza in questo campo, che può essere visto come punto di partenza per questa attività, fornendo orientamenti generali su come le DMA devono essere progettate e i parametri chiave da tenere in considerazione, delineando le linee guida e tenendo comunque conto dell’influenza dei fattori locali.

3.2.1 Perché usare le DMA?

L'approccio tradizionale di controllo delle perdite è sempre stato un approccio passivo in cui la perdita veniva riparata solo quando visibile. Lo sviluppo di strumentazioni acustiche ha migliorato significativamente la situazione, permettendo di individuare anche perdite non visibili. L'applicazione di questi strumenti sull'intera rete idrica tuttavia è un'attività dispendiosa in termini di tempo e di denaro. La soluzione migliore è risultata quindi quella di un sistema permanente di controllo delle perdite in cui la rete è divisa in distretti alimentati da un numero limitato di rami principali, nei quali sono installati contatori del flusso. In questo modo è possibile quantificare regolarmente il livello di perdita in ciascuna DMA così da dirigere l'attività di localizzazione nella parte peggiore della rete idrica.

Inoltre un importante fattore per mantenere un basso livello di perdite nella rete idrica è il controllo della pressione. La divisione della rete in DMA facilita la creazione di un sistema di controllo della pressione permanente, consentendo la riduzione della stessa in ciascuna area così da diminuire le perdite di fondo, il flusso di ciascuna rottura e la frequenza delle rotture annuali.

Molte reti idriche sono gestite senza l'uso di DMA, tuttavia quelle che hanno raggiunto con successo bassi livelli di perdita senza DMA tendono ad avere una combinazione di infrastrutture di alta qualità in buone condizioni, un'operazione efficiente di ripristino e pressioni basse e stabili.

3.2.2 Teoria del controllo delle DMA

Il principio alla base del controllo dei distretti è quello di usare il flusso per determinare il livello di perdita all'interno di un'area ben definita della rete idrica. La definizione delle DMA permette di determinare gli attuali livelli di perdita e di conseguenza dare la priorità alle attività di localizzazione in certe zone. Tramite il monitoraggio del flusso in queste zone è possibile identificare la presenza di nuove rotture così da mantenere le perdite al livello ottimale. La perdita è infatti dinamica e, mentre all'inizio si hanno piccole fuoriuscite di acqua, su periodi di tempo più lunghi i livelli

tenderanno ad aumentare a meno che non venga eseguito un costante controllo delle perdite. Il controllo delle DMA deve essere quindi considerato come un metodo per ridurre e successivamente mantenere un basso livello di perdita nella rete idrica e la chiave di ciò risulta essere la corretta analisi del flusso per determinare se ci sia o meno un eccesso di perdita e per identificarne la presenza di nuove.

Le perdite reali sono definite come la differenza tra ciò che entra nel sistema idrico e il totale consumo degli utenti (corrette per imprecisioni di misura) in un'area ben definita. Esse sono costituite da: perdite (dai rami principali e di servizio fino al punto di consumo e ai serbatoi di stoccaggio) e flussi in eccesso (principalmente dai serbatoi di stoccaggio).

Tradizionalmente le perdite reali venivano quantificate come un volume e calcolate su basi annuali. Tuttavia questo approccio non permette di raggiungere il necessario controllo di queste poiché richiede diversi mesi per identificare un cambiamento importante e la precisione della misurazione è scarsa.

L'entità della perdita può essere quindi calcolata valutando il modello di flusso della rete idrica nelle 24 ore. Una variazione limitata tra la portata minima e di picco, in particolare in una rete con un limitato uso industriale notturno, è indice di perdita. Tuttavia questo approccio non permette di quantificare direttamente il livello di perdita.

La perdita è determinata più accuratamente quando il consumo da parte degli utenti è al minimo e questo accade generalmente di notte. Questo è il principio del minimo flusso notturno originariamente raccomandato nel Report 26 citato precedentemente [13].

La dimensione della DMA inoltre influenza il livello di perdite che può essere identificato. Un'ampia DMA tenderà ad avere maggiori perdite ma anche maggiori consumi notturni, il che significa che la rottura rappresenta una piccola percentuale del minimo flusso notturno riducendo così la sua definizione.

Nei paesi dove il consumo è misurato, è possibile stimare accuratamente il consumo notturno reale applicando un tipico fattore notturno al consumo medio misurato. Questo è quindi sottratto dalla portata minima notturna nella DMA per ottenere il valore di perdita

effettivo. Dove c'è poco o addirittura nessuna misurazione dell'uso del cliente invece è necessario applicare una stima per l'uso notturno. L'approccio più semplice per l'ottenimento dei dati è quello di esprimere la portata notturna (in m^3/ora) come percentuale della portata giornaliera. Se questo valore è più alto del valore fissato dalle linee guida è necessario l'intervento di localizzazione della perdita. Tuttavia questi valori di riferimento variano significativamente da paese a paese. Ad esempio in Germania si applica un valore del 5% mentre negli Stati Uniti il valore corrispondente è equivalente al 35%. Un parametro qualitativo alternativo è usato in Giappone per esprimere il flusso notturno minimo misurato in termini di lunghezza del ramo principale ($m^3/\text{Km}/\text{ora}$) mentre nel Regno Unito è spesso utilizzata la densità delle connessioni ($m^3/\text{connessioni}/\text{ora}$). Poiché la gestione delle DMA implica la comparazione di valori esistenti con valori di riferimento, la scelta di parametri deve riflettere le richieste locali e le caratteristiche della rete idrica.

3.3 Teoria delle perdite

La chiave per una gestione efficace delle perdite usando le DMA è quella di avere una chiara comprensione della teoria delle stesse.

Le reti di trasmissione e distribuzione dell'acqua si deteriorano naturalmente col passare del tempo e, di conseguenza, perdono il loro spessore iniziale. Questo è dovuto a ambienti corrosivi, movimenti del terreno, norme di costruzione scarse, fluttuazioni nella pressione dell'acqua ed eccessivi carichi di traffico e vibrazioni. L'acqua viene quindi persa a causa di danneggiamenti nei diversi componenti delle reti quali tubi di trasmissione, distribuzione e connessioni di servizio, giunti, valvole, idranti e serbatoi di stoccaggio. In aggiunta alle perdite fisiche, molte reti sono affette da perdite apparenti causate da sottoregistrazioni dei contatori, errori contabili e uso di acqua non autorizzato.

In generale le perdite reali possono essere considerate come composte da due componenti principali:

- *Perdite di fondo*: è l'insieme delle sorgenti di perdita provenienti da tutti gli adattamenti nella rete di distribuzione, le quali sono singolarmente troppo piccole per essere individuate tramite ispezioni

visive o acustiche. Il controllo della pressione ha l'influenza maggiore su questa componente di perdita. (Le perdite di fondo sono singole perdite con portate minori di $0.25 \text{ m}^3/\text{h}$ che rappresenta tipicamente la perdita minima che può essere individuata con le moderne strumentazioni)

- *Perdite per rottura*: è la perdita di acqua risultante da rotture che si verificano ogni anno nella rete di distribuzione, compresi i collegamenti di servizio al cliente, le quali possono essere localizzate usando una gamma di attrezzature specializzate e possono essere ulteriormente suddivise in segnalate e non segnalate. La quantità totale di perdita derivante da queste rotture è influenzata dalla velocità con cui la rottura è localizzata e successivamente riparata; è quindi il controllo di questo periodo di tempo che minimizza la perdita.

Volume di perdita per rottura = (portata) x (periodo di tempo durante il quale la rottura esiste).

Le rotture segnalate sono quelle rilevate tipicamente da utenti che hanno problemi di approvvigionamento di acqua o da persone che vedono l'acqua fuoriuscire dal terreno.

Le rotture non segnalate invece sono quelle che rimangono non individuate fino a quando non si effettuano apposite misurazioni.

Le prime sono solitamente visibili ed hanno spesso alte portate. Tuttavia il maggior volume annuale di perdita è generato dalle rotture non segnalate, in quanto il loro periodo di tempo è generalmente maggiore.

Il periodo di tempo di una rottura (ovvero il tempo totale durante il quale la rottura esiste) può essere diviso in 3 periodi distinti, chiamati individuazione, localizzazione e riparazione.

- *Individuazione*: è l'intervallo di tempo che intercorre tra l'avvenimento della rottura e il momento in cui ci si accorge della presenza della stessa.
- *Localizzazione*: è il tempo tipico necessario per localizzare la rottura.

- *Riparazione*: è il tempo necessario per svolgere la riparazione una volta che la perdita è stata localizzata e comprende la pianificazione e la comunicazione di legge alle agenzie stradali.

Per le perdite segnalate il tempo di individuazione e localizzazione è in genere corto, dal momento che la perdita è immediatamente visibile o necessita di essere localizzata per risolvere le lamentele dei clienti e può quindi essere indipendente da qualunque sistema di controllo attivo delle perdite.

Per le perdite non segnalate, invece, il tempo di individuazione è influenzato dalle pratiche di gestione delle stesse: senza la gestione delle perdite, l'apparato rimarrebbe all'oscuro della loro presenza. Se la rete idrica viene controllata una volta all'anno allora in media la durata delle perdite non segnalate sarà sei mesi più il tempo per effettuare la riparazione. Si riporta in seguito un grafico che mostra l'effetto del numero di indagini all'anno sul tempo di individuazione medio (Figura 3.2).

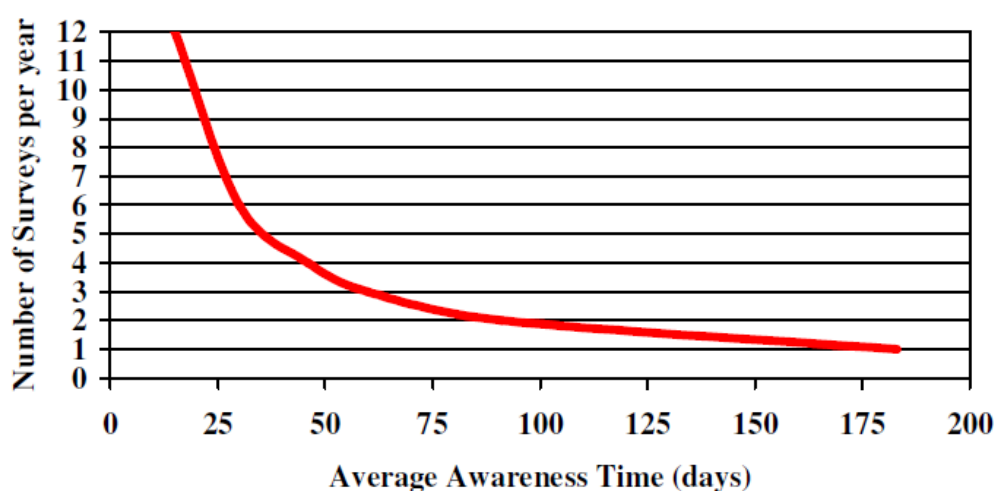


Figura 3.2- Effetto del numero di indagini all'anno sul tempo di individuazione medio

Un'analisi regolare del flusso nelle DMA potrà ridurre la durata della perdita, andando a ridurre il tempo di individuazione. Ad esempio, se il flusso è analizzato ogni mese, allora in media il tempo d'individuazione della perdita non segnalata sarà circa 15 giorni. In particolare in questo caso la durata totale di una tipica perdita non segnalata sarà:

- Individuazione 15 giorni
- Localizzazione 5 giorni

- Riparazione 10 giorni
- Tempo totale 30 giorni

E' necessario notare che i tempi di localizzazione e riparazione saranno dipendenti da pratiche locali, disponibilità di manodopera e legislazione locale in materia di attività stradali.

In seguito si riporta una figura che mostra l'importanza di trattare anche rotture diverse da quelle riportate dal pubblico (Figura 3.3). La durata totale delle perdite maggiori (segnalate) infatti tende a essere molto minore di quella delle perdite più piccole e i tempi di localizzazione e individuazione di queste ultime possono condurre a perdite complessive superiori.

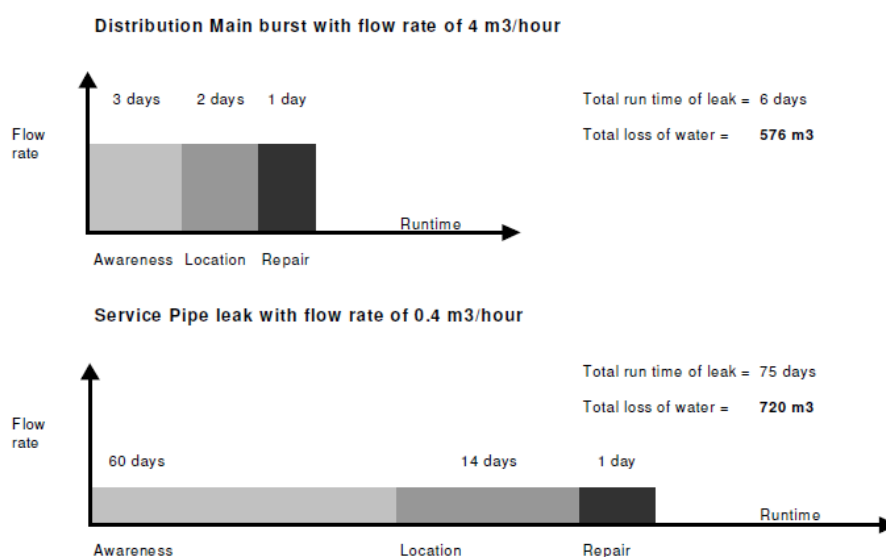


Figura 3.3- Effetto della durata della rottura sulla perdita totale

Il fattore fondamentale per il controllo delle perdite è perciò l'analisi del flusso nelle DMA come detto prima.

I principali obiettivi di queste analisi sono:

- Identificare la presenza di perdite non segnalate in modo da limitare la loro durata media
- Identificare quali parti della rete idrica richiedono una localizzazione attiva della perdita così da distribuire le risorse nel modo più efficace.

3.3.1 Stima delle perdite

Come accennato in precedenza la migliore pratica di analisi dei flussi delle DMA richiede la stima delle perdite quando il flusso nel distretto è al minimo. Questo avviene tipicamente la notte quando la domanda dei clienti è minima e quindi la componente dovuta alla perdita è alla sua massima percentuale del flusso.

Sono disponibili tecniche per analizzare il flusso minimo notturno in modo da stimare il livello di perdita e distinguerla in perdita di fondo e per rottura come mostrato nella figura seguente. (Figura 3.4).

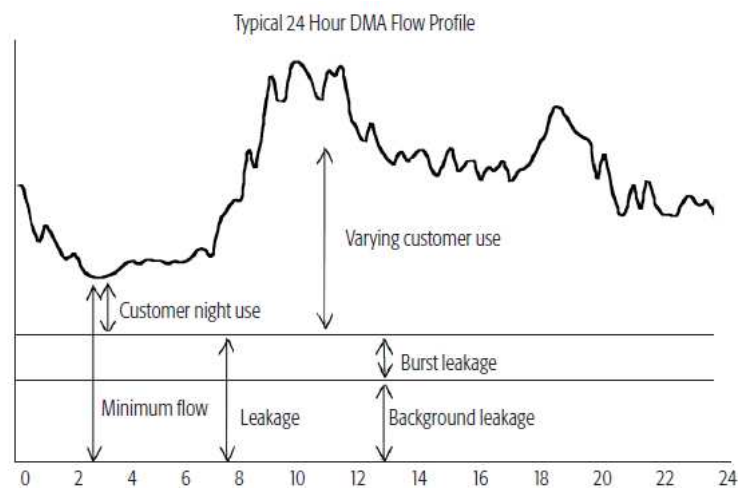


Figura 3.4- Tipico profilo di flusso delle componenti di perdita e uso dei clienti sulle 24 ore

Il minimo flusso notturno può essere registrato e analizzato continuamente notte dopo notte con l'uso di data logger e software appropriati. Questa analisi permette al professionista delle perdite di monitorare nella DMA o gruppi di DMA il verificarsi di nuove rotture e procedere per la loro successiva riparazione come mostrato nella figura seguente (Figura 3.5).

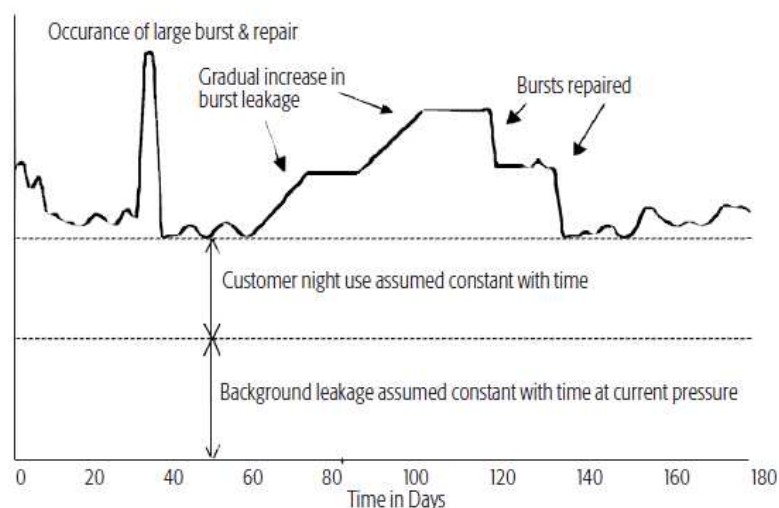


Figura 3.5- Tipico flusso notturno minimo in una DMA

Basandosi su questa analisi, si possono effettuare relazioni schematiche sulle perdite stimate derivanti da queste rotture nelle singole DMA, per fornire al professionista delle perdite una pianificazione che permetta la riduzione delle stesse. Questa riduzione può essere rappresentata come volume di acqua, potenziale numero di rotture che possono essere trovate, stima del costo di acqua che si sta perdendo oppure con un apposito sistema di classificazione sviluppato per adattarsi alle condizioni locali. Quando completamente sviluppata, questa analisi permetterà al professionista di monitorare in modo efficace un gran numero di DMA e focalizzare i lavori in quelle chiave, in modo da generare il maggior beneficio dalla localizzazione delle perdite.

Il livello di perdita può essere ulteriormente confermato da una valutazione 'top down' delle perdite. Questa analisi richiede una valutazione dell'uso dei clienti, che viene poi sottratta dal flusso totale all'interno dell'area considerata per la stima delle perdite. In molti casi questo volume di perdita, misurato su un periodo dai 6 ai 12 mesi, verrà confrontato con l'insieme delle perdite derivanti da DMA nella stessa area.

Mentre l'analisi del flusso notturno appena vista rappresenta una guida per le migliori pratiche, esistono manuali che forniscono possibili approcci provvisori, così che l'analisi possa essere effettuata nel frattempo per consentire la localizzazione della perdita mentre ulteriori dati vengono raccolti. Questo può richiedere anche diversi anni.

3.4 Programma di controllo delle perdite

Ci sono due passi fondamentali in qualunque programma sistematico di controllo delle perdite: verifiche dell'acqua e indagini per la rilevazione delle perdite.

3.4.1 Verifiche dell'acqua

Le verifiche costituiscono il primo passo critico nella definizione di un programma di controllo efficace e sono generalmente classificate in:

- Verifiche globali dell'acqua
- Verifiche del flusso in distretti

Una verifica d'acqua globale coinvolge il conteggio dettagliato del flusso di acqua in ingresso e in uscita dal sistema di distribuzione. In genere questo è basato su misurazioni registrate in passato e controlli delle misurazioni del flusso, quindi richiede uno sforzo significativo, specialmente per grandi sistemi, ma i risultati forniscono un prezioso quadro generale sulle perdite del sistema. Questo aiuta i gestori del sistema idrico nella selezione e implementazione di strategie di controllo delle perdite. In particolare una sintesi dei passi per eseguire una verifica iniziale dell'acqua è la seguente:

- Determinare la quantità di acqua in ingresso alla rete idrica, rettificata per correggere gli errori di misura
- Determinare i consumi autorizzati (fatturati + non fatturati)
- Calcolare le perdite d'acqua (acqua persa = input al sistema – consumi autorizzati)
 - Stimare le perdite apparenti (furto + errori di misura + errori di fattura)
 - Calcolare le perdite reali (Perdite reali = acqua persa – perdite apparenti)

Le verifiche del flusso in distretti, dall'altro lato, vengono eseguite per prima cosa dividendo il sistema di distribuzione in distretti o zone, ad esempio da 20 a 30 km di rete idrica. Le zone sono isolate chiudendo apposite valvole ad eccezione dei punti di controllo dove vengono

installati contatori portatili del flusso. Il flusso d'acqua in un distretto è quindi misurato su un periodo di 24 ore. Il rapporto tra il flusso minimo della notte e il flusso medio giornaliero è poi usato per determinare se siano presenti o meno perdite eccessive. Alternativamente, se tutti i collegamenti di servizio nel sistema idrico sono controllati, informazioni più accurate sulle perdite si possono ottenere monitorando il flusso di acqua e l'utilizzo in zone isolate per un periodo di tempo prolungato, ad esempio una settimana. I contatori sono letti all'inizio e alla fine del periodo di monitoraggio per calcolare le perdite idriche. Queste verifiche in distretti possono essere eseguite separatamente quando necessario o come estensione alle verifiche d'acqua globali. In genere vengono eseguite dopo quelle globali e possono aiutare a trovare perdite non rilevate dalle prime.

Le verifiche d'acqua aiutano a identificare parti del sistema di distribuzione che hanno perdite eccessive, e quindi sono una parte importante di qualunque efficace programma di controllo delle perdite. Sfortunatamente esse non forniscono informazioni circa la loro localizzazione.

3.4.2 Indagini per il rilevamento di perdite

Allo scopo di localizzare le perdite in quelle aree identificate, tramite le verifiche, come soggette maggiormente a questo problema, è necessario effettuare delle indagini per il rilevamento delle stesse. In tali indagini, il sistema idrico è sistematicamente controllato usando attrezzature per il rilevamento delle perdite che individuano suoni o vibrazioni indotti dall'acqua che fuoriesce dalle condotte idriche in pressione. L'attrezzatura acustica è il principale tipo di strumentazione usato a tal proposito dall'industria dell'acqua. Essa include molti tipi di tecniche d'ascolto e il ben noto correlatore.

L'individuazione delle perdite tramite l'attrezzatura acustica consiste generalmente in due fasi. Nella prima fase, un'indagine iniziale è condotta ascoltando suoni tramite tecniche d'ascolto ad alta frequenza in tutti i punti di contatto accessibili del sistema idrico, come idranti e valvole. Posizioni di perdite sospette trovate in questa fase sono poi utilizzate per una determinazione più accurata nella seconda fase, nella quale le perdite sono individuate tramite l'uso di microfoni per

ascoltare i suoni della perdita sul terreno direttamente sopra la condotta a intervalli molto ravvicinati, ad esempio ogni 1.5 m o usando i correlatori. Alternativamente le perdite possono essere individuate utilizzando metodi o strumenti non acustici sviluppati da altre industrie come il metodo del gas tracciante, della fotografia infrarossa (o termografia) e dei radar penetranti nel terreno. Comunque l'uso di questi ultimi da parte dell'industria dell'acqua è molto limitato e la loro efficacia non è ben stabilita

3.4.3 Attrezzatura per l'individuazione delle perdite

Come appena accennato, le attrezzature per l'individuazione delle perdite possono essere sia acustiche che non acustiche.

Le attrezzature acustiche sono quelle usate più comunemente per individuare le perdite nelle tubazioni idriche comunali. Esse identificano suoni e vibrazioni indotte dall'acqua che fuoriesce dalle condotte in pressione. Tra queste troviamo:

- Dispositivi d'ascolto. I dispositivi di ascolto acustici possono essere sia di tipo meccanico che elettronico. I dispositivi meccanici includono aste d'ascolto, idrofoni e geofoni (questi ultimi anche noti col nome di microfoni a terra).

Un'asta d'ascolto è il dispositivo più semplice (Figura 3.6). Questa permette all'utilizzatore di sentire i rumori dell'acqua che fuoriesce dalla tubazione. Nella forma più semplice è costituita da un'asta di acciaio con un auricolare ad una estremità per aiutare a bloccare i rumori esterni. La punta della barra è posizionata sul tubo se esposto o più frequentemente su un idrante o una valvola. I suoni dal punto di perdita sono trasmessi attraverso la barra all'ascoltatore. Se l'utilizzatore è abbastanza prossimo alla perdita possono essere individuate anche le onde a bassa frequenza. Questo dispositivo richiede la pratica e l'abilità dell'operatore per essere utilizzato con successo, ma è uno strumento efficace e poco costoso.



Figura 3.6- Asta d'ascolto

Un geofono è un sensore di vibrazione a terra che consiste in un piccolo peso sospeso da un diaframma in un involucro metallico, collocato direttamente sul terreno sopra la condotta da controllare (Figura 3.7). Un operatore con esperienza, muovendo le teste d'ascolto lungo la condotta, può rilevare le perdite. Il suono indotto nell'involucro dal meccanismo di rilevamento della vibrazione infatti è trasmesso all'ascoltatore tramite piccoli tubi di gomma attaccati a una cuffia stetoscopica. L'effetto stereo delle due teste d'ascolto permette all'operatore di localizzare accuratamente il punto di perdita. Si tratta di uno strumento semplice e poco costoso, ma può mancare alcuni suoni che viaggiano nella condotta e nel sistema idrico. I suoni di perdita per tubazioni non metalliche o i suoni a bassa frequenza dell'acqua che impatta nel terreno circostante non viaggiano bene attraverso la condotta, ma piuttosto attraverso il terreno. In questo caso tali strumenti sono utilizzati in maniera efficace per individuare suoni di perdita che si propagano ampiamente attraverso il terreno.



Figura 3.7- Geofono

L'idrofono consiste in una barra di metallo molto corta collegata ad un auricolare (Figura 3.8). C'è un'ampia varietà di dispositivi di ascolto acustici che fanno uso di idrofoni per

percepire suoni di perdita quando collocati sul sistema di tubazioni o in alcuni casi nel terreno sopra la condotta.



Figura 3.8- Idrofono

Le aste d'ascolto e gli idrofoni sono usati di solito per rilevare i suoni di perdita collocandoli in diretto contatto con la condotta o nelle sue vicinanze come su idranti o valvole. I geofoni invece sono in genere collocati sul suolo direttamente sopra la condotta per individuare i suoni della perdita trasmessi attraverso il terreno.

Anche i dispositivi d'ascolto elettronici includono aste d'ascolto e microfoni a terra, ma, a differenza di quelli meccanici, questi includono sensibili elementi per il rilevamento (come materiali piezoelettrici), amplificatori e filtri di rumore regolabili. L'uscita di questi dispositivi elettronici è alimentata con cuffie che possono avere controlli per regolare il volume. Alcune attrezzature elettroniche possono anche indicare i livelli del suono su palmari analogici o digitali e avere la capacità di memorizzarli per il successivo recupero e confronto. Questi dispositivi sono usati alla stessa maniera di quelli meccanici.

L'efficacia di tutte queste strumentazioni nel localizzare le perdite dipende dalle dimensioni delle stesse, dal rumore ambientale derivante da traffico stradale e dal flusso dell'acqua e dal grado di dettaglio dell'indagine. In generale indagini condotte ascoltando solo in alcuni adattamenti convenienti, come idranti e valvole, individuano principalmente ampie

perdite. Dall'altro lato indagini dettagliate condotte ascoltando in tutti gli adattamenti permettono di individuare anche piccole perdite. In tutti i casi l'efficacia è altamente dipendente dall'esperienza dell'utilizzatore e il processo è dispendioso in termini di tempo.

- Noise loggers. Questi strumenti combinano una testa d'ascolto con un registratore digitale in un singolo sensore che può essere attaccato al sistema e lasciato sul posto per operare su un ampio periodo di tempo (figura 3.9). Al termine del periodo di test, i registratori vengono rimossi e i dati vengono scaricati su un apposito software per l'individuazione e localizzazione della perdita per essere analizzati. La frequenza di registrazione dell'intensità dei suoni viene predefinita dall'operatore e può variare da uno per millisecondo a uno per minuto e lo strumento può rimanere in campo per diversi giorni, limitati solo dalla capacità di immagazzinare dati dell'unità. Queste strumentazioni costituiscono un metodo efficace e a basso costo per effettuare misure continue, specialmente quando si desidera effettuare misure durante la notte. La loro redditività economica e l'efficacia nell'individuazione delle perdite comunque è discutibile, inoltre non sono adatti a localizzarle. Rispetto alle strumentazioni descritte in precedenza è 3 volte meno efficiente se usato in modo temporaneo cioè spostandosi da un'area all'altra. Presentano vantaggi solo quando le altre strumentazioni non possono essere utilizzate durante il giorno a causa del rumore ambientale.



Figura 3.9- Noise logger

- Correlatori. I correlatori sono dispositivi basati su computer portatili con a bordo componenti per l'acquisizione e l'analisi dei dati (figura 3.10). Queste strumentazioni lavorano misurando segnali di vibrazioni o suoni in due punti che delimitano la posizione di una perdita sospetta. I sensori di vibrazioni (generalmente accelerometri) sono attaccati a idranti, valvole o a qualsiasi altro punto di contatto con la condotta. Alternativamente possono essere utilizzati gli idrofoni. Questi vengono inseriti negli idranti tramite appositi adattamenti. I segnali di vibrazioni e di suoni sono di solito trasmessi dai sensori al correlatore tramite trasmettitori radio wireless. I moderni correlatori includono anche amplificatori elettronici e filtri di rumore regolabili per aumentare la qualità dei segnali misurati.

Al fine di individuare la posizione della perdita sospetta, i correlatori per prima cosa determinano l'intervallo di tempo tra i segnali in arrivo a ciascun sensore utilizzando il metodo di cross correlazione. La posizione della perdita rispetto a uno dei punti di misura è quindi facilmente calcolata dal correlatore basandosi su semplici relazioni algebriche tra il tempo di arrivo dei segnali individuati da ciascun sensore, la distanza tra i punti di misura e la velocità di propagazione dell'onda nella condotta, che dipende dalle dimensioni e dal materiale della stessa.

In genere l'uso di questi strumenti è più efficiente e fornisce risultati più accurati del semplice ascolto con microfoni a terra, inoltre è meno dipendente dall'esperienza dell'utilizzatore rispetto alle tecniche descritte prima. Tuttavia essi richiedono una formazione intensiva e possono essere inaffidabili per piccole perdite in tubi di acciai duttili e per la maggior parte delle perdite in condotte in plastica e di ampio diametro. Sono inoltre molto costosi. Dalla loro introduzione agli inizi degli anni '80 comunque questi strumenti hanno migliorato significativamente la capacità di individuare le perdite.



Figura 3.10- Correlatori

Tra le attrezzature non acustiche troviamo:

- Termografia. Il principio alla base dell'uso di questa tecnica per l'individuazione delle perdite è che l'acqua fuoriuscendo da una condotta interrata cambia le caratteristiche termiche del suolo adiacente e a sua volta lo rende un dissipatore di calore più efficace rispetto al terreno circostante asciutto (Figura 3.11). Scanner a infrarossi possono essere utilizzati per individuare anomalie termiche sopra la condotta, probabili indicatrici di perdite e possono essere sia palmari che montati su un veicolo. La termografia è stata usata con successo in passato per localizzare aree delaminate in ponti autostradali.

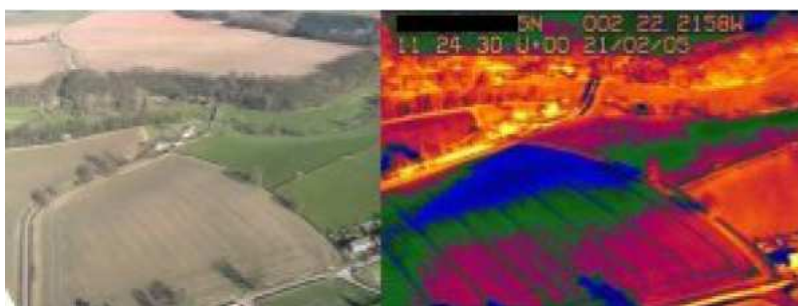


Figura 3.11- Termografia

- Metodo del gas tracciante. Questo metodo coinvolge l'introduzione nella rete idrica di gas atossici, insolubili e più leggeri dell'aria. Gas comunemente usati sono l'elio e l'idrogeno. Questi gas, iniettati nelle condotte, fuoriescono nei punti delle rotture e quindi, essendo più leggeri dell'aria, permeano il suolo e la pavimentazione. Rilevatori di gas

altamente sensibili sono impiegati per localizzare il gas che fuoriesce direttamente sopra la condotta (Figura 3.12). In molti casi la portata del gas individuato dà indicazioni sulla grandezza della rottura.



Figura 3.12- Rilevatori di gas

- Metodo dei liquidi traccianti. Questo metodo è usato raramente e consiste nell'iniettare un liquido, chiamato liquido marcatore, nel sistema idrico e individuarlo quindi nelle acque di superficie (Figura 3.13). Vari marcatori possono essere utilizzati a seconda della natura del sistema idrico. Il cloro è facilmente iniettato e individuato e costituisce un marcatore per quei sistemi che non mantengono di norma un residuo di cloro. Il fluoro può essere un altro marcatore da iniettare sia in sistemi clorurati che non clorurati. La presenza di fluoro nelle acque superficiali, in questo caso, è un indicatore positivo di perdite d'acqua nella tubazione principale, sebbene non sia nota l'esatta posizione e intensità della perdita.



Figura 3.13- Liquidi marcatori

- Radar penetranti nel terreno (GPR). In questo metodo un breve impulso di onde elettromagnetiche (da 125 MHz a 370 MHz) è trasmesso nel terreno utilizzando un'antenna trasmittitrice radar (Figura 3.14). Quando un impulso radar incontra l'interfaccia tra due diversi materiali, questo viene parzialmente riflesso sulla superficie dove è rilevato da un antenna ricevitrice radar. La riflessione parziale delle onde elettromagnetiche all'interfaccia tra due materiali, o in una qualunque anomalia, è dovuta a proprietà dielettriche diverse. L'intervallo di tempo tra le onde elettromagnetiche trasmesse e riflesse è quindi utilizzato per determinare la profondità della superficie riflettente. Tramite la trasmissione di impulsi radar a posizioni regolari della superficie, ad esempio eseguendo una scansione, è possibile determinare le dimensioni e la profondità di oggetti interrati. Questi strumenti possono essere utilizzati per l'individuazione delle perdite in due modi: (1) identificando cavità nel suolo create dal flusso turbolento delle perdite d'acqua o (2) identificando segmenti di condotta che appaiono più profondi del previsto a causa dell'incremento della costante dielettrica del suolo circostante saturo di perdite d'acqua.



Figura 3.14- GPR

Le tecniche attualmente più utilizzate e che presentano maggiore successo sono comunque quelle di tipo acustico. La loro efficacia però dipende da numerosi fattori quali dimensioni, tipo e profondità della condotta, tipo di terreno e livello di falda acquifera, tipo e dimensione

della perdita, pressione della condotta, rumori interferenti e sensibilità e risposta in frequenza della strumentazione.

Il materiale e il diametro della condotta hanno un effetto significativo sull'attenuazione dei segnali di perdita, ad esempio questi viaggiano più velocemente in condotte in metallo mentre sono fortemente attenuati in quelle in plastica, inoltre maggiore è il diametro della condotta, maggiore è l'attenuazione e più difficoltosa risulta l'individuazione della perdita. Il materiale e il diametro della condotta influenzano anche le frequenze predominanti dei segnali, in particolare più il diametro è grande e meno la condotta è rigida e minori saranno le frequenze dominanti. Questo effetto rende i segnali di perdita suscettibili a interferenza da vibrazioni a bassa frequenza derivanti ad esempio da pompe e traffico stradale.

Il tipo di suolo e il livello di falda acquifera influenzano in modo significativo l'intensità dei segnali di perdita alla superficie del terreno. In particolare questi risultano maggiormente udibili in terreni sabbiosi che in quelli argillosi, e in asfalto e superfici compatte piuttosto che nell'erba. Il segnale inoltre è smorzato se la condotta è al di sotto del livello di falda acquifera.

Le caratteristiche acustiche dei suoni di perdita variano anche col tipo e la dimensione della perdita. Spaccature e pozzi di corrosione nelle pareti della condotta inducono segnali di perdita più forti e frequenze più alte rispetto alle perdite ai giunti e alle valvole. Generalmente, maggiore è la perdita, più forte è il segnale, ma questo potrebbe non essere vero per perdite molto ampie. Maggiore è la pressione nella condotta, maggiore sarà il segnale.

Maggiore è la sensibilità dei sensori e il rapporto segnale/rumore dell'attrezzatura di registrazione e condizionamento del segnale, minori sono le perdite (in termini di dimensioni) che è possibile individuare. Le moderne attrezzature acustiche incorporano componenti di condizionamento del segnale, come filtri e amplificatori, per risaltare i segnali. I filtri rimuovono il rumore interferente che avviene al di fuori del range di frequenza dominante nei segnali di perdita. Gli amplificatori incrementano il rapporto segnale/rumore e rendono udibili anche i segnali deboli. Se la risposta in frequenza dell'attrezzatura non si estende a frequenze

sufficientemente basse, si possono mancare perdite in condotte in plastica e di diametro maggiore.

CAPITOLO 4

ANALISI COMPARATIVA DI SEGNALI ACQUISITI TRAMITE ACCELEROMETRI E IDROFONO

4.1 Obiettivo della ricerca

La ricerca ha avuto come obiettivo il confronto tra segnali acquisiti da accelerometro e idrofono relativamente all'efficacia nell'individuazione di perdite idriche mediante apposito algoritmo (paragrafo 5.1) ed ha coinvolto numerosi test sul campo, eseguiti sotto condizioni controllate in un impianto di rilevamento perdite sperimentale, appositamente costruito, adiacente alla sede della Divisione Reti R & S di Hera a Forlì.

4.2 Il circuito di prova

Si tratta di un circuito idraulico interrato in grado di riprodurre le condizioni al contorno con cui avvengono le rotture nella realtà, permettendo di valutare l'influenza di vari fattori, quali:

- Materiale dell'allacciamento e della condotta
- Presenza contatore
- Pressione di rete
- Portata
- Stagionalità
- Distanza della rottura dal punto di misura

Il circuito idraulico (Figura 4.1) è costituito da due condotte in PVC, del diametro nominale di 90 mm, lunghe complessivamente 150 m, utilizzate come condotte principali. A queste sono collegate 12 condotte di diametro inferiore (32 mm) in PVC e PE, lunghe circa 10 m (tranne una, quella cerchiata in viola in figura 4.1, lunga circa 30 m), per simulare le condotte di servizio, ovvero quelle che vanno dalla condotta principale ai contatori. Questa lunghezza degli allacci rispecchia la distanza media dal punto di derivazione al contatore, secondo i dati statistici sulle reti. Tutte le condotte

si trovano a una profondità di circa 50 cm nel terreno. Alcuni allacci sono stati interrati utilizzando solo il terreno vegetale rimosso per lo scavo, altri invece sono stati posati con letto di sabbia sul fondo della trincea (spessore 5 cm circa) e con un primo ricoprimento con lo stesso materiale. Lo scavo è stato poi completamente ripristinato utilizzando il terreno vegetale rimosso e il ricoprimento in sabbia serve per simulare le condizioni di posa che vengono realizzate nei centri urbanizzati, al fine di proteggere la condotta e ridurre le probabilità di rottura.

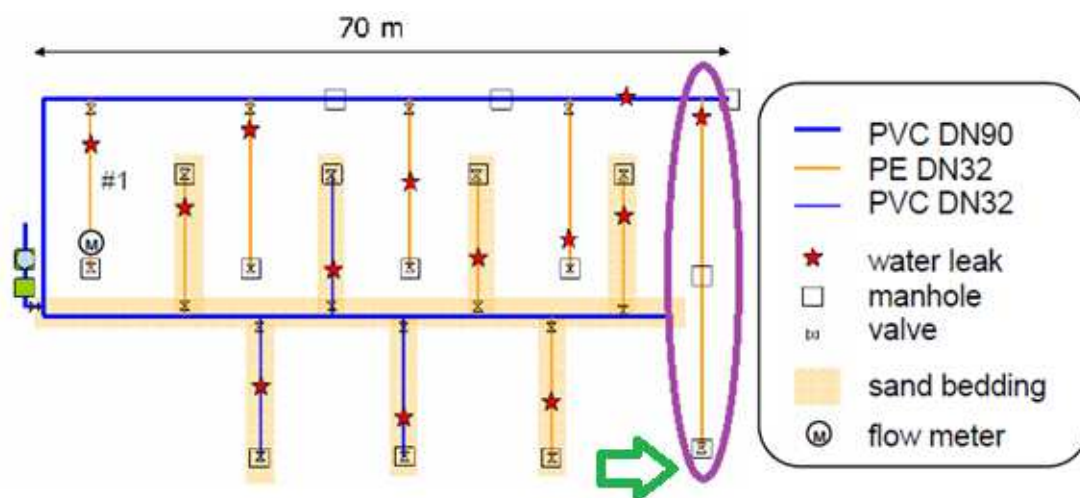


Figura 4.1- Schema del circuito di prova.

La rete può essere alimentata idraulicamente sia in maniera diretta, aprendo la valvola che la collega all'acquedotto cittadino (solitamente ad una pressione di circa 3.5 bar), sia grazie ad un sistema con serbatoio, pompa e autoclave, per imporre condizioni di pressioni nel circuito sperimentale tra 0 e 10 bar.

La scelta di un sistema ad autoclave offre il vantaggio di non perturbare il sistema, permettendo di realizzare i test in condizioni di assoluto silenzio. Questo non sarebbe possibile, cercando di mantenere regimi di pressione elevati, tramite l'utilizzo di pompe in linea.

La nostra sperimentazione si è concentrata sull'allaccio più lungo nel circuito (quello cerchiato in viola in figura 4.1) in PE, che rappresenta il materiale più diffuso sulle reti gestite da Hera e lo standard per le nuove realizzazioni. Esistono però realtà limitate in cui gli allacci sono stati realizzati negli ultimi anni con condotte in PVC ed è stato quindi utile includere anche questa tipologia di materiale nella rete sperimentale.

Durante i test i sensori sono stati posizionati dopo la valvola terminale di questo allaccio, secondo diverse configurazioni che verranno illustrate nei paragrafi successivi. In figura 4.1 è indicata con la freccia verde la posizione dei sensori (punto di misura).

Per simulare la perdite si sono realizzati nella condotta cinque tagli longitudinali, ciascuno della lunghezza di circa 2 cm, collocati a una distanza rispettivamente di 3, 8, 13, 18 e 26 m dal punto di misura. Questi tagli così realizzati riproducono le tipologie di perdite più comuni che avvengono generalmente nelle condotte reali. Per ripristinare poi le condizioni iniziali in modo da eseguire test in assenza di perdita è possibile chiudere questi tagli tramite manicotti removibili.

4.3 La catena di misura

I sensori utilizzati per l'esperimento sono due accelerometri piezoelettrici della PCB Piezotronics aventi sensibilità diversa (come si vedrà meglio in seguito) e un idrofono. Questi sensori sono collegati, secondo diverse configurazioni (vedi tabella 1), ad un acquisitore e i dati sono poi trasmessi ad un pc dotato di un apposito software per la gestione delle acquisizioni.

Le rilevazioni sono state effettuate utilizzando quattro tipi differenti di setup che si diversificano tra di loro per il tipo di acquisitore utilizzato (scheda National Instruments USB-9235 piuttosto che acquisitore LMS SCR01) e per la configurazione dei sensori. Si riporta di seguito una tabella con i vari setup utilizzati (Tabella 2).

Setup #	Acquisitore	Config. sensori	Descrizione
1	NI USB-9233 (HERA)	A	Accelerometro (asse sensibilità radiale, 1V/g) Idrofono
		B	Accelerometro (1V/g) Idrofono alternato ad Accelerometro (100 mV/g)
2	LMS SCR01 (UNIBO)	C	Accelerometro (1V/g) alimentato con amplificatore (gain 1 e 100) Idrofono Accelerometro (asse sensibilità radiale, 100 mV/g)
		D	Accelerometro (1V/g) alimentato con amplificatore (gain 100) Idrofono Accelerometro ASSIALE (asse sensibilità parallelo ad asse condotta, 1 V/g)

Tabella 2- La catena di misura.

4.3.1 L'accelerometro

Si tratta di uno strumento di misura in grado di rilevare e/o misurare l'accelerazione (forza per unità di massa). Esistono vari tipi di accelerometri, ma il principio di funzionamento è per tutti il medesimo: si basa sulla rilevazione dell'inerzia di una massa quando viene sottoposta ad una accelerazione. La massa viene sospesa ad un elemento elastico, mentre un qualche tipo di sensore ne rileva lo spostamento rispetto alla struttura fissa del dispositivo. In presenza di un'accelerazione, la massa (che è dotata di una propria inerzia) si sposta dalla propria posizione di riposo in modo proporzionale all'accelerazione rilevata. Il sensore trasforma poi questo spostamento in un segnale elettrico acquisibile dai moderni sistemi di misura.

Gli accelerometri utilizzati nelle nostre rilevazioni sono accelerometri piezoelettrici, cioè sfruttano, come principio per la rilevazione dello spostamento della massa, il segnale elettrico generato da un cristallo piezoelettrico quando è sottoposto ad una compressione.

In questi accelerometri la massa viene sospesa sul cristallo piezoelettrico. In presenza di un'accelerazione la massa comprime il cristallo, il quale genera un segnale elettrico proporzionale alla compressione.

Visto che l'elemento elastico è un cristallo, le caratteristiche di questi dispositivi sono particolari:

- Presentano una sensibilità relativamente bassa;
- Possono rilevare accelerazioni elevatissime senza danneggiarsi;
- Non possono rilevare accelerazioni costanti nel tempo.

Gli accelerometri, nel campo della ricerca di perdite idriche, rilevano le vibrazioni indotte dalle perdite nella parete della condotta, ma sono normalmente utilizzati per misurare segnali di perdita in tubazioni metalliche. Nella pratica comune questi sensori vengono attaccati direttamente alla condotta se accessibile, altrimenti possono essere attaccati su idranti o valvole interrato. Il loro utilizzo su condotte in plastica è tuttora limitato al rilievo di perdite di grandi dimensioni.

Durante le nostre prove i due accelerometri piezoelettrici sono stati montati nel punto di misura illustrato precedentemente, tramite una basetta metallica, secondo le diverse configurazioni viste in precedenza (tabella 2). Uno di questi accelerometri, che chiameremo accelerometro HERA, presenta una sensibilità di 1 V/g, mentre l'altro, che chiameremo accelerometro UNIBO, presenta una sensibilità di 100 mV/g. In figura 4.2 è mostrato per esempio uno degli accelerometri applicato, nel punto di misura, con asse di sensibilità radiale.



Figura 4.2- Accelerometro applicato nel punto di misura (valvola terminale)

4.3.2 L'idrofono

L'idrofono è uno strumento appositamente progettato per rilevare suoni provenienti dall'acqua. È composto da un trasduttore piezoelettrico che produce un segnale elettrico ogni volta che subisce un mutamento di pressione. Un idrofono è in realtà in grado di registrare suoni anche nell'aria, ma sarà in ogni caso meno sensibile nel registrare il segnale acustico in quanto la sua impedenza acustica è maggiormente adatta ad un ambiente liquido, più denso dell'aria.

Anche gli idrofoni quindi possono essere molto utili nel rilievo di perdite idriche. Questi strumenti sono molto più sensibili e quindi più efficaci degli accelerometri. Sono in grado di rilevare le perturbazioni di pressione indotte dal rumore di perdita nell'acqua all'interno del tubo e vengono installati su idranti o su valvole di sfiato usando appositi adattamenti. Da studi effettuati su condotte principali di reti di distribuzione in plastica gli idrofoni si sono mostrati più efficaci

degli accelerometri per misurare segnali di perdita in situazioni difficili (come in caso di perdite di piccole dimensioni, in luoghi con alti livelli di rumore di fondo ecc.) e in caso di ampie distanze. Inoltre questi strumenti risultano più efficaci per segnali a basse frequenze, che sono quelli dominanti in condotte in plastica e/o di grandi diametri [15].

Durante le nostre rilevazioni l'idrofono è stato montato nella parte terminale del tubo, dopo la valvola a saracinesca come mostrato in figura 4.3.



Figura 4.3- Idrofono montato nella parte terminale della condotta.

4.3.3 Le schede d'acquisizione

Le schede di acquisizione utilizzate permettono di effettuare le acquisizioni utilizzando i tre sensori contemporaneamente.

L'acquisitore utilizzato nel setup 1 è una scheda della National Instruments USB-9233 a quattro canali, con un intervallo dinamico di 102 dB e capace di digitalizzare i segnali in input a velocità comprese tra 2 e 50 kS/s (Figura 4.4 a).

L'acquisitore utilizzato nel setup 2 invece è un acquisitore LMS SCR01 (Figura 4.4 b).



Figura 4.4- a) Acquisitore NI USB-9233; b) Acquisitore LMS SCR01.

4.4 Esecuzione delle rilevazioni

Le acquisizioni sono state effettuate, alimentando il circuito con la pressione di rete (circa 3.5 bar), prima in condizioni di perdita poi in condizioni di condotta integra andando a riparare le perdite tramite manicotti. In particolare sono state generate e successivamente riparate 5 perdite ciascuna a una distanza rispettivamente di 3, 8, 13, 18 e 26 m dal punto di misura (valvola terminale), come accennato in precedenza. In figura 4.5 è mostrata una delle perdite generate sulla condotta e il rispettivo manicotto che verrà utilizzato per la successiva riparazione della stessa.



Figura 4.5- Perdita generata e rispettivo manicotto.

Sono state eseguite rilevazioni in giornate diverse utilizzando i differenti setup illustrati nei paragrafi precedenti. In particolare:

- *20 settembre 2013*: sono state effettuate misurazioni delle perdite su condotta interrata con acquisitore NI USB-9233 sfruttando due canali contemporaneamente (accelerometro HERA montato con asse di sensibilità radiale e idrofono). Si sono fatte 5 acquisizioni per ogni condizione, ciascuna della durata di 10 secondi con una frequenza di campionamento F_c di 5000 Hz. In questo caso le perdite sono

risultate apparentemente non rilevabili mediante i segnali accelerometrici.

- *4 ottobre 2013*: visti gli inaspettati risultati negativi delle precedenti acquisizioni si è proceduto ad una verifica della funzionalità della catena di misura tramite calibratore UNIBO e introducendo dei disturbi esterni quali l'apertura della valvola di sfiato dell'idrofono e urti su condotta e terreno vicino al punto di misura. Si è usata come prima la scheda d'acquisizione NI USB-9233 utilizzando due canali contemporaneamente, collegando al primo canale l'accelerometro HERA e al secondo canale l'idrofono alternato all'accelerometro UNIBO. In questo caso ci si è concentrati solo sulle perdite a 3 e a 26 m dal punto di misura (cioè quelle rispettivamente più vicina e più lontana dal punto di misura). Inoltre per ogni condizione sono state eseguite due acquisizioni ciascuna della durata di 30 secondi utilizzando una frequenza di campionamento di 5000 Hz. Questa durata delle registrazioni abbinata ad un numero elevato di medie effettuate nella successiva analisi, è tale da consentire di diminuire l'effetto dovuto ad impulsi ed ai disturbi generati da eventi accidentali (passaggio di automezzi in strada ecc.). I risultati di queste prove hanno dato risultati positivi, ossia il non rilevamento delle perdite nelle prove del 20 settembre non dipende da difetti della catena di misura utilizzata.
- *29 ottobre 2013*: si è proceduto a modifiche della catena di misura e delle condizioni al contorno per valutare l'influenza di questi parametri sulle prestazioni dell'algoritmo applicato a segnali da accelerometri e idrofono. In particolare per queste acquisizioni si è utilizzato l'acquisitore LMS SCR01 sfruttando tre canali contemporaneamente, collegando al primo canale l'accelerometro HERA alimentato con amplificatore (gain 1 e 100), al secondo canale l'idrofono e al terzo canale l'accelerometro UNIBO (entrambi gli accelerometri sono stati montati con asse di sensibilità radiale). Inoltre le perdite sono state coperte tramite sacco di plastica e terra, per riprodurre una condizione di interrimento e valutare così l'influenza del terreno sui segnali acquisiti. Per queste rilevazioni ci si è concentrati solo sulle perdite a 3 e a 8 m dal punto di misura e, come prima, si sono eseguite due acquisizioni per ogni condizione, ciascuna della durata di 30 secondi, utilizzando però una frequenza

di campionamento di 5120 Hz. Le prove effettuate in tale data non hanno fornito risultati significativi.

- *4 dicembre 2013*: sulla base di studi approfonditi sulla fenomenologia della trasmissione di onde in condotte (illustrate nel capitolo precedente) si è deciso di eseguire i test montando uno degli accelerometri in direzione assiale ossia con asse di sensibilità parallelo all'asse della condotta, in modo da monitorare le vibrazioni in direzione longitudinale, che, secondo gli studi sopracitati, forniscono il contributo maggiore. Inoltre, anche in questo caso, le perdite sono state coperte tramite sacco di plastica e terra (eccetto quella a 18 m). Per queste prove si è utilizzato l'acquisitore LMS SCR01, sfruttando tre canali contemporaneamente, collegando al primo canale un accelerometro HERA alimentato con amplificatore (gain 100) e montato con asse di sensibilità radiale, al secondo canale l'idrofono e al terzo canale un accelerometro HERA, non alimentato, con asse di sensibilità assiale. Le acquisizioni questa volta sono state effettuate per tutte le perdite (a 3, 8, 13, 18 e 26 m dal punto di misura). In particolare si sono eseguite come la volta precedente due acquisizioni per ogni condizione, ciascuna della durata di 30 secondi e con una frequenza di campionamento di 5120 Hz. Le prove effettuate in tale data hanno fornito i risultati più significativi, per questo motivo nel capitolo successivo si illustreranno la procedura di analisi e i risultati ottenuti esclusivamente per queste acquisizioni.

Per maggiore chiarezza si riporta una tabella riassuntiva dei test effettuati, illustrati finora (Tabella 3).

Data	Setup	Perdite misurate	Parametri acquisizioni		Note
			Durata [s]	F_c [Hz]	
20 sett. 2013	1A	3, 8, 13, 18, 26	10	5000	Misurazioni perdite su condotta interrata
4 ott. 2013	1B	3, 26	30	5000	Verifica funzionalità della catena di misura
29 ott. 2013	2C	3, 8	30	5120	Verifica influenza di modifiche della catena di misura e delle condizioni al contorno
4 dic. 2013	2D	3, 8, 13, 18, 26	30	5120	Misurazione di vibrazioni in direzione longitudinale

Tabella 3- Test effettuati

CAPITOLO 5

ANALISI DEI SEGNALI E RISULTATI

5.1 L'algorithmo di analisi

Per l'analisi dei segnali è stato utilizzato un apposito algoritmo Matlab, che chiameremo "Algoritmo HERA", il quale, usando come misura la deviazione standard (std) per rilevare l'incremento di vibrazioni causato dalle perdite, è stato concepito per distinguere automaticamente il caso di perdita da quello di assenza di perdita (alti std sono associati ad alti livelli di vibrazione). L'applicazione di tale algoritmo prevede i seguenti passi:

- Il segnale associato ad una specifica condizione di prova (perdita presente/assente, distanza della perdita attiva, ecc.) è suddiviso in frame di 5 secondi, per ognuno dei quali viene calcolato il valore di deviazione standard.
- Per ogni condizione di prova l'algoritmo calcola il relativo "Monitoring Index" (MI) come media dei valori di deviazione standard (std) dei 3 frame aventi std più bassa e normalizzando al valore più alto i valori medi delle std calcolati applicando l'algoritmo alle acquisizioni relative alle diverse condizioni.
- Il MI relativo ad una specifica condizione è messo a confronto con quelli calcolati in assenza di perdite (le misurazioni in assenza di perdita sono ripetute dopo la "riparazione" di ogni perdita).

Per valutare l'efficienza dell'algoritmo in termini di sensibilità alla perdita si calcola un ulteriore indice, l'indice di efficienza (MIE, dall'inglese "Monitoring Index Efficiency"), dato dal rapporto tra il valore massimo di MI (=1) e la media degli MI calcolati in assenza di perdita (Basso MIE → Basso efficienza dell'algoritmo).

Al solo scopo esemplificativo si riportano in figura 5.1 i segnali nel dominio del tempo, rilevati rispettivamente in assenza e in presenza di perdita tramite l'idrofono (sopra tali grafici l'indicazione DB 0 sta ad indicare assenza di perdita, mentre DB 3 indica presenza di perdita a 3 m dal punto di misura). In questi grafici si rappresentano

convenzionalmente in blu i 3 frame aventi std più bassa (questa convenzione sarà utilizzata anche nei paragrafi successivi quando si riporteranno i risultati ottenuti caso per caso). Sempre a scopo esemplificativo in figura 5.2 si riporta l'istogramma degli MI corrispondenti allo stesso idrofono in condizione di perdita a 3 m dal punto di misura e assenza di perdita e il rispettivo valore MIE.

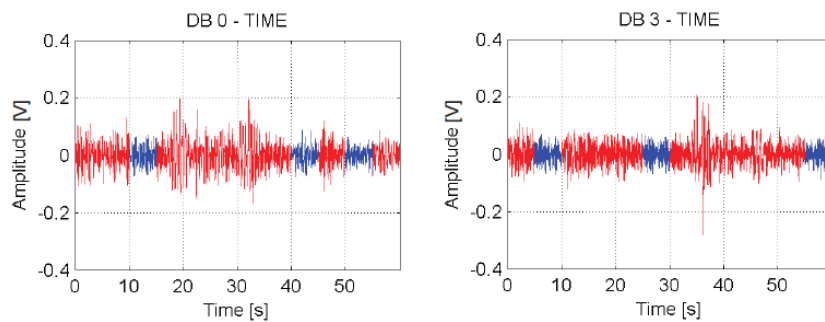


Figura 5.1- Segnali Idrofono nel dominio del tempo in assenza e in presenza di perdita rispettivamente.

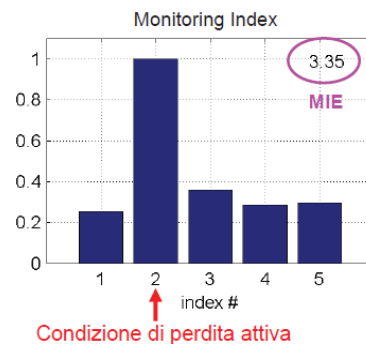


Figura 5.2- MI Idrofono in presenza di perdita (condizione 2) e assenza di perdita (condizioni 1, 3, 4 e 5) e valore MIE corrispondente.

I segnali acquisiti sono stati analizzati sia nel dominio del tempo che nel dominio della frequenza.

Come esempio in figura 5.3 si riporta un grafico relativo a due segnali nel dominio della frequenza. In particolare si rappresenta in nero la condizione di assenza di perdita e in rosso la condizione di presenza di perdita (questa convenzione verrà utilizzata anche nei paragrafi successivi).

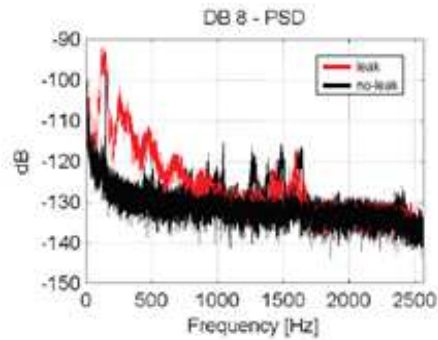


Figura 5.3- Esempio di segnale nel dominio della frequenza.

5.2 Risultati dell'analisi nel dominio del tempo

Come accennato in precedenza si riportano i risultati relativi alle sole prove del 4 dicembre, essendo quelle che forniscono le informazioni più significative.

Prima di tutto sono stati analizzati i livelli delle acquisizioni in assenza di perdita per valutare l'efficacia delle riparazioni. Sono stati presi in considerazione 4 differenti data set (1 dopo ogni riparazione eccetto per la perdita a 26 m dal punto di ascolto) e, procedendo analogamente al caso di presenza di perdita prima descritto, si è calcolato il valore MIE. I livelli sono risultati comparabili e di conseguenza le riparazioni sono state efficaci. In figura 5.4 sono riportati sulla sinistra i grafici nel dominio del tempo relativi alla condizione di assenza di perdita (in particolare quelli più a sinistra sono quelli aventi std più bassa mentre gli altri sono quelli con std più alta), mentre sulla destra sono riportati gli istogrammi con i valori MI.

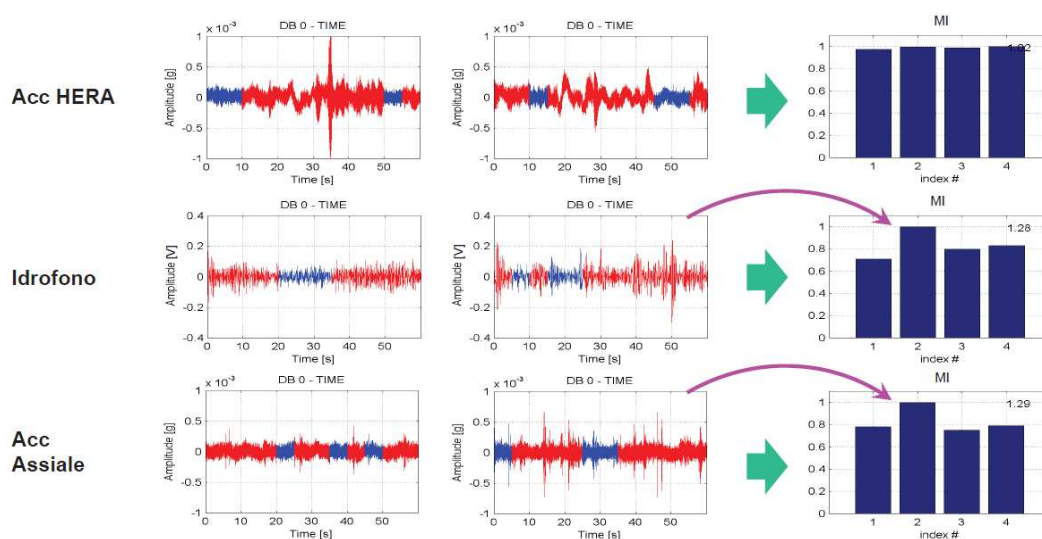


Figura 5.4- Livelli acquisizioni in assenza di perdita.

Si riportano ora i risultati dell'analisi nel dominio del tempo corrispondenti alle varie perdite e ai vari sensori utilizzati (Figure 5.5-5.27).

Perdita a 3 m

- Accelerometro HERA

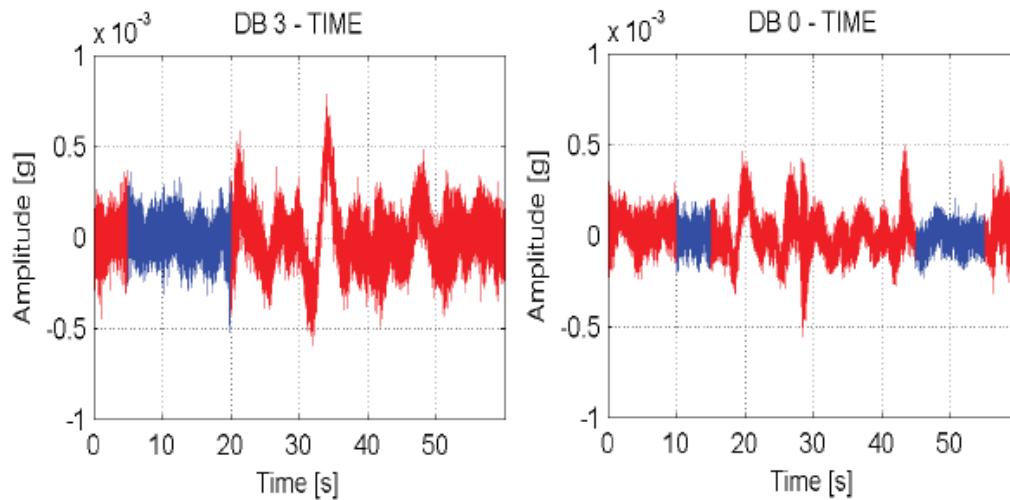


Figura 5.5- Segnali Accelerometro HERA nel dominio del tempo in presenza e in assenza di perdita rispettivamente.

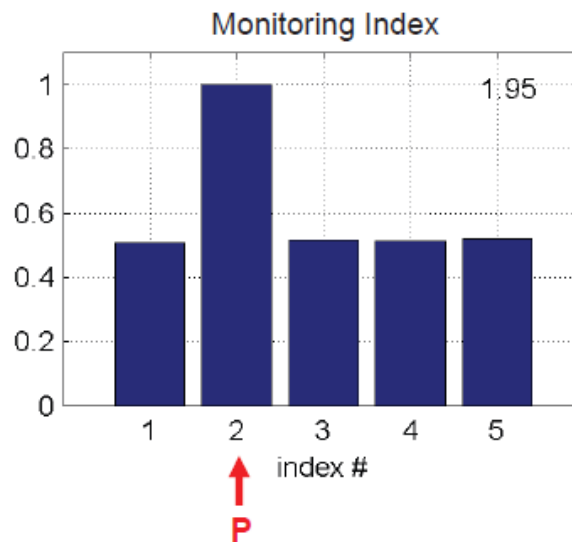


Figura 5.6- MI Accelerometro HERA in presenza di perdita (condizione 2) e assenza di perdita (condizioni 1, 3, 4 e 5) e relativo MIE.

- Accelerometro Assiale

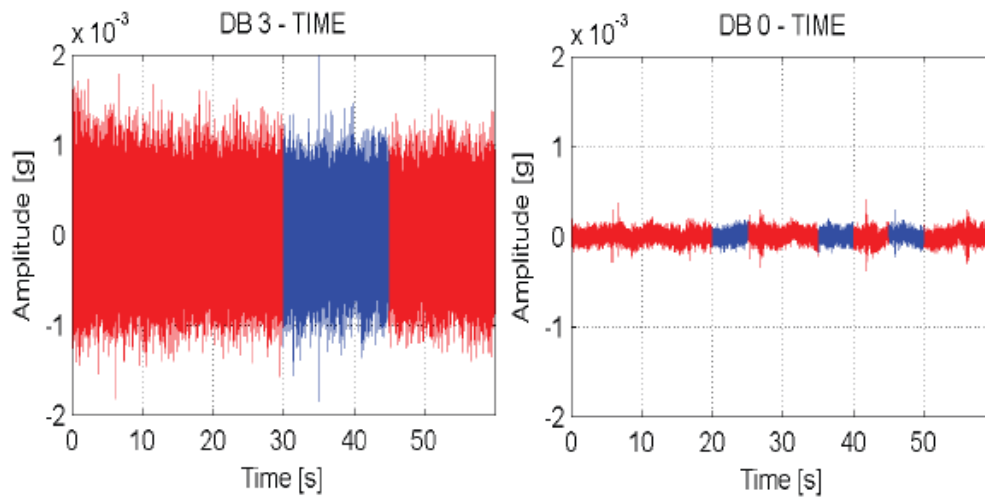


Figura 5.7- Segnali Accelerometro Assiale nel dominio del tempo in presenza e in assenza di perdita rispettivamente.

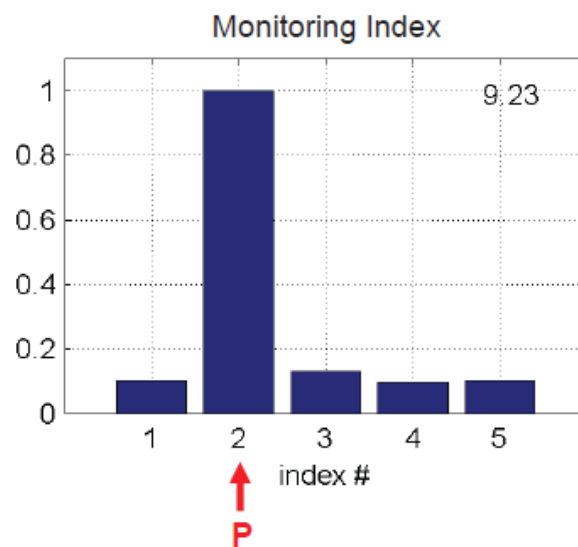


Figura 5.8- MI Accelerometro Assiale in presenza di perdita (condizione 2) e assenza di perdita (condizioni 1, 3, 4 e 5) e relativo MIE.

- Idrofono

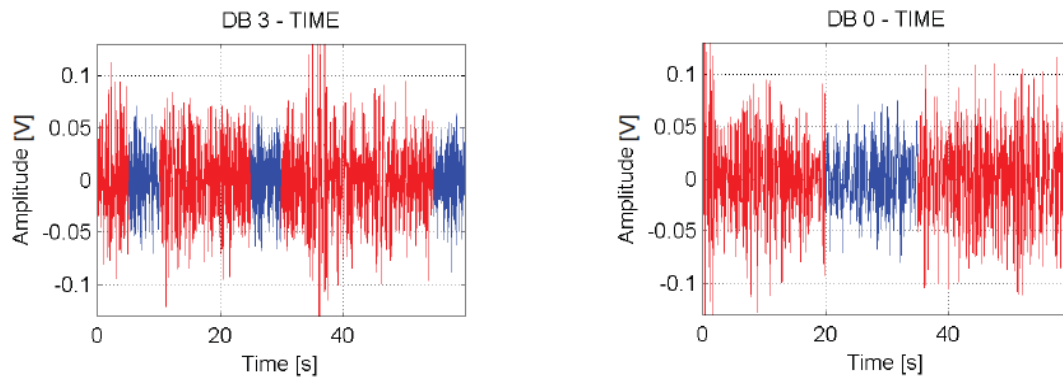


Figura 5.9- Segnali Idrofono nel dominio del tempo in presenza e in assenza di perdita rispettivamente.

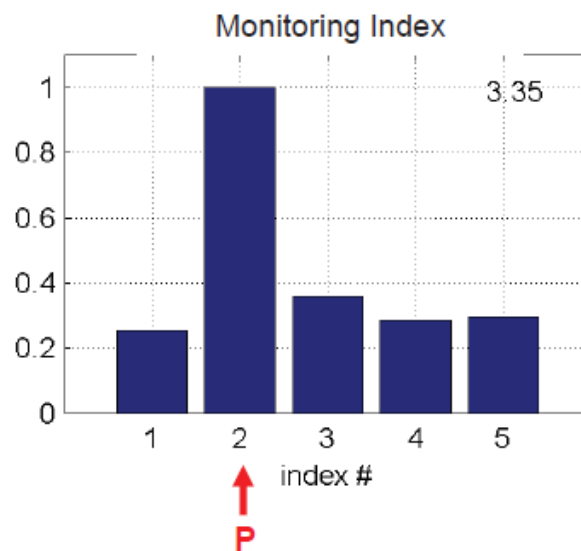


Figura 5.10- MI Idrofono in presenza di perdita (condizione 2) e assenza di perdita (condizioni 1, 3, 4, e 5) e relativo MIE.

- Confronto trasduttori

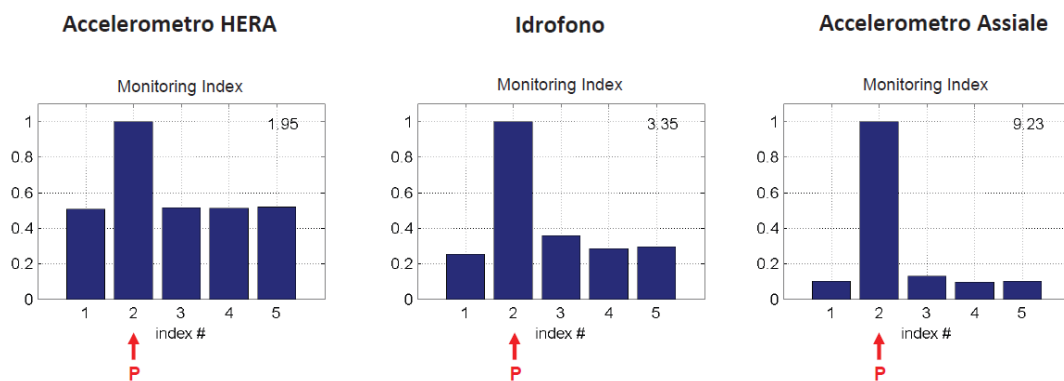


Figura 5.11- Confronto trasduttori.

Perdita a 8 m

Nota: da questo momento in poi non si riporteranno più i segnali nel dominio del tempo in assenza di perdita essendo uguali ai precedenti.

- Accelerometro HERA

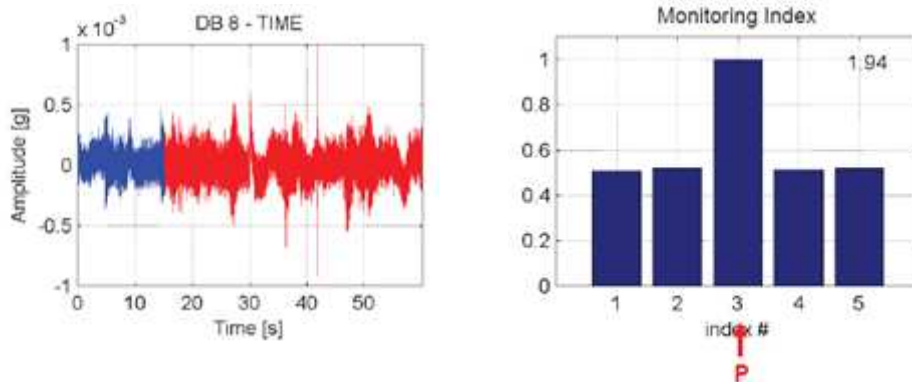


Figura 5.12- Segnale nel dominio del tempo in presenza di perdita e MI in presenza di perdita (condizione 3) e assenza di perdita (condizioni 1, 2, 4 e 5) con relativo MIE, per Accelerometro HERA.

- Accelerometro Assiale

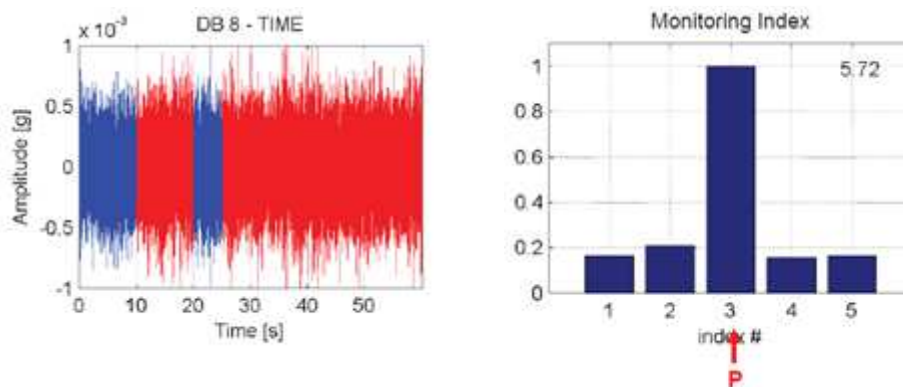


Figura 5.13- Segnale nel dominio del tempo in presenza di perdita e MI in presenza di perdita (condizione 3) e assenza di perdita (condizioni 1, 2, 4 e 5) con relativo MIE, per Accelerometro Assiale.

- Idrofono

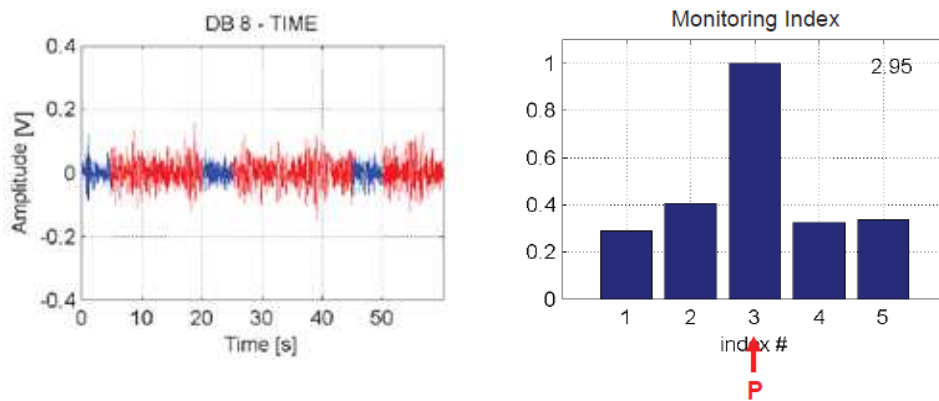


Figura 5.14- Segnale nel dominio del tempo in presenza di perdita e MI in presenza di perdita (condizione 3) e assenza di perdita (condizioni 1, 2, 4 e 5) con relativo MIE, per Idrofono.

- Confronto trasduttori

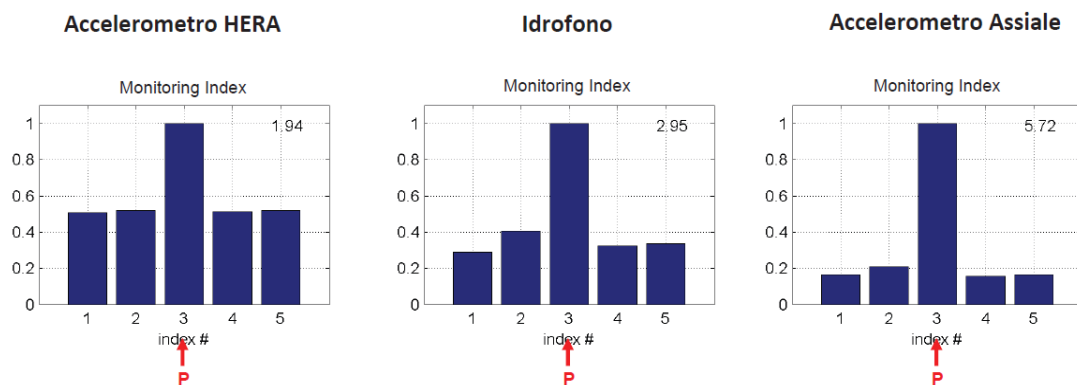


Figura 5.15- Confronto trasduttori.

Perdita a 13 m

- Accelerometro HERA

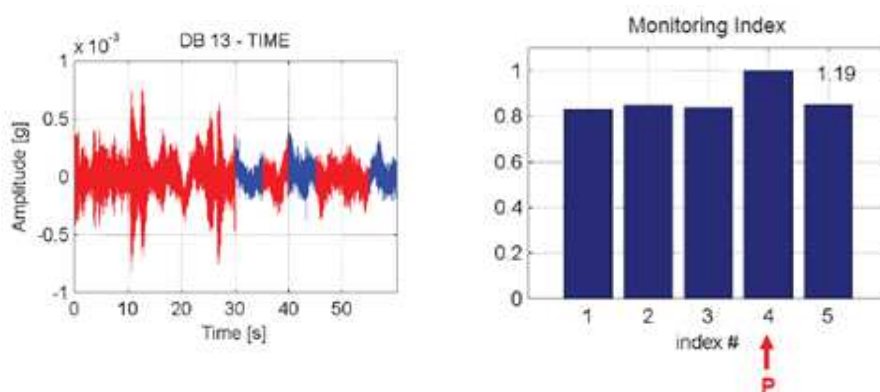


Figura 5.16- Segnale nel dominio del tempo e MI in presenza di perdita (condizione 4) e in assenza di perdita con relativo MIE, per Accelerometro HERA.

- Accelerometro Assiale

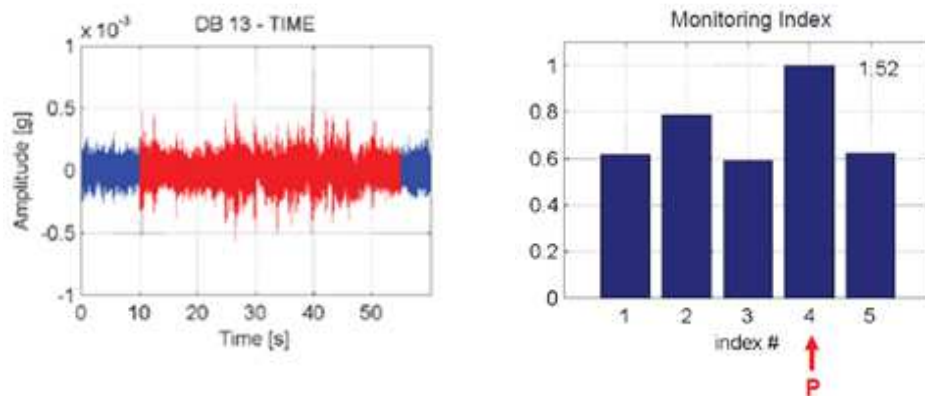


Figura 5.17- Segnale nel dominio del tempo in presenza di perdita e MI in presenza di perdita (condizione 4) e assenza di perdita (condizioni 1, 2, 3 e 5) con relativo MIE, per Accelerometro Assiale.

- Idrofono

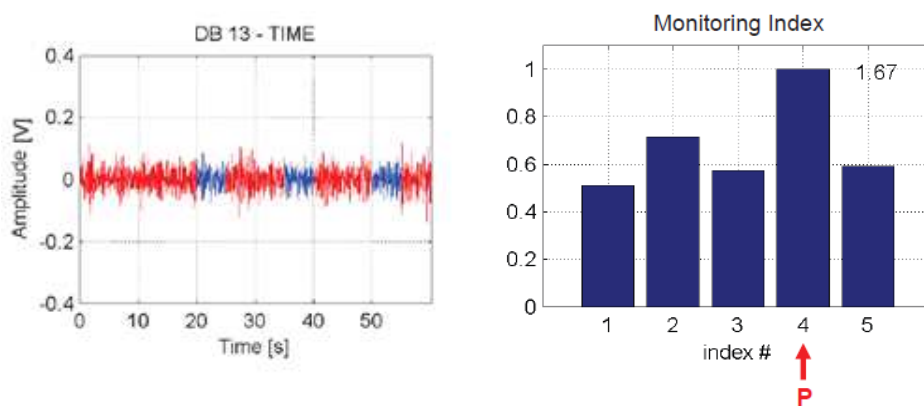


Figura 5.18- Segnale nel dominio del tempo in presenza di perdita e MI in presenza di perdita (condizione 4) e assenza di perdita (condizioni 1, 2, 3 e 5) con relativo MIE, per Idrofono.

- Confronto trasduttori

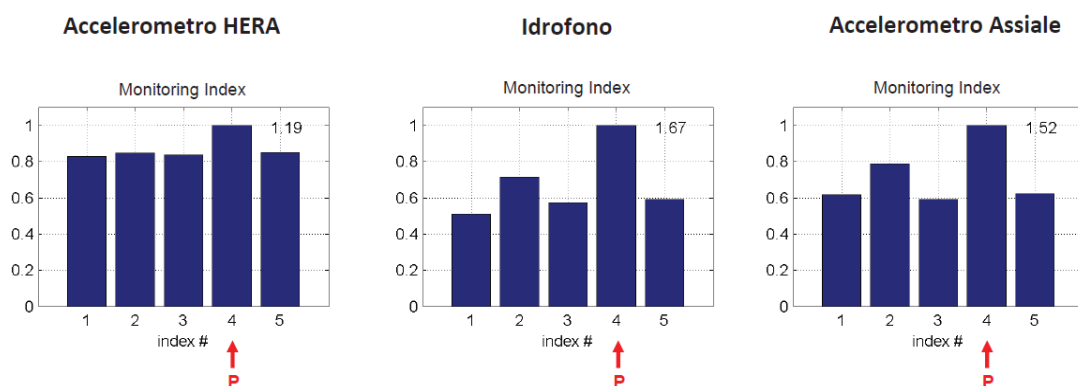


Figura 5.19- Confronto trasduttori.

Perdita a 18 m

- Accelerometro HERA

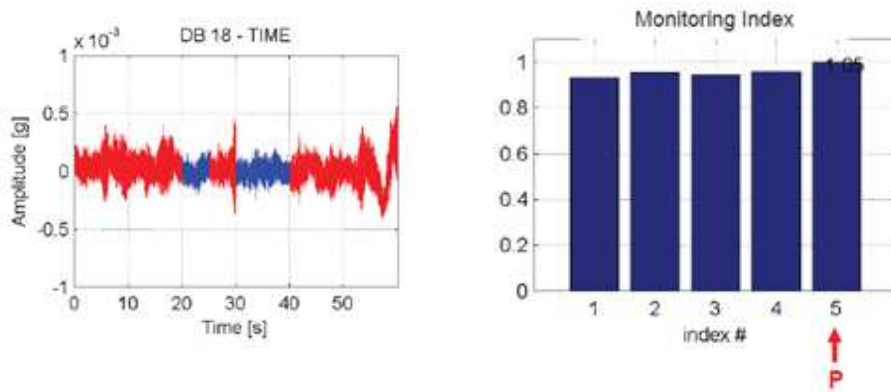


Figura 5.20- Segnale nel dominio del tempo in presenza di perdita e MI in presenza di perdita (condizione 5) e assenza di perdita (condizioni 1, 2, 3 e 4) con relativo MIE, per Accelerometro HERA.

- Accelerometro Assiale

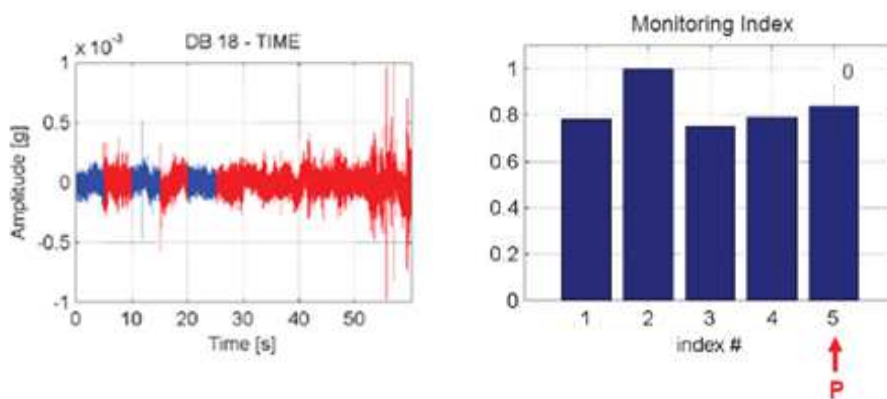


Figura 5.21- Segnale nel dominio del tempo in presenza di perdita e MI in presenza di perdita (condizione 5) e assenza di perdita (condizioni 1, 2, 3 e 4) con relativo MIE, per Accelerometro Assiale

- Idrofono

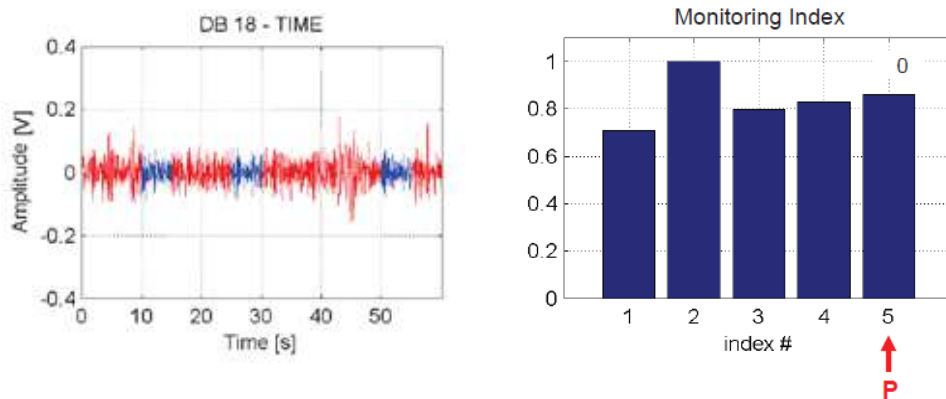


Figura 5.22-Segnale nel dominio del tempo in presenza di perdita e MI in presenza e assenza di perdita con relativo MIE, per Idrofono.

- Confronto trasduttori

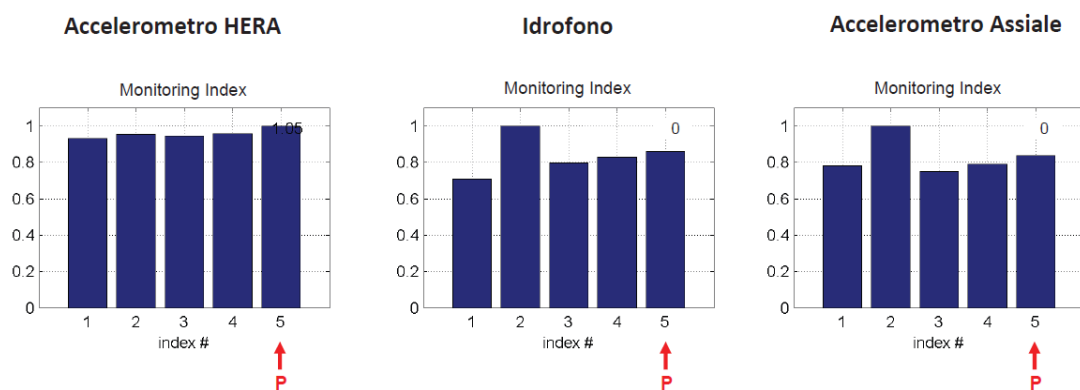


Figura 5.23- Confronto trasduttori

Perdita a 26 m

- Accelerometro HERA

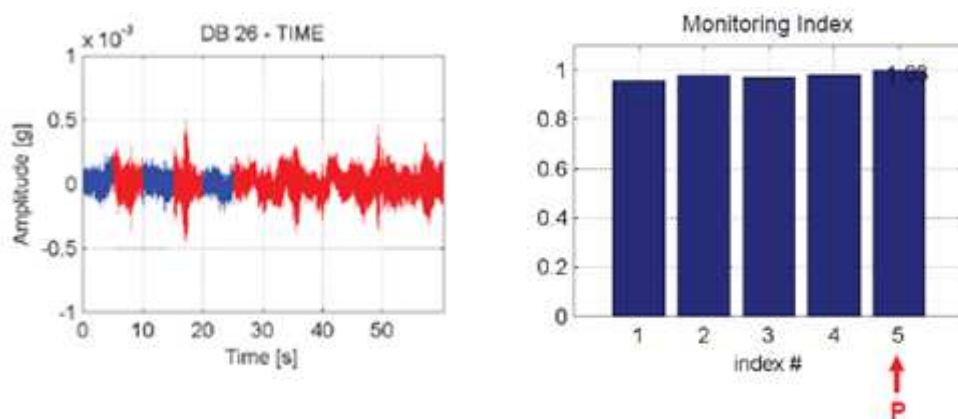


Figura 5.24- Segnale nel dominio del tempo in presenza di perdita e MI in presenza e assenza di perdita con relativo MIE, per Accelerometro HERA.

- Accelerometro Assiale

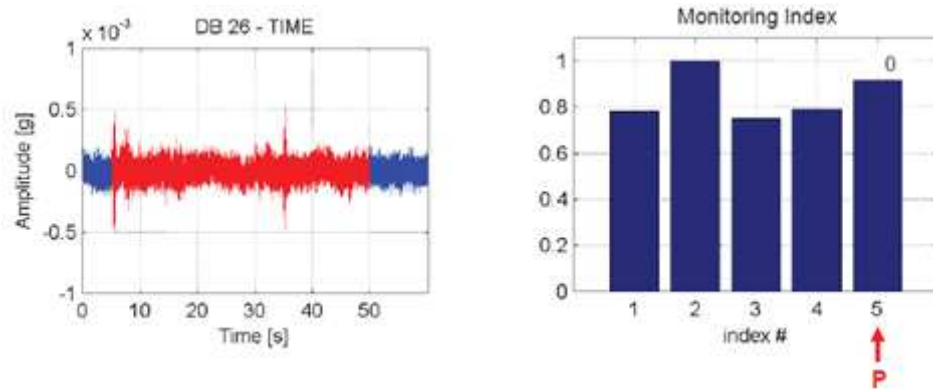


Figura 5.25- Segnale nel dominio del tempo in presenza di perdita e MI in presenza di perdita (condizione 5) e assenza di perdita (condizioni 1, 2, 3 e 4) con relativo MIE, per Accelerometro Assiale.

- Idrofono

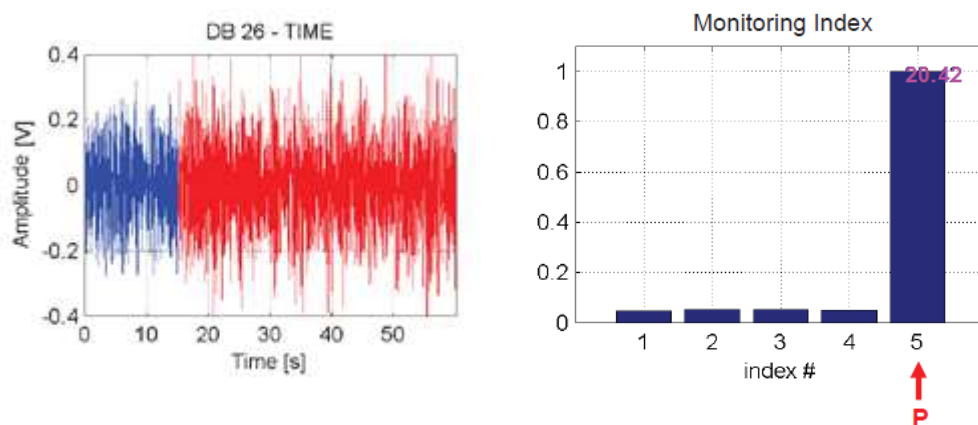


Figura 5.26- Segnale nel dominio del tempo in presenza di perdita e MI in presenza di perdita (condizione 5) e assenza di perdita (condizioni 1, 2, 3 e 4) con relativo MIE per Idrofono.

- Confronto trasduttori

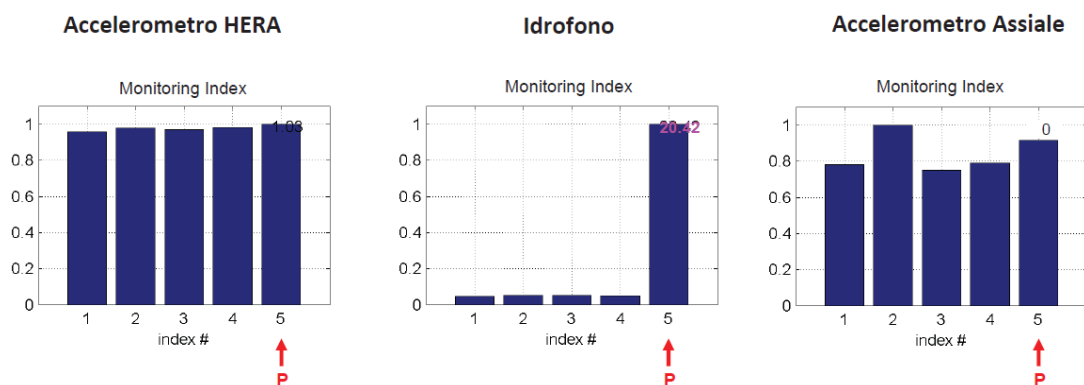


Figura 5.27- Confronto trasduttori.

Prestazioni algoritmo HERA: riepilogo

Si riporta di seguito una tabella riassuntiva con i valori MIE delle prove viste finora al fine di visualizzare in modo più chiaro le prestazioni dell'algoritmo HERA a seconda del sensore utilizzato (Tabella 4). Anche se non è ancora stato ben definito un valore MIE preciso per il quale si possa considerare la perdita ben individuata o meno, si considerano soddisfacenti al fine dell'individuazione della perdita i valori MIE superiori a 2. In particolare in tabella si indicano in verde i valori relativi ai casi in cui l'algoritmo individua la perdita, in giallo i casi in cui l'algoritmo mostra bassa sensibilità all'individuazione e in rosso i casi in cui fallisce.

Distanza perdita	Efficienza (MIE) Segnale grezzo		
	Acc HERA	Idrofono	Acc Ass
3 m	1.95	3.35	9.23
8 m	1.94	2.95	5.72
13 m	1.19	1.67	1.52
18 m (*)	1.05	0	0
26 m	1.08	20.42	0

(*) perdita non "interrata"

Tabella 4- Riepilogo prestazioni algoritmo HERA (segnale grezzo).

Come si può notare da questa prima analisi, dagli 8 m in poi le prestazioni degli accelerometri scarseggiano. Dai 13 m di distanza in poi scarseggiano le prestazioni di tutti. A 26 m di distanza solo l'idrofono rileva la presenza di perdita, essendo tale perdita a portata maggiore rispetto alle altre.

Fino a questo punto sono stati considerati segnali grezzi, ovvero senza l'utilizzo di filtri.

5.3 Risultati dell'analisi spettrale

E' stata fatta una prima analisi in frequenza in modo da individuare una banda di frequenze in cui la distinzione del segnale con o senza perdita venisse esaltata. In particolare per l'analisi spettrale e l'applicazione di filtri si sono seguiti i seguenti passi:

- PSD del segnale (per ogni singola condizione) ottenuto aggregando i 3 frame impiegati per il calcolo di MI (cioè i 3 frame con std più basse)
- Confronto tra segnali con e senza perdita per l'identificazione di possibili firme caratteristiche e definizione di possibili filtri passa-banda.

Essendo la frequenza di campionamento di ciascuna acquisizione pari a 5120 Hz è possibile eseguire l'analisi spettrale tra 0 e 2560 Hz come enunciato dal teorema del campionamento di Shannon.

Da questa prima analisi è risultato che il maggiore contributo in frequenza in caso di perdita si trova alle basse frequenze (come si può notare dalle figure 5.28 a, b e c, dove si riportano come esempio i segnali nel dominio della frequenza per i vari sensori in caso assenza e presenza di perdita a 3 m di distanza, che è quella con contenuto in frequenza maggiore, dato che il segnale si smorza all'aumentare della distanza dal punto di misura). Si è deciso di utilizzare per la successiva analisi un filtro passa-banda 100-600 Hz, range in cui la distinzione segnale con o senza perdita sembra essere esaltata per ogni caso. In questo modo si prevede di aumentare la sensibilità dell'algoritmo alla perdita senza, allo stesso tempo, aumentare eccessivamente la sua complessità.

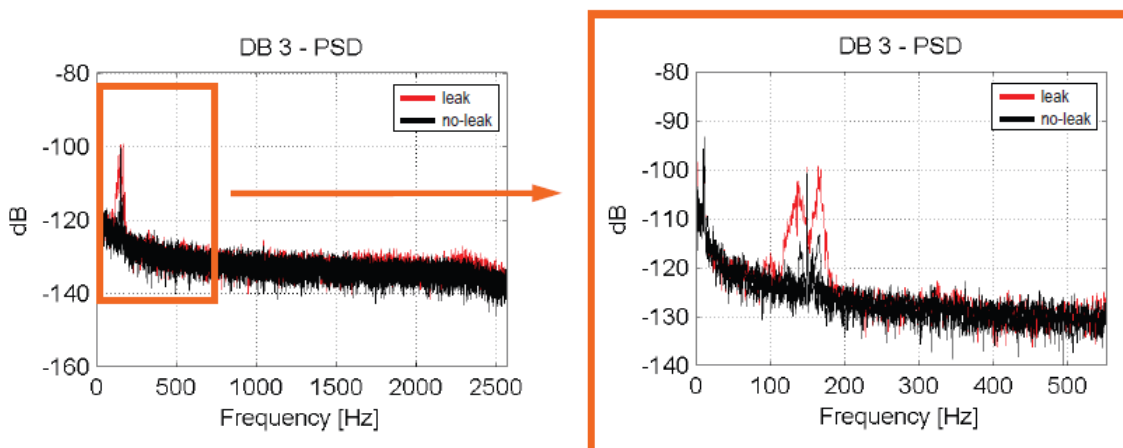


Figura 5.28 a- PSD Accelerometro HERA.

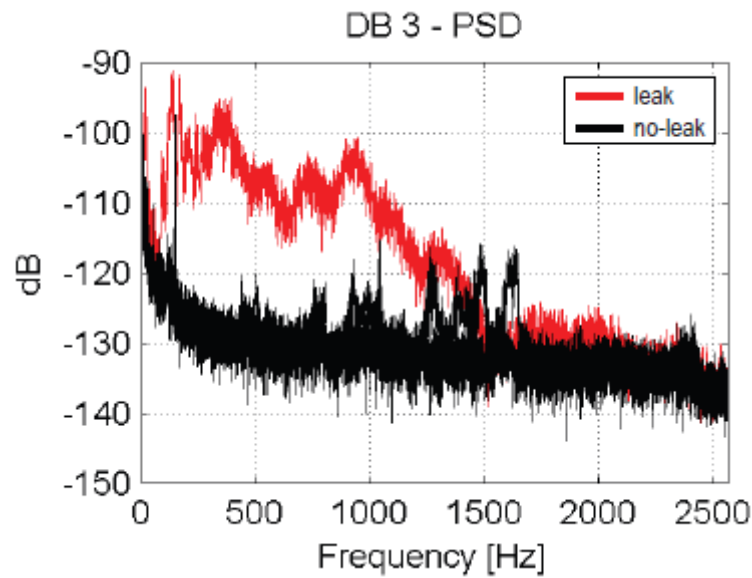


Figura 5.28 b- PSD Accelerometro Assiale.

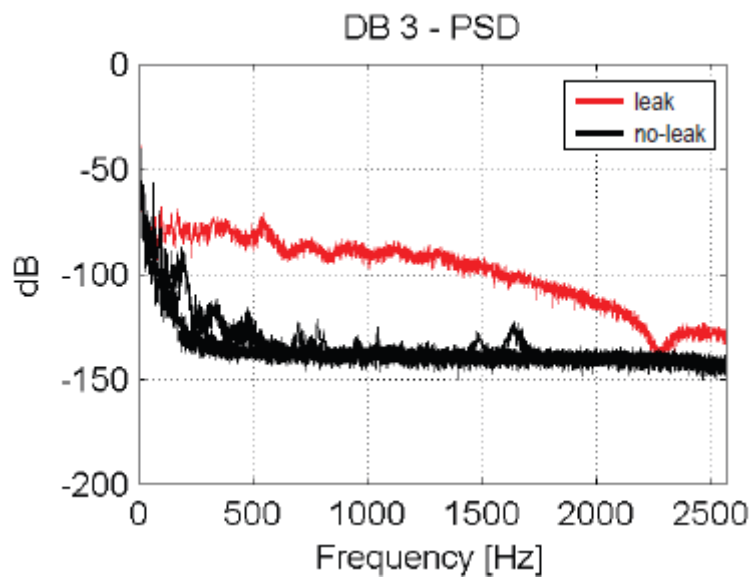


Figura 5.28 c- PSD Idrofono.

Si riportano ora i segnali nel dominio della frequenza per i vari casi (rappresentando in nero il segnale in assenza di perdita e in rosso quello in presenza di perdita) e, analogamente a quanto fatto nel paragrafo precedente, gli istogrammi dei valori MI con relativo valore MIE, ottenuti riapplicando l'algoritmo HERA ai segnali nel tempo una volta che questi sono stati filtrati (Figure 5.29-5.38).

Perdita a 3 m

- Accelerometro HERA, Idrofono e Accelerometro Assiale

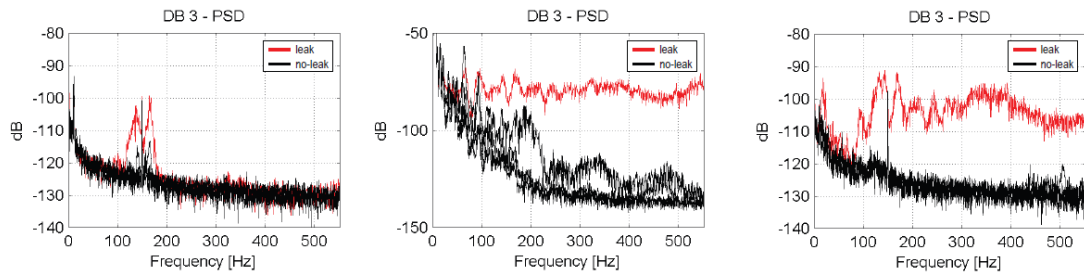


Figura 5.29- PSD in presenza (rosso) e in assenza di perdita (nero) per Accelerometro HERA, Idrofono e Accelerometro Assiale rispettivamente

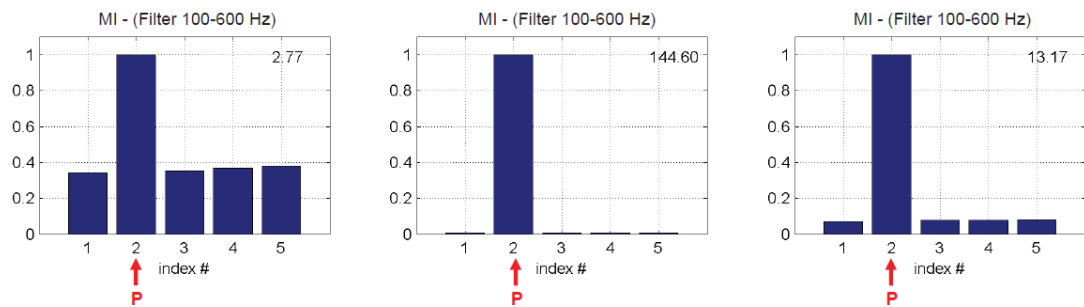


Figura 5.30- MI in presenza di perdita (condizione 2) e assenza di perdita (condizioni 1, 2, 3 e 4) e relativo MIE, per Accelerometro HERA, Idrofono e Accelerometro Assiale rispettivamente.

Perdita a 8 m

- Accelerometro HERA, Idrofono e Accelerometro Assiale

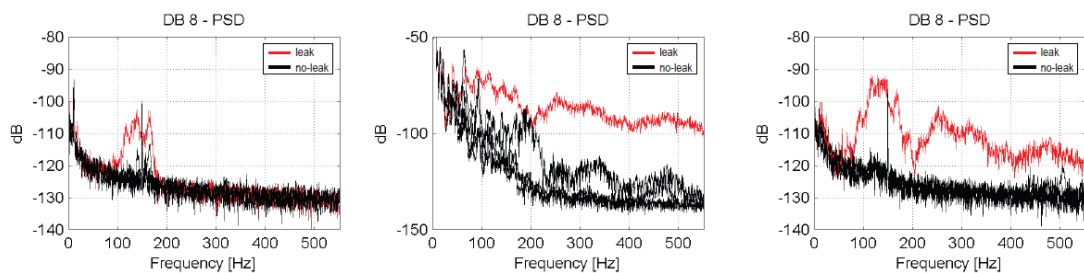


Figura 5.31- PSD in presenza (rosso) e in assenza di perdita (nero) per Accelerometro HERA, Idrofono e Accelerometro Assiale rispettivamente.

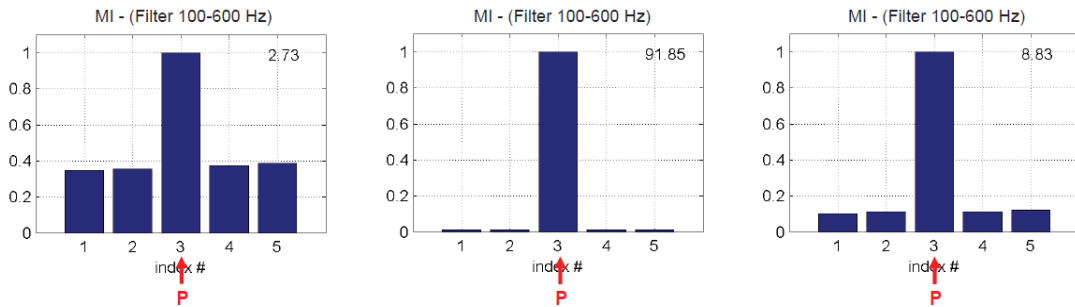


Figura 5.32- MI in presenza di perdita (condizione 3) e assenza di perdita (condizioni 1, 2, 4 e 5) e relativo MIE, per Accelerometro HERA, Idrofono e Accelerometro Assiale rispettivamente.

Perdita a 13 m

- Accelerometro HERA, Idrofono e Accelerometro Assiale

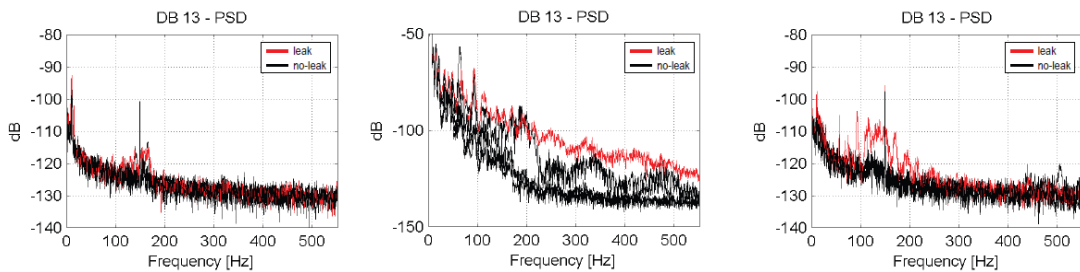


Figura 5.33- PSD in presenza (rosso) e in assenza di perdita (nero) per Accelerometro HERA, Idrofono e Accelerometro Assiale rispettivamente.

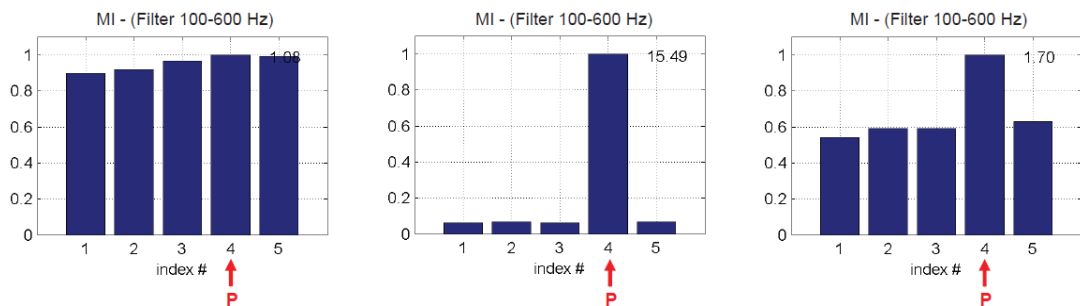


Figura 5.34 - MI in presenza di perdita (condizione 4) e assenza di perdita (condizioni 1, 2, 3 e 5) e relativo MIE, per Accelerometro HERA, Idrofono e Accelerometro Assiale rispettivamente.

Perdita a 18 m

- Accelerometro HERA, Idrofono e Accelerometro Assiale

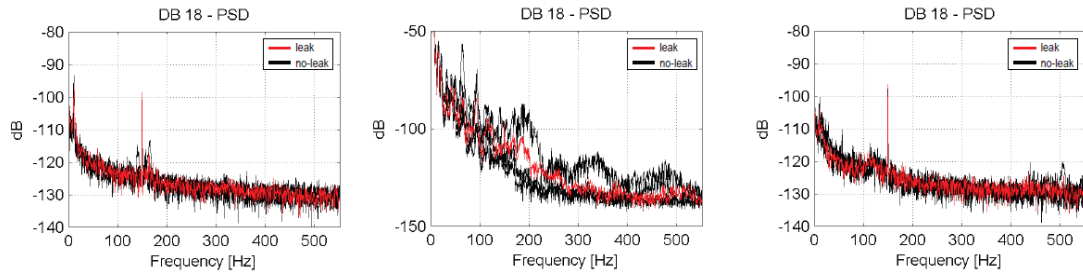


Figura 5.35- PSD in presenza (rosso) e in assenza di perdita (nero) per Accelerometro HERA, Idrofono e Accelerometro Assiale rispettivamente.

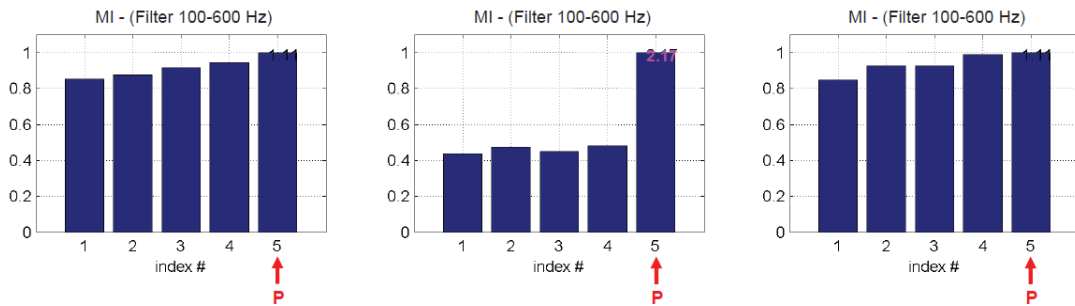


Figura 5.36- MI in presenza di perdita (condizione 5) e assenza di perdita (condizioni 1, 2, 3 e 4) e relativo MIE, per Accelerometro HERA, Idrofono e Accelerometro Assiale rispettivamente.

Perdita a 26 m

- Accelerometro HERA, Idrofono e Accelerometro Assiale

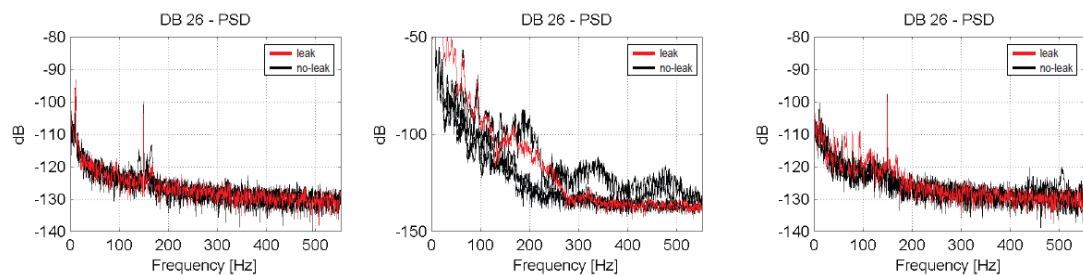


Figura 5.37- PSD in presenza (rosso) e in assenza di perdita (nero) per Accelerometro HERA, Idrofono e Accelerometro Assiale rispettivamente.

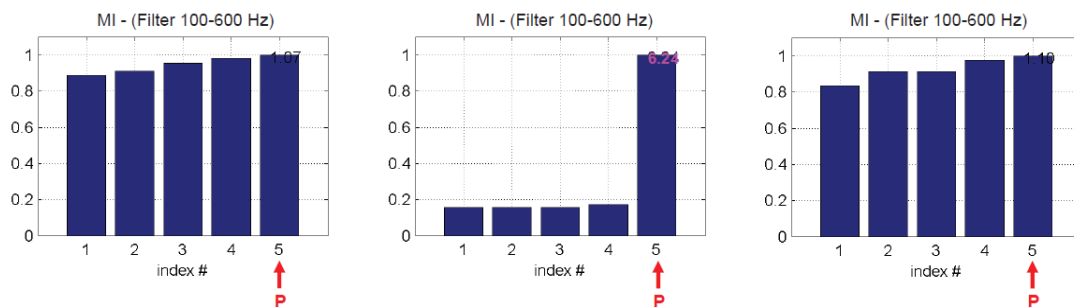


Figura 5.38- MI in presenza di perdita (condizione 5) e assenza di perdita (condizioni 1, 2, 3 e 4) e relativo MIE, per Accelerometro HERA, Idrofono e Accelerometro Assiale rispettivamente.

Prestazioni algoritmo HERA: riepilogo

Si riporta una tabella riassuntiva con i valori MIE per le varie prove viste finora in caso di utilizzo di filtro passa-banda 100-600 Hz (Tabella 5).

Distanza perdita	Efficienza (MIE) Segnale filtrato		
	Acc HERA	Idrofono	Acc ass
3 m	2.77	144.60	13.17
8 m	2.73	91.85	8.83
13 m	1.08	15.49	1.70
18 m (*)	1.11	2.17	1.11
26 m	1.07	6.24	1.10

(*) Perdita non “interrata”

Tabella 5- Riepilogo prestazioni algoritmo HERA (segnale filtrato)

Da un confronto con il caso di assenza di filtro (Tabella 4) si nota che con l’uso del filtro (sulla base delle informazioni fornite dalla prima analisi in frequenza) si verifica un miglioramento delle performance dell’algoritmo sia per l’idrofono che per gli accelerometri, nonostante questi ultimi continuino a presentare scarse prestazioni nella rilevazione di perdite alle distanze maggiori.

5.4 Conclusioni

Dalle analisi precedentemente illustrate è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- L'efficacia del rilevamento di perdite tramite segnali da idrofono appare decisamente superiore (infatti, una volta filtrate le basse frequenze, tutte le perdite sono individuate).
- L'individuazione di perdite (con portata modesta) a distanza superiore ai 10 m mediante accelerometri appare difficoltosa.
- Apparentemente l'accelerometro con asse di sensibilità parallelo all'asse della condotta fornisce prestazioni superiori rispetto all'accelerometro montato con asse di sensibilità radiale (si tenga conto che il primo di questi non è amplificato).

Comunque l'affidabilità in termini assoluti dei test potrebbe essere influenzata dai parametri sui quali si hanno scarsi controllo e conoscenza, in particolare la portata della perdita.

CAPITOLO 6

MONITORAGGIO DI EMISSIONI ACUSTICHE PER IL RILIEVO DI PERDITE IDRICHE

6.1 Obiettivo della ricerca

La ricerca ha avuto come obiettivo la caratterizzazione delle Emissioni Acustiche rilevate in condotte idriche in plastica in presenza e in assenza di perdita. Lo studio, inteso come primo passo per definire una tecnica alternativa per l'individuazione di perdite idriche, ha coinvolto alcuni test preliminari, eseguiti sotto condizioni controllate, in un impianto sperimentale molto più semplice rispetto a quello utilizzato per le indagini descritte nei capitoli precedenti.

6.2 L'impianto sperimentale

Si tratta di un impianto molto semplice costituito da una condotta in polietilene del diametro nominale di 32 mm, lunga circa 10 m, utilizzata per simulare una condotta di servizio. Tale condotta, non interrata, può essere alimentata idraulicamente in maniera diretta aprendo la valvola che la collega all'acquedotto cittadino ad una pressione di circa 3.5 bar (figura 6.1 a). All'altra estremità della condotta è presente una valvola del tipo mostrato in figura 6.1 b.



a)



b)

Figura 6.1- a) Impianto sperimentale; b) Valvola terminale.

Durante i test il sensore di AE è stato posizionato prima della valvola terminale dell'allaccio (figura 6.1 b), con modalità che saranno illustrate meglio nei paragrafi successivi.

Per simulare le perdite, analogamente a quanto fatto nelle sperimentazioni descritte nei capitoli precedenti, si sono realizzati nella condotta tre tagli longitudinali, ciascuno della lunghezza di circa 2 cm, collocati ad una distanza rispettivamente di 1, 3 e 8 m dal punto di misura. Per ripristinare poi le condizioni iniziali in modo da eseguire i test in assenza di perdita è possibile chiudere questi tagli tramite manicotti removibili.

6.3 Strumentazione utilizzata

Per le rilevazioni di Emissioni Acustiche si è scelto di utilizzare uno strumento prodotto dalla Mistras Group, l' "USB-AE Node System" (figura 6.2). Tale sistema, pur essendo di piccole dimensioni, una volta collegato ad un pc che esegue il Software "AEwin for USB", ha tutte le caratteristiche dei sistemi di AE di formato più grande e più costosi. È in grado di eseguire qualsiasi applicazione alle AE ed è uno strumento molto adatto per indagini sul campo specialmente in situazioni in cui non è disponibile una spina di alimentazione, ma lo è invece un pc.



Figura 6.2- USB-AE Node System

Il sistema risulta composto da:

- USB AE Node: si tratta di un condizionatore digitale del segnale con un canale parametrico di Input e un'interfaccia USB col pc
- Sensore WSa (Wide band 100÷1000 kHz)
- Cavi SMA/SMB

- Pc

Una tipica configurazione per un sistema ad un solo canale, come quello da noi utilizzato, è mostrata in figura 6.3.

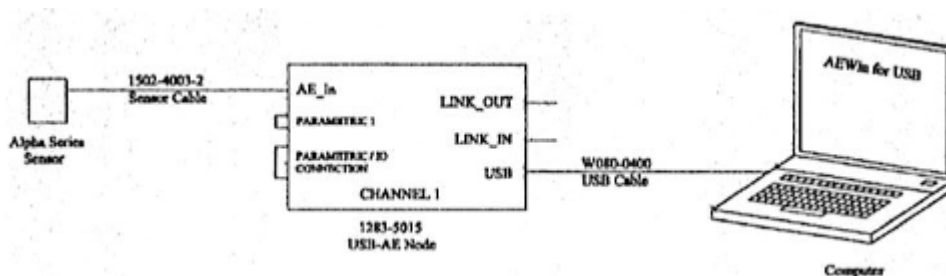


Figura 6.3- Configurazione di sistema a un solo canale

Il cavo numero 1502-4003-X in figura 6.3 collega il sensore al condizionatore di segnale (USB-AE Node), mentre il cavo numero W080-0400 è un cavo USB standard per collegare l'USB Node al computer. Come si può notare si tratta di una catena di misura molto semplice.

6.3.1 Il sensore

Esiste un'ampia gamma di sensori AE utilizzabili: sensori alimentati, passivi, con preamplificatore integrato ecc. a seconda dell'utilizzo.

Il sensore da noi utilizzato è un sensore piezoelettrico denominato Passivo, della famiglia α , a banda larga (Sensore $WS\alpha$, figura 6.4). Il sensore, con un connettore SMA all'interno di una cavità integrata in acciaio inox, è ricavato tramite lavorazione meccanica da un'asta piena in acciaio. Il bordo inferiore del sensore è smussato con un angolo di 30° in modo da ridurre il rischio di cortocircuiti tra sensore e superfici di prova conduttive.



Figura 6.4- Sensore $WS\alpha$

Questi sensori a banda larga sono tipicamente utilizzati in applicazioni dove è richiesta un'alta fedeltà di risposta. Inoltre l'impiego di un singolo cristallo come elemento piezoelettrico permette di avere una elevata sensibilità e una risposta in tutte le direzioni senza riguardo all'orientamento dell'eccitazione. Si riporta di seguito una tabella con le specifiche di funzionamento del sensore (Tabella 6).

Specifiche di Funzionamento	
Dinamiche	Picco di sensibilità V/(m/s); [V/ μ bar].....55[-62] dB
	Range di Frequenza.....100÷1000 kHz
	Frequenza di Risonanza V/(m/s); [V/ μ bar]..125[650] kHz
	Direzionalità..... \pm 1.5 dB
Ambientali	Range di Temperatura.....-65°÷175°C
	Limite di Shock.....500g
Fisiche	Dimensioni.....diam. 19mm \times h. 21.4 mm
	Peso.....32 grammi
	Materiale Esterno.....Acciaio Inossidabile
	Materiale Faccia Inferiore.....Ceramica
	Tipo Connettore.....SMA
	Posizione del Connettore.....Lato

Tabella 6- Specifiche di Funzionamento del sensore W5a

Una parte molto delicata nell'utilizzo di questi sensori consiste nel loro montaggio sulla superficie da testare. Infatti requisito essenziale è che ci sia un sufficiente accoppiamento acustico tra sensore e superficie.

Per fare ciò, per prima cosa ci si deve assicurare che la superficie del sensore e quella della struttura da testare siano lisce e pulite, in modo da permettere la massima adesione dell'accoppiante.

Dopodiché si può procedere ad applicare lo strato di accoppiante sulla superficie del sensore, in strato il più sottile possibile, così da riempire gap causati dalla rugosità della superficie ed eliminare traferri in modo

da assicurare una buona trasmissione acustica. Tipici accoppianti utilizzati sono: grassi, glicoli idrosolubili e resine. Spesso per assicurare uno strato riproducibile di accoppiante si pone sul sensore un precarico (dalla letteratura il precarico ideale risulta essere di 6 N). Oltre all'accoppiamento, il sensore deve stare fermo per tutta la durata della prova. Quindi, per garantire il fissaggio, è necessario utilizzare dispositivi di bloccaggio come nastri, fasce elastiche ecc. assicurandosi sempre che, qualunque sia il dispositivo usato, questo non faccia contatto elettrico tra sensore e struttura.

In alternativa si possono utilizzare colle, che fungono sia da accoppianti che da fissanti. Prima di utilizzare colle però è necessario valutare la tecnica e la facilità di rimozione delle stesse in quanto i sensori non resistono a grandi forze di rimozione tra l'alloggiamento e la superficie di montaggio. Inoltre per prevenire il fenomeno dell'attenuazione è necessario evitare bolle d'aria e grossi strati di colla.

Altre precauzioni nel montaggio di sensori consistono nel prestare attenzione a superfici troppo calde o troppo fredde. I tipici accoppianti infatti possono essere instabili su superfici calde o possono congelare e staccarsi sulle superfici fredde. In questi casi una soluzione può essere l'utilizzo di un'asta di metallo (interposta tra sensore e superficie) che permette di condurre il segnale acustico dalla struttura al sensore a temperatura ambiente.

Nel nostro caso si è scelto di applicare il sensore, prima della valvola terminale, tramite colla siliconica Motorsil D della Arexons. Si è poi assicurato un ulteriore fissaggio del sensore grazie a nastro isolante. In figura 6.5 è mostrato il sensore così applicato nel punto di misura.



Figura 6.5- Sensore applicato nel punto di misura

6.3.2 USB AE Node

L' "USB AE Node" è un condizionatore digitale di segnale di emissioni acustiche. Attraverso il connettore USB, si interfaccia facilmente con pc che eseguono Windows XP o Vista e il Software AEwin. E' possibile controllare fino a 4 condizionatori con un singolo pc. Si riporta di seguito una tabella con le specifiche tecniche del condizionatore (Tabella 7).

Specifiche Tecniche	
Input parametrici	1 Canale per USB Node (4 canali per sistema)
Risposta in Frequenza	1 kHz ÷ 1 MHz
Digitalizzazione AE	18 bit, 20 MSPS
AE Input	1-4 CH, 0-4 V, 16 bits
OS	Windows XP o Vista
Dimensioni	L 6'' × W 3'' × H 2'' (152 × 76 × 50 mm)
Peso	0.8 lbs (1.75 kg)
Requisiti di alimentazione	Alimentazione USB (5V) <100 mA durante l'esecuzione
Consumo energetico	< 0.5 watt

Tabella 7- Specifiche tecniche dell'USB AE Node

6.3.3 Il software

Il sistema è fornito di un programma per eseguire una serie di test di AE che permette di visualizzare e registrare l'insieme di dati tipici di ciascuna hit quali: durata, tempo di salita, ampiezza, conteggi, energia ecc. Questo programma è configurato come qualsiasi altro programma di Microsoft Windows con una tipica struttura dei menu con selezioni familiari come "File", "Setup", "Acquire/Replay", "Help" ecc. L'utente può configurare l'unità in preparazione ad una rilevazione di AE. È possibile impostare più grafici su più schede per la visualizzazione dei vari parametri. Incluso nel software c'è la possibilità di visualizzare forme d'onda, FFT, istogrammi, grafici a linee e a punti. Durante l'acquisizione o la riproduzione i grafici possono essere manipolati per consentire all'utente di visualizzare certi dati piuttosto che altri. I dati sono poi salvati in un file DTA per essere utilizzati con AEWin Replay, AEWinPOST e altri programmi di analisi. L'uso del software è illustrato in maniera più approfondita in Appendice A.

6.4 Esecuzione delle rilevazioni

Le acquisizioni sono state effettuate, alimentando il circuito con una pressione di circa 3.5 bar, prima in condizioni di perdita poi in condizioni di condotta integra andando a riparare le perdite tramite manicotti. In particolare sono state generate e successivamente riparate 3 perdite ciascuna ad una distanza rispettivamente di 1, 3 e 8 m dal punto di misura (valvola terminale) come anticipato precedentemente. In figura 6.6 è mostrata una delle perdite generate sulla condotta e il rispettivo manicotto.



Figura 6.6- Perdita generata e rispettivo manicotto

Un passo di importanza essenziale nelle prove alle emissioni acustiche è la determinazione dei parametri d'acquisizione più idonei per le specifiche applicazioni, in modo da riuscire a distinguere i segnali più significativi ai fini dell'individuazione perdita, nel complesso dei segnali ricevuti dalla strumentazione. A questo proposito è di fondamentale importanza la scelta di un corretto valore del threshold. Si tratta del livello di tensione predefinito che deve essere superato prima che il segnale di AE sia individuato e processato ed è un parametro che controlla la sensibilità del canale. La scelta del valore più idoneo per questo parametro ha richiesto l'esecuzione di varie acquisizioni, prima in assenza di perdita, al fine di monitorare il rumore di fondo e caratterizzare la condizione di "funzionamento normale", poi in presenza di perdita per verificare lo scostamento dalla condizione di "tubo sano". La scelta di questo parametro è cruciale, dal momento che scegliendo un threshold troppo alto si rischierebbe di non rilevare segnali importanti al fine dell'individuazione perdita, mentre scegliendo un valore troppo basso si rileverebbero segnali indesiderati dovuti al rumore di fondo.

Sono state eseguite due acquisizioni per ogni condizione, ciascuna della durata di 90 secondi, utilizzando come frequenza del sensore il range 20 kHz÷1 MHz e variando di volta in volta il valore del threshold. Si riporta di seguito una tabella con i vari test effettuati e i corrispondenti valori di threshold utilizzati.

Prova	Perdite misurate [m] dal punto di misura	Parametri acquisizioni		Note
		Durata [s]	Threshold[dB]	
1	3	90	36	Threshold troppo elevato, non si rileva rumore di fondo, ma nemmeno segnali associati alla perdita
2	3	90	34	Nessun risultato significativo
3	3	90	30	Nessun risultato significativo
4	1, 3 e 8	90	28	Valore più idoneo di threshold
5	3	90	26	Threshold troppo basso, il rumore di fondo copre i segnali legati alla perdita

Tabella 8- Test effettuati

Dalle prove si è ritenuto come valore più idoneo per questa specifica applicazione un treshold di 28 dB. Le prove effettuate con questo valore del treshold hanno infatti fornito i risultati più significativi. Per questo motivo nel capitolo successivo si illustreranno la procedura d'analisi e i risultati ottenuti esclusivamente per le acquisizioni effettuate con questo valore del treshold.

CAPITOLO 7

ANALISI DEI SEGNALI E RISULTATI

7.1 Analisi dei segnali

Per l'analisi dei segnali si è proceduto confrontando le acquisizioni effettuate in presenza di perdita con quelle in assenza di perdita (il cui segnale rappresenta la firma acustica di base caratteristica della condotta in condizioni di funzionamento normale), al fine di valutare la variazione dei parametri nel passaggio da una condizione all'altra e stabilire una relazione tra lo stato della condotta e i principali parametri di AE misurati. Infatti, in caso di perdita, ci si aspettano deviazioni del segnale dalla firma acustica di base. In particolare i parametri monitorati sono:

- Energia
- Hits
- Conteggi
- Ampiezza
- ASL

Tali parametri forniscono informazioni sull'intensità del segnale e, in caso di perdita, ci si aspetta un aumento di questi parametri rispetto a quelli della condizione di funzionamento normale, in maniera tanto più evidente quanto minore è la distanza della perdita dal punto di misura.

Oltre all'analisi sugli andamenti nel tempo dei principali parametri di AE in presenza e in assenza di perdita, si è sfruttata la AE Parameter Analysis per mettere in relazione lo stato della condotta con altri parametri di AE misurati. Secondo questo procedimento si analizzano le Hits usando i parametri RA e Frequenza Media. In particolare si ricorda, come anticipato nel capitolo 2, che tempo di salita e ampiezza massima sono usati per calcolare il valore RA, mentre conteggi e durata permettono di ricavare la frequenza media in questo modo:

$$RA = \frac{\text{tempo di salita}}{\text{ampiezza massima}}$$

$$\text{Frequenza Media} = \frac{\text{conteggi}}{\text{durata}}$$

Calcolando questi valori per ciascuna hit, in presenza e in assenza di perdita, e riportandoli in un grafico Frequenza Media/RA, ci si aspetta di ottenere nuvole di punti in grado di fornire informazioni sullo stato della condotta.

7.2 Risultati dell'analisi nel dominio del tempo

Come accennato in precedenza si riportano i risultati relativi ai soli test condotti con un valore del treshold di 28 dB, essendo questo il valore risultato più adeguato per questo tipo di applicazione. Inoltre si riportano i grafici relativi ad una sola acquisizione per ogni condizione, essendo confrontabili i risultati delle acquisizioni eseguite a parità di condizioni. Tutti i grafici si riferiscono alle grandezze cumulate nel tempo (figure 7.1-7.24).

Perdita a 1 m

- Energia/Tempo

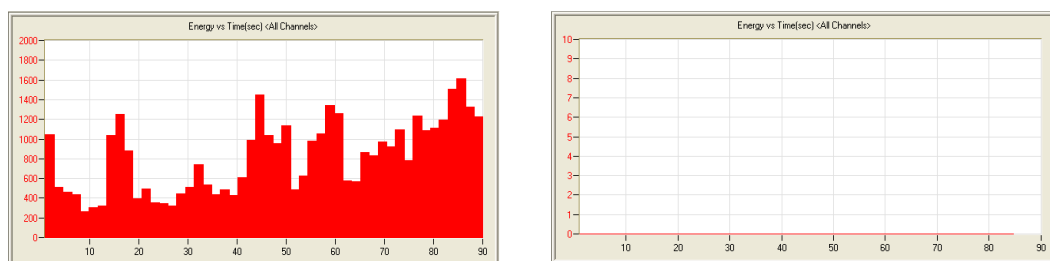


Figura 7.1- Energia cumulativa in presenza e in assenza di perdita rispettivamente.

- Hits/ Tempo

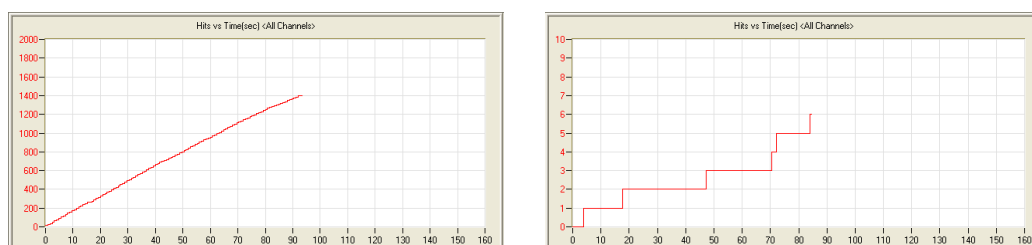


Figura 7.2- Hits cumulative in presenza e in assenza di perdita rispettivamente.

- Conteggi/Tempo

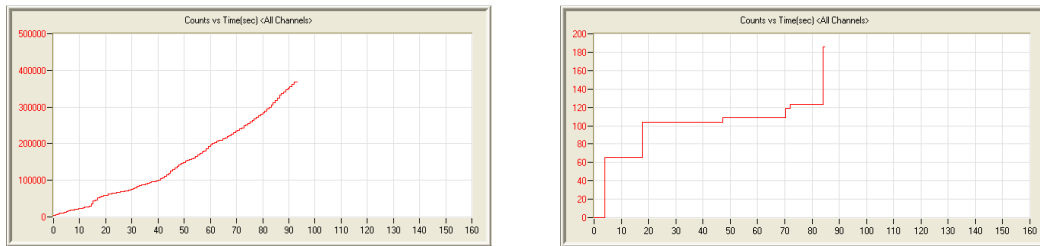


Figura 7.3- Conteggi cumulativi in presenza e in assenza di perdita rispettivamente.

- Ampiezza/Tempo

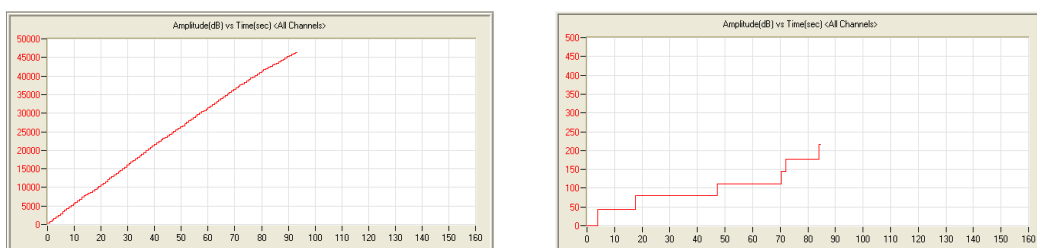


Figura 7.4- Ampiezza cumulativa in presenza e in assenza di perdita rispettivamente.

Come si può notare dalla figura 7.1, in presenza di perdita (grafico di sinistra) si rilevano livelli molto più alti di energia a prova di un'intensa attività di AE a differenza del caso di assenza di perdita, in cui si ha contenuto energetico nullo (grafico di destra).

Inoltre come si vede dagli altri grafici (figure 7.2-7.4) in caso di perdita a 1 m di distanza dal trasduttore, si rileva un aumento molto più rapido ed intenso di hits, conteggi ed ampiezza, rispetto al caso di assenza di perdita.

Per maggiore chiarezza, si riporta una tabella riassuntiva con i valori cumulativi dei parametri Energia (valore quantizzato e adimensionalizzato dal software), Hits, Conteggi e Ampiezza (espressa in dB, con valore di riferimento pari a 1 μV) e col valore ASL (livello medio del segnale, calcolato facendo la media delle ampiezze del segnale in una finestra temporale definita; nel nostro caso calcolato ogni 0,2 secondi) per acquisizioni di 90 secondi nel caso di assenza (tabella 9) e presenza di perdita (tabella 10).

Durata [sec]	90
Energia	0
Hits	6
Conteggi	186
Ampiezza [dB]	220
ASL [dB]	16

Tabella 9- Valori cumulativi dei parametri in assenza di perdita

Durata [sec]	90
Energia	42952
Hits	1398
Conteggi	368134
Ampiezza [dB]	47000
ASL [dB]	23÷24

Tabella 10- Valori cumulativi dei parametri in presenza di perdita a 1 m

In presenza di perdita a 1 m di distanza dal trasduttore si verificano anche oscillazioni del livello medio del segnale tra 23 e 24 dB a differenza di ciò che accade in assenza di perdita il cui ASL rimane costante a 16 dB per tutta la durata della prova.

Perdita a 3

Nota: da questo momento in poi non si riporteranno più gli andamenti dei vari parametri in assenza di perdita, essendo questi uguali ai precedenti.

- Energia/Tempo

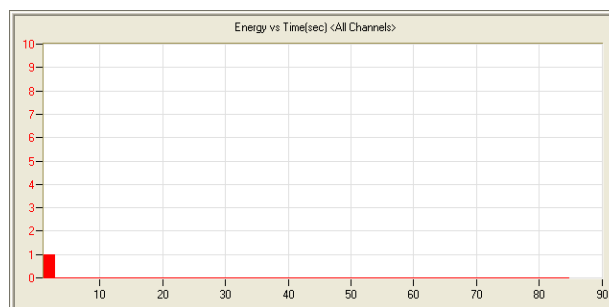


Figura 7.5- Energia cumulativa in presenza di perdita a 3 m.

- Hits/Tempo

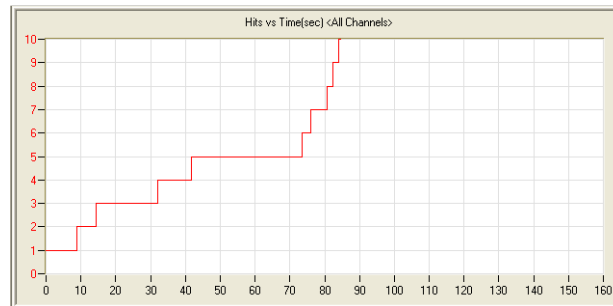


Figura 7.6- Hits cumulative in presenza di perdita a 3 m.

- Conteggi/Tempo

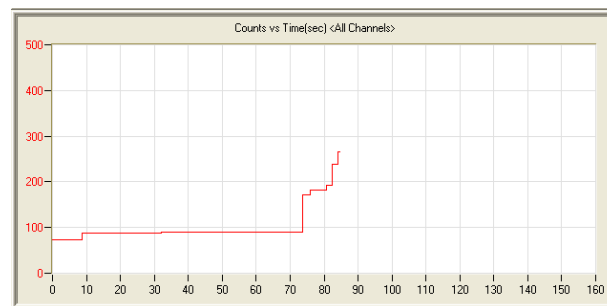


Figura 7.7- Conteggi cumulativi in presenza di perdita a 3 m.

- Ampiezza/Tempo

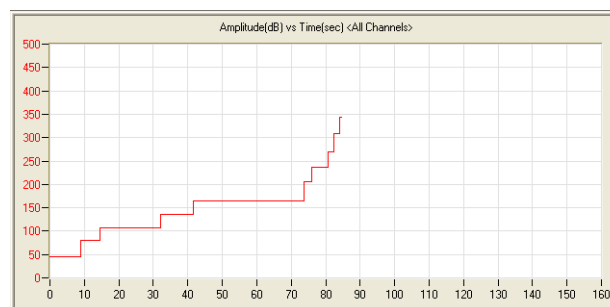


Figura 7.8- Ampiezza cumulativa in presenza di perdita a 3 m.

In questo caso, a differenza di ciò che accadeva in caso di perdita a 1 m di distanza dal trasduttore, non si rilevano particolari aumenti di energia, se non per un piccolo aumento iniziale, comunque considerato non significativo ai fini del rilevamento della perdita (figura 7.5), né aumenti significativi di hits (figura 7.6).

Invece, come si può notare dalle figure 7.7 e 7.8, si rileva un aumento di conteggi e ampiezza rispetto al caso di assenza di perdita. L'aumento di questi parametri risulta minore rispetto al caso di perdita a 1 m, come è

giusto aspettarsi, a causa del fenomeno dell'attenuazione, ma comunque da ritenersi significativo ai fini del rilevamento della perdita.

Si riporta una tabella riassuntiva con i valori cumulativi dei parametri Energia, Hits, Conteggi e Ampiezza e col valore ASL.

Durata [sec]	90
Energia	1
Hits	10
Conteggi	266
Ampiezza [dB]	350
ASL [dB]	16

Tabella 11- Valori cumulativi dei parametri in presenza di perdita a 3 m.

In questo caso non si verifica un aumento dell'ASL rispetto al caso di assenza di perdita; questo parametro quindi non risulta utile al fine dell'individuazione della perdita.

Perdita a 8 m

- Energia/Tempo

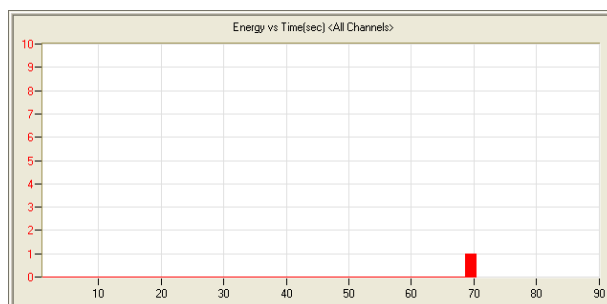


Figura 7.9- Energia cumulativa in presenza di perdita a 8 m.

- Hits/Tempo

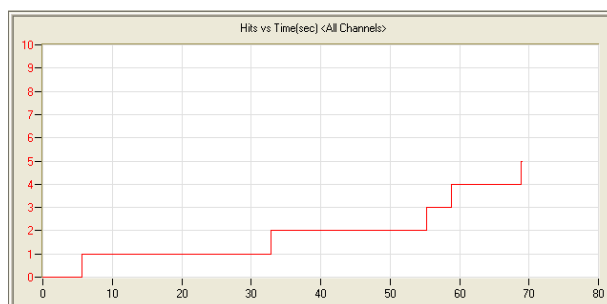


Figura 7.10- Hits cumulative in presenza di perdita a 8 m.

- Conteggi/Tempo

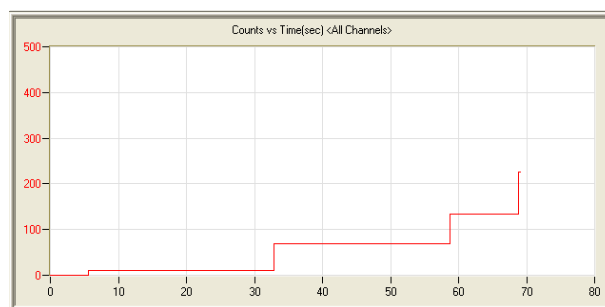


Figura 7.11- Conteggi cumulativi in presenza di perdita a 8 m.

- Ampiezza/Tempo

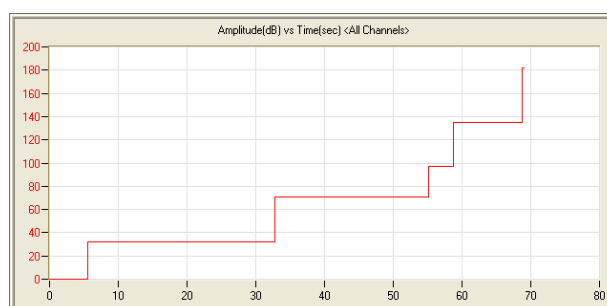


Figura 7.12. Ampiezza cumulativa in presenza di perdita a 8 m.

Nel caso di perdita a 8 m di distanza dal trasduttore, come si può notare dai grafici precedenti (figure 7.9-7.12), non si rilevano significativi aumenti di nessun parametro. Gli andamenti di tutti i parametri in questo caso risultano paragonabili a quelli in assenza di perdita e questo sembra testimoniare l'inefficienza, tramite monitoraggio di questi parametri, nel rilevare perdite a tali distanze, probabilmente a causa del fenomeno dell'attenuazione troppo accentuato.

Si riporta una tabella riassuntiva con i valori cumulativi dei parametri Energia, Hits, Conteggi e Ampiezza e col valore ASL.

Durata [sec]	90
Energia	1
Hits	5
Conteggi	225
Ampiezza [dB]	180
ASL [dB]	16

Tabella 12- Valori cumulativi dei parametri in presenza di perdita a 8 m.

Perdite a 1, 3 e 8 m aperte contemporaneamente

- Energia/Tempo

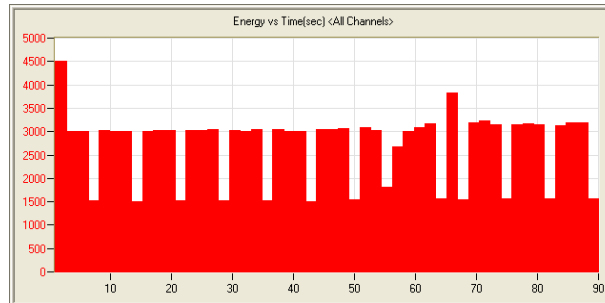


Figura 7.13- Energia cumulativa in presenza di perdite contemporanee.

- Hits/Tempo

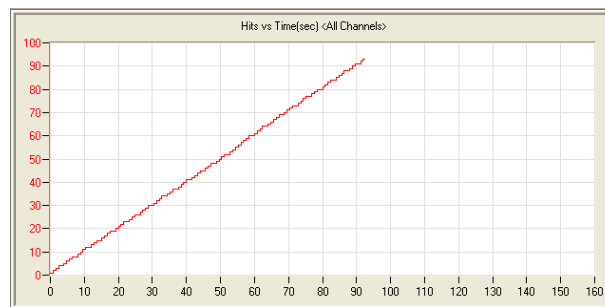


Figura 7.14- Hits cumulative in presenza di perdite contemporanee.

- Conteggi/Tempo

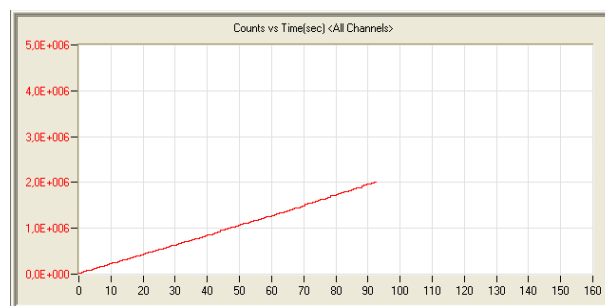


Figura 7.15- Conteggi cumulativi in presenza di perdite contemporanee.

- Ampiezza/Tempo

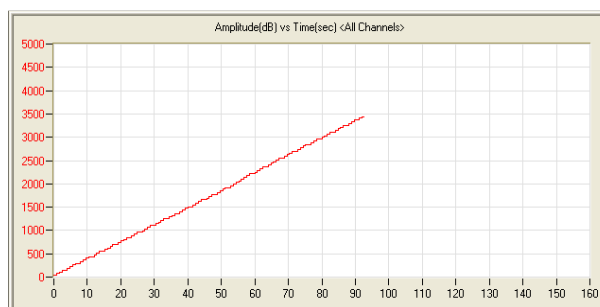


Figura 7.16- Ampiezza cumulativa in presenza di perdite contemporanee.

Come si può notare dai grafici precedenti (Figure 7.13-7.16) in presenza di perdite contemporanee a 1, 3 e 8 m dal punto di misura, si verificano aumenti notevoli e molto rapidi di tutti i parametri monitorati rispetto al caso di assenza di perdita.

Si riporta una tabella riassuntiva con i valori cumulativi dei parametri Energia, Hits, Conteggi e Ampiezza e col valore ASL per un'acquisizione di 90 secondi.

Durata [sec]	90
Energia	140412
Hits	93
Conteggi	2010041
Ampiezza [dB]	3500
ASL [dB]	26

Tabella 13- Valori cumulativi dei parametri in presenza di perdite contemporanee a 1, 3 e 8 m.

Come si può notare, in questo caso si hanno valori più elevati di Energia, Conteggi e ASL, rispetto al caso di sola perdita a 1 m dal punto di misura (tabella 10) e valori molto più elevati di tutti i parametri rispetto al caso di assenza di perdita (tabella 9).

Un aspetto apparentemente anomalo è che il numero delle hits è molto minore in questo caso rispetto a quello del caso di sola perdita a 1 m (93 hits per perdite contemporanee, contro le 1398 hits in caso di sola perdita a 1 m). Questo fenomeno si ritiene dovuto alla presenza di hits talmente tanto ravvicinate in quest'ultimo caso, da far sì che il software conteggi molte hits come una unica hit, a causa dell'impostazione dei parametri temporali utilizzati, in particolare dell'Hit Definition Time (vedi Advanced Channel

Setup, Appendice A). Nonostante ciò il numero di hits è comunque un parametro significativo ai fini dell'individuazione della perdita, essendo comunque maggiore rispetto al numero di hits in caso di assenza di perdita, condizione alla quale si fa riferimento per il confronto dei parametri, come accennato in precedenza.

Assenza di perdita con valvola terminale aperta

- Energia/Tempo

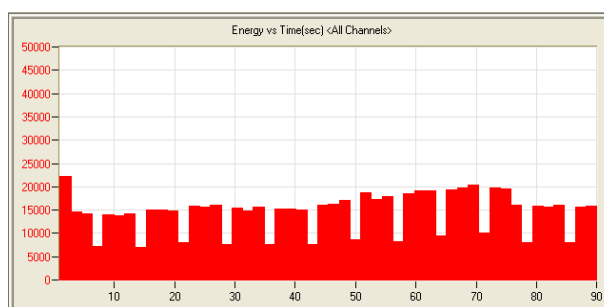


Figura 7.17- Energia cumulativa in caso di valvola terminale aperta

- Hits/Tempo

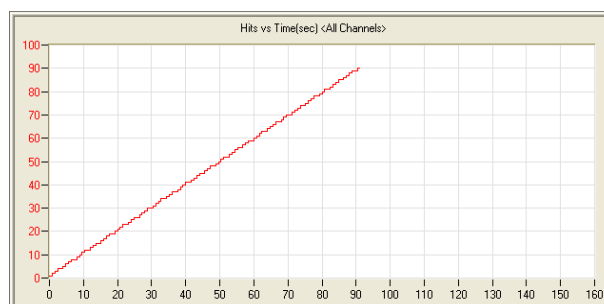


Figura 7.18- Hits cumulative in presenza di valvola terminale aperta

- Conteggi/Tempo

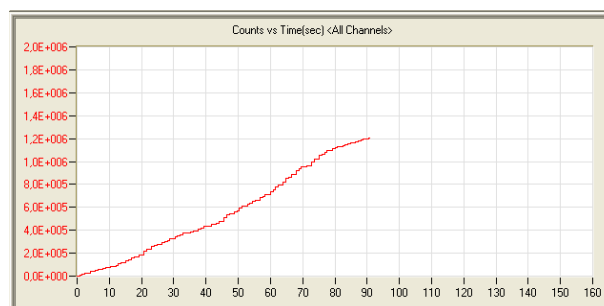


Figura 7.19- Conteggi cumulativi in presenza di valvola terminale aperta

- Ampiezza/tempo

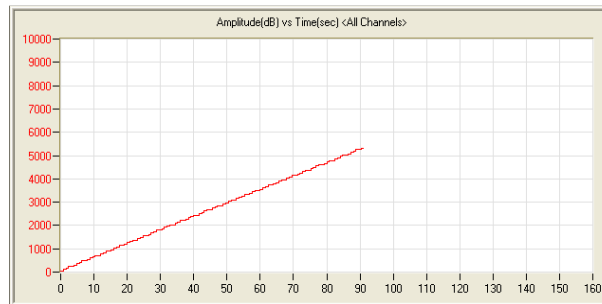


Figura 7.20- Ampiezza cumulativa in presenza di valvola terminale aperta.

Si riporta una tabella riassuntiva con i valori dei parametri Energia, Hits, Conteggi e Ampiezza e col valore ASL per un'acquisizione di 90 secondi.

Durata [sec]	90
Energia	775887
Hits	90
Conteggi	1539360
Ampiezza [dB]	5200
ASL [dB]	37÷45

Tabella 14- Valori cumulativi dei parametri in presenza di valvola terminale aperta.

Questa prova è stata eseguita per valutare l'influenza di un possibile uso di acqua da parte delle utenze sui parametri di AE e la possibilità di distinguere tra il caso di presenza di perdita e il caso di uso di acqua da parte delle utenze. Come si può notare dai grafici precedenti (figure 7.17-7.20) e dai valori raggiunti dai vari parametri (tabella 14), l'aumento intenso di tutti i parametri (paragonabile al caso di perdita a 1 m) sembra testimoniare l'impossibilità di distinguere tra il caso "perdita presente" e il caso "uso di acqua da parte degli utenti".

Assenza di perdita con passi attorno al punto di misura

- Energia/Tempo

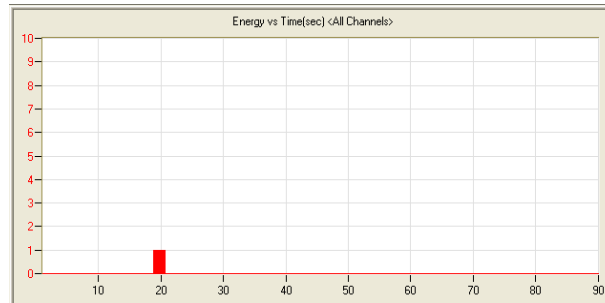


Figura 7.21- Energia cumulativa in assenza di perdita con disturbi esterni

- Hits/Tempo

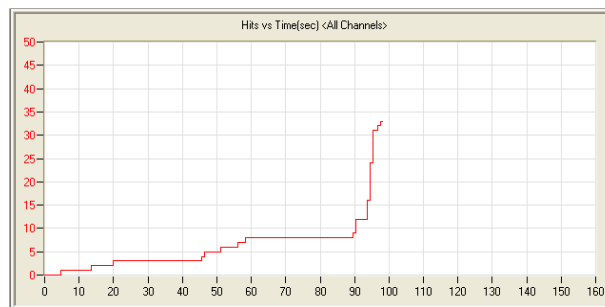


Figura 7.22- Hits cumulative in assenza di perdita con disturbi esterni

- Conteggi/Tempo

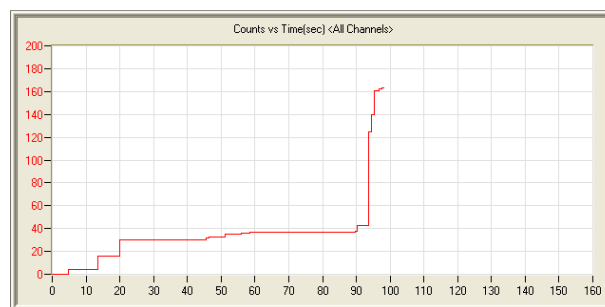


Figura 7.23- Conteggi cumulativi in assenza di perdita con disturbi esterni

- Ampiezza/Tempo

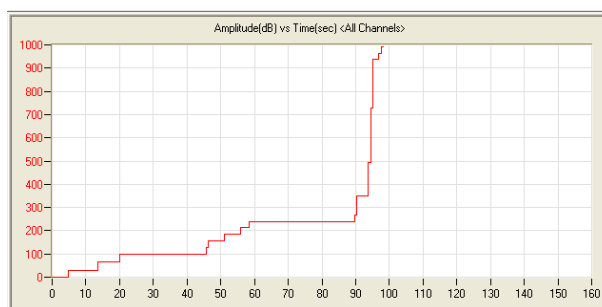


Figura 7.24- Ampiezza cumulativa in presenza di perdita con disturbi esterni

Si riporta una tabella riassuntiva con i valori dei parametri Energia, Hits, Conteggi e Ampiezza e col valore ASL per un acquisizione di 90 secondi.

Durata [sec]	90
Energia	8
Hits	33
Conteggi	163
Ampiezza [dB]	1000
ASL [dB]	16÷17

Tabella 15- Valori cumulativi dei parametri in assenza di perdita con disturbi esterni

Questa prova è stata eseguita per valutare l'influenza di disturbi esterni sui parametri di AE in assenza di perdita. Come si può notare dai grafici precedenti (figure 7.21-7.24) e dalla tabella 15, la presenza di disturbi esterni quali passi vicino al punto di misura, provoca un aumento di energia, di hits, di ampiezza e di ASL addirittura maggiore rispetto a quello che si verifica in caso di perdita a 3 m dal punto di misura (tabella 11).

L'utilizzo del solo monitoraggio dei parametri visti finora risulta apparentemente poco utile al fine dell'individuazione delle perdite, tranne per l'individuazione di perdite molto vicine al punto di misura (a 1 metro di distanza dal trasduttore). Potrebbe essere utile affiancare a questo metodo il monitoraggio di altri parametri di AE.

7.3 Risultati dell'AE Parameter Analysis

Si riportano i risultati dell'AE Parameter Analysis effettuata per entrambe le acquisizioni per ciascuna condizione (figure 7.25-7.35). Per i casi di perdita a 1 m di distanza, perdite contemporanee a 1, 3 e 8 m di distanza e valvola terminale aperta, vista l'enorme quantità di hits, si riportano i risultati ottenuti calcolando frequenza media e RA solo per alcuni range di hits. Inoltre, in tutti i grafici, la condizione assenza di perdita si riferisce all'insieme di tutte e tre le acquisizioni effettuate in assenza di perdita.

Perdita a 8 m

- Prima acquisizione

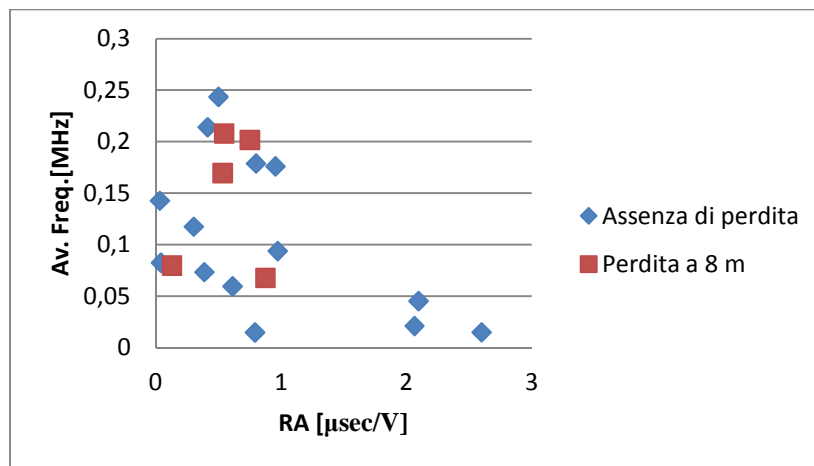


Figura 7.25- Frequenza Media/RA in caso di assenza e presenza di perdita a 8 m.

- Seconda acquisizione

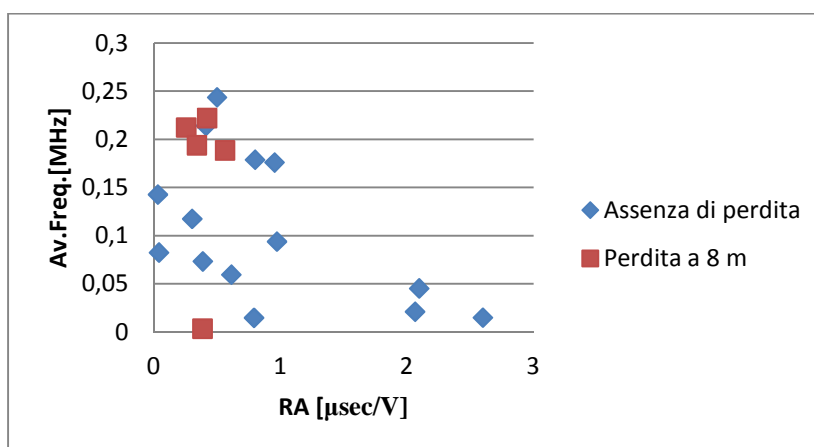


Figura 7.26- Frequenza media/RA in caso di assenza e presenza di perdita a 8 m.

In accordo con quanto documentato in letteratura, come si può notare dalle figure 7.25 e 7.26 la maggior parte dei punti corrispondenti al caso di presenza di perdita si trova al di sopra della bisettrice del grafico, a differenza di quanto accade in assenza di perdita, i cui punti corrispondenti si trovano distribuiti casualmente. Questo metodo potrebbe quindi essere utilizzato per individuare in modo efficace la presenza della perdita, essendo questa condizione caratterizzata da eventi con tempi di salita più brevi e frequenze più alte rispetto al caso di assenza di perdita.

Perdita a 3 m

- Prima acquisizione

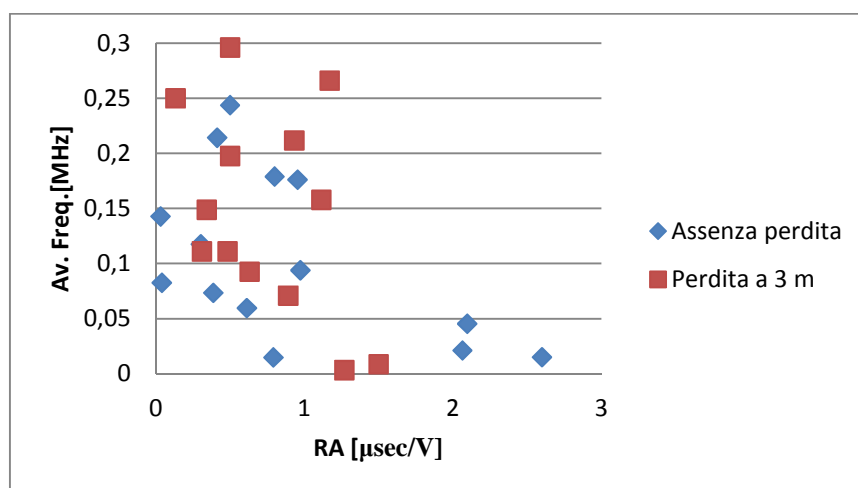


Figura 7.27- Frequenza media/RA in caso di assenza e presenza di perdita a 3 m.

- Seconda acquisizione

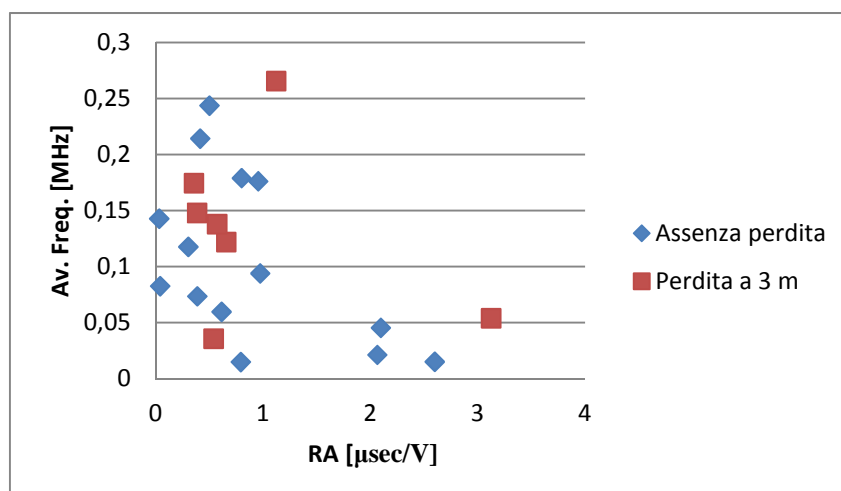


Figura 7.28- Frequenza media/RA in caso di assenza e presenza di perdita a 3 m.

Anche in caso di perdita a 3 m dal punto di misura i risultati sono in accordo con quanto documentato in letteratura. Le acquisizioni in presenza di perdita sono caratterizzate principalmente da eventi con bassi tempi di salita e alte frequenze. I punti relativi alla presenza di perdita sono infatti concentrati per la maggior parte al di sopra della bisettrice del grafico come ci si aspettava.

Perdita a 1 m

- Prima acquisizione

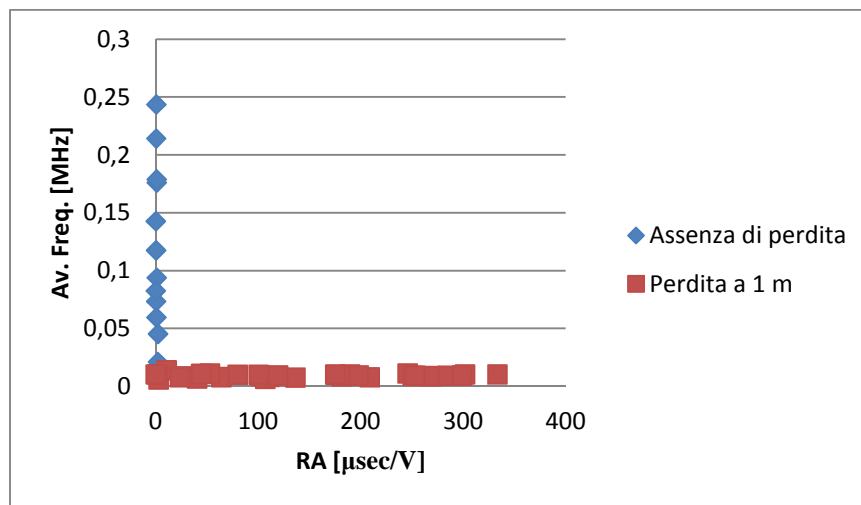


Figura 7.29- Frequenza media/RA in caso di assenza e presenza di perdita a 1 m.

- Seconda acquisizione

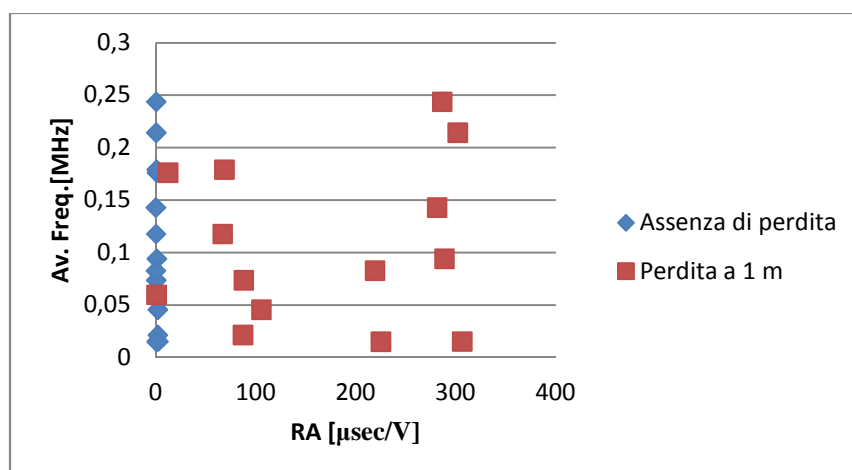


Figura 7.30- Frequenza media/RA in caso di assenza e presenza di perdita a 1 m.

In caso di perdita a 1 m dal trasduttore i risultati non sono in accordo con quanto documentato in letteratura. Infatti come si può notare dalle figure

7.29 e 7.30 i punti relativi alla condizione di presenza di perdita si trovano per lo più concentrati al di sotto della bisettrice del grafico per entrambe le acquisizioni. Si nota però che, a differenza dei casi precedenti, i punti relativi alla condizione di presenza di perdita sono caratterizzati da valori RA molto più alti. Questo si ritiene dovuto all'impostazione di un parametro temporale nel software che permette il calcolo del tempo di salita (il parametro in questione è il PDT, o Peak Definition Time, vedi Advanced Channel Setup, Appendice A). In presenza di perdite così vicine al punto di misura infatti ci si aspetterebbero hits più numerose, ravvicinate e con tempi di salita più rapidi per la natura del fenomeno dell'emissione acustica. Con l'impostazione scelta per questo parametro invece il software, per eventi di AE molto ravvicinati, calcola il tempo di salita di più eventi conteggiati come un unico evento. Come conseguenza anziché conteggiare tante hits con tempi di salita molto brevi, si conteggiano meno hits con tempi di salita molto più lunghi.

Dipendendo questo fenomeno dalla scelta dei parametri temporali, si è scelto di sfruttare a nostro vantaggio per l'individuazione di perdite idriche il monitoraggio dei valori RA, considerando valori RA molto elevati come efficaci indicatori di perdita, per questo particolare tipo di condotta, nelle medesime condizioni di prova e con gli stessi parametri temporali utilizzati.

Perdite a 1, 3 e 8 m contemporaneamente

- Prima acquisizione

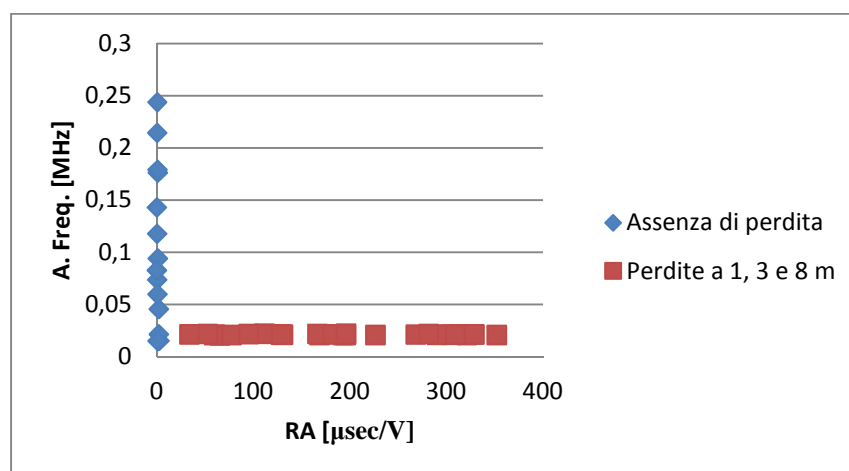


Figura 7.31- Frequenza media/RA in caso di assenza e presenza di perdite contemporanee.

- Seconda acquisizione

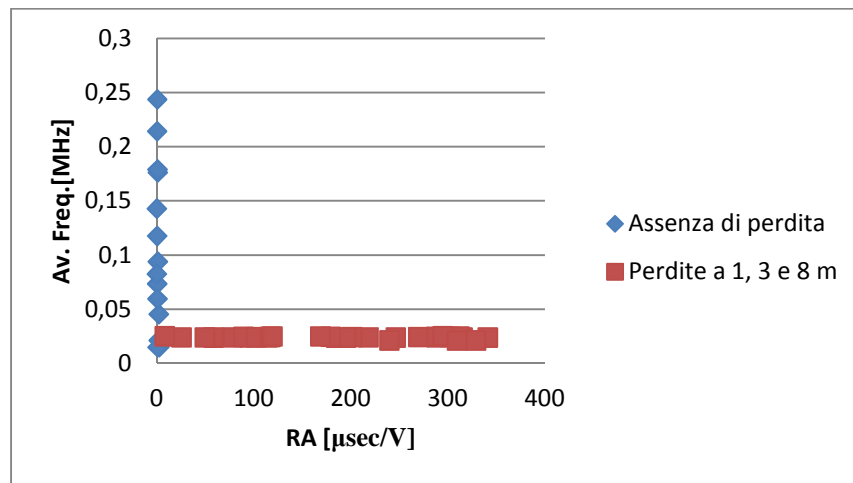


Figura 7.32- Frequenza media/RA in caso di assenza e presenza di perdite contemporanee.

Com'è giusto aspettarsi in caso di perdite contemporanee a 1, 3 e 8 m dal punto di misura si presentano eventi caratterizzati da valori RA estremamente elevati come nel caso di perdita a 1 m.

Valvola terminale aperta

- Prima acquisizione

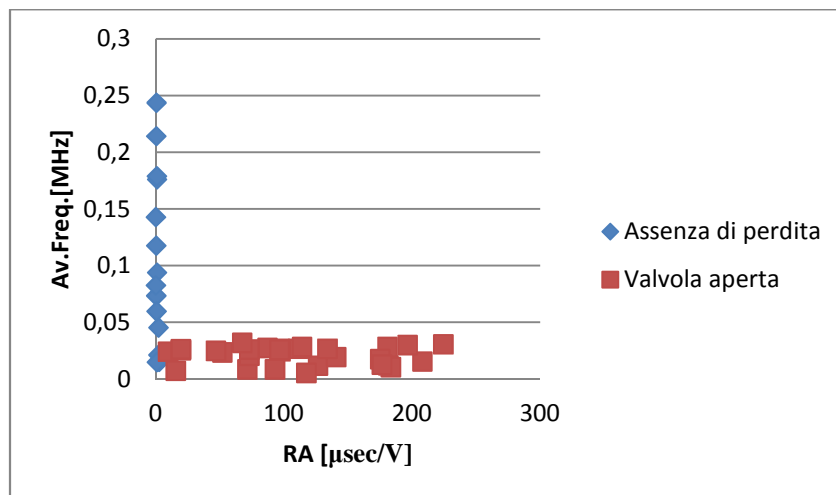


Figura 7.33- Frequenza media/RA in caso di assenza di perdita e in caso di valvola terminale aperta.

- Seconda acquisizione

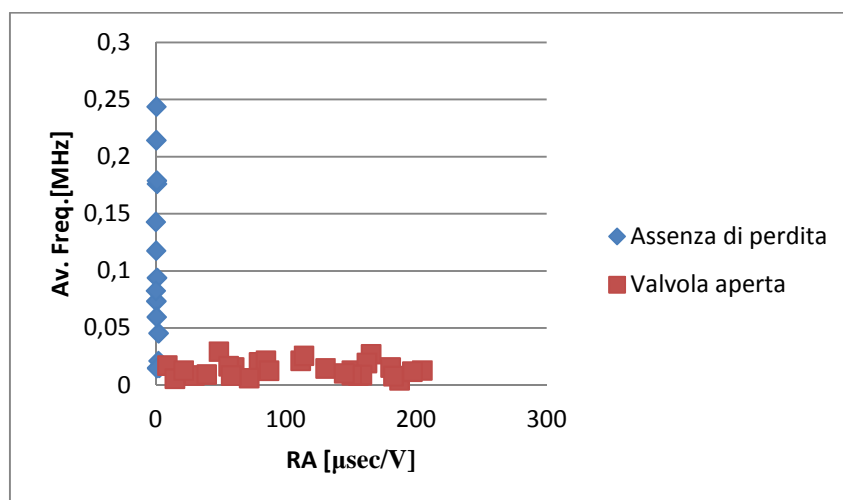


Figura 7.34- Frequenza media/RA in caso di assenza di perdita e in caso di valvola terminale aperta.

Anche in caso di valvola terminale aperta si verificano eventi caratterizzati da valori RA estremamente elevati (paragonabili al caso di perdita a 1 m) rispetto al caso di assenza di perdita. Da qui l'apparente impossibilità di distinguere tra il caso di "presenza di perdita" e il caso di "uso di acqua da parte delle utenze".

Assenza di perdita con passi attorno al punto di misura

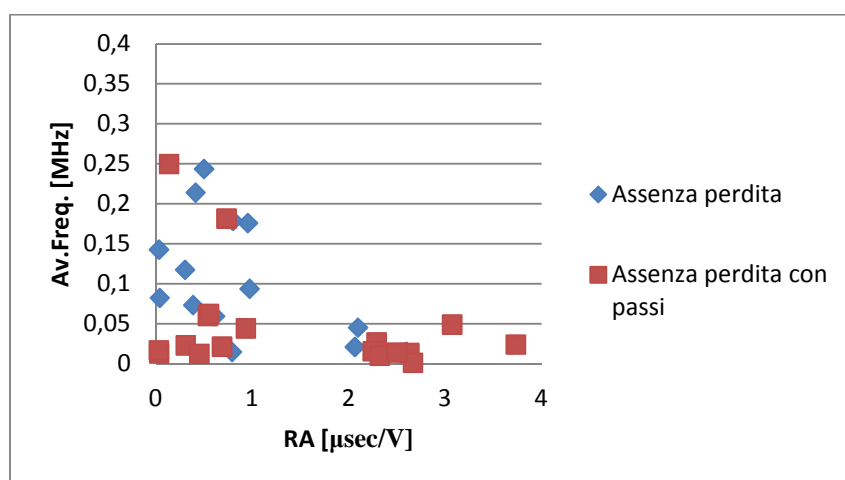


Figura 7.35- Frequenza media/RA in caso di assenza di perdita in assenza e in presenza di disturbi esterni.

A differenza dei casi precedenti in queste condizione è stata effettuata una sola acquisizione.

Come si può notare dalla figura 7.35 in caso di assenza di perdita con disturbi esterni si verificano eventi principalmente caratterizzati da frequenze medie basse e valori RA bassi, a differenza dei casi in presenza di perdita analizzati in precedenza in cui gli eventi erano caratterizzati o da frequenze medie alte e RA bassi o da valori RA estremamente elevati. Da qui emerge la possibilità di distinguere tra disturbi esterni e perdite utilizzando la AE Parameter Analysis a differenza di quanto accadeva dalla sola analisi dei parametri Energia, Hits, Conteggi e Ampiezza tramite la quale non era possibile fare una distinzione tra queste due condizioni.

7.4 Conclusioni

È stata valutata l'efficacia del metodo del rilievo delle AE per l'individuazione di perdite idriche in condotte in plastica.

Da una prima analisi effettuata monitorando i valori cumulativi dei parametri Energia, Hits, Conteggi e Ampiezza e il valore ASL è emerso che:

- I parametri Energia , Hits e ASL mostrano aumenti significativi rispetto al caso di assenza di perdita solo nei casi di perdita a 1 m, perdite contemporanee a 1, 3 e 8 m e valvola terminale aperta, testimoniando la possibilità di rilevare solo le perdite più vicine al punto di misura (a 1 m di distanza) tramite monitoraggio di questi parametri.
- L'ampiezza mostra aumenti significativi rispetto al caso di assenza di perdita anche in caso di perdita a 3 m dal trasduttore oltre ai casi precedenti, ma non in caso di perdita a 8 m, per il quale si ottengono valori paragonabili al caso di assenza di perdita.
- I conteggi non possono essere utilizzati come parametro per l'individuazione di perdite dal momento che nei casi di presenza di perdita a 8 m e assenza di perdita con disturbi esterni hanno addirittura mostrato una diminuzione rispetto al caso di assenza di perdita.
- Tramite questa sola analisi non è possibile distinguere il caso di “assenza di perdita con disturbi esterni” e il caso di “presenza perdita” e nemmeno tra il caso di “presenza perdita” e il caso “uso di acqua da parte delle utenze”

Il parametro più significativo risulta quindi essere l'ampiezza tramite la quale è possibile rilevare perdite fino a 3 metri di distanza dal trasduttore.

Da un'ulteriore analisi dei parametri di AE effettuata analizzando le Hits usando i parametri RA e Frequenza Media e confrontando il comportamento delle AE generate in caso di presenza di perdita con quello in caso di assenza di perdita in termini di valore RA e Frequenza Media, è emerso che:

- Per le acquisizioni effettuate in caso di perdita a 8 m e a 3 m di distanza dal punto di misura, si ottengono nuvole di punti situate prevalentemente al di sopra della bisettrice del grafico FM/RA, a differenza di quanto accade rispetto al caso di assenza di perdita, in accordo con quanto documentato in letteratura.
- Per le acquisizioni effettuate in presenza di perdita a 1 m di distanza dal trasduttore si ottengono nuvole di punti caratterizzate da valori RA estremamente elevati rispetto al caso di assenza di perdita.
- E' possibile distinguere il caso di "presenza di disturbi esterni" dai casi di "presenza di perdita".

Si ritiene pertanto di poter effettuare un controllo efficace delle perdite idriche sfruttando solo quest'ultimo tipo di analisi, tramite la quale risulta possibile rilevare tutte le perdite (a 1, 3 e 8 m di distanza) essendo le hits associate a queste condizioni sempre caratterizzate o da valori RA bassi e FM elevate (punti sopra la bisettrice) o da valori RA estremamente elevati, rispetto al caso di assenza di perdita. Inoltre, facendo uso di questo tipo di analisi, risulta possibile distinguere eventuali disturbi esterni dai casi di presenza di perdita.

CONCLUSIONI

È stata studiata l'efficacia di metodi basati sull'analisi di vibrazioni e suoni per rilevare perdite idriche in condotte di servizio, al fine di identificare possibili sviluppi per le attrezzature e metodi già esistenti in modo da permettere un monitoraggio continuo dello stato della condotta e la rilevazione delle perdite in modo automatico. In particolare ci si è concentrati sull'uso di accelerometri e idrofoni e, successivamente, sull'uso di sensori di emissioni acustiche (AE).

La fase sperimentale è stata distinta in due parti.

Dalla prima parte, che ha visto un confronto tra i segnali acquisiti da accelerometri e idrofono ed elaborati mediante apposito algoritmo, è emerso che l'efficacia del rilevamento perdite tramite segnali da idrofono appare decisamente superiore rispetto all'elaborazione di segnali provenienti da accelerometro, una volta filtrate le basse frequenze. L'individuazione di perdite a distanza superiore ai 10 m mediante accelerometri appare difficoltosa, nonostante si sia notato che montando l'accelerometro con asse di sensibilità parallelo all'asse della condotta si ottengono prestazioni superiori rispetto a quelle ottenute montando l'accelerometro con asse di sensibilità radiale.

La seconda parte ha visto l'esecuzione di test preliminari su tubazioni di servizio in plastica non interrate per determinare l'efficacia del metodo del rilievo delle emissioni acustiche nell'individuazione di perdite idriche, come tecnica alternativa all'uso di accelerometri e idrofoni, stabilendo una relazione tra i parametri di AE e lo stato della condotta. È emerso che il comportamento delle AE in condotte idriche è strettamente correlato allo stato della condotta stessa. In particolare è stato determinato un metodo che consente di valutare in maniera efficace lo stato della condotta tramite il monitoraggio dei principali parametri di AE, permettendo di discriminare tra il caso di perdita e il caso di assenza di perdita.

In conclusione sia l'uso di idrofoni e - in misura minore - di accelerometri, che l'uso di sensori di emissioni acustiche, hanno dato risultati positivi

confermando la fattibilità dell'individuazione automatica di perdite idriche in condotte di servizio in plastica tramite l'uso di questi sensori.

SVILUPPI FUTURI

Per quanto riguarda i possibili sviluppi futuri si ritiene necessaria l'esecuzione di rilievi di emissioni acustiche su condotte interrato, caso più aderente alla realtà, per valutare l'effettivo andamento dei parametri di AE in quest'ultimo caso.

APPENDICE A

SOFTWARE AEwin

1. INSTALLAZIONE E LICENZA

1.1 Installazione del Software

Per installare il software è necessario seguire i seguenti passi:

- a) Chiudere tutti i programmi in esecuzione.
- b) Disinstallare qualsiasi versione precedente di questo programma.
- c) Assicurarsi di NON avere già inserito la “Mistras License key” (chiavetta USB verde che dovrà essere utilizzata in seguito per la licenza).
- d) Inserire il CD per l’installazione del software.
- e) Eseguire SETUP.EXE dalla cartella principale del CD per l’installazione.
- f) Dopo avere eseguito SETUP.EXE si seguirà un tipico processo di installazione di Windows. Selezionare tutte le cartelle predefinite. Prima di terminare l’installazione, selezionare la casella “Activate AEwin” in modo da attivare il programma (una volta selezionata questa casella il processo di attivazione di AEwin inizierà in modo automatico).
- g) A questo punto collegare la “Mistras License key” ad una porta USB del pc. Windows potrebbe necessitare di installare il driver per la chiavetta. È sufficiente seguire le istruzioni e accettare le condizioni predefinite.

1.2 Licenza del software

La “Mistras License key” è una chiavetta che può essere utilizzata per eseguire il programma di licenza su QUALSIASI computer a cui venga collegata. Per la licenza è quindi sufficiente:

- a) Inserire la chiavetta in una porta USB del computer. Se è la prima volta che si inserisce in una certa porta USB allora è possibile che

Windows necessita di installare il driver. Seguire le istruzioni ed accettare le condizioni predefinite.

b) Eseguire il Software.

NOTA:

- Non è possibile l'installazione del software su pc a 64 bit!

2. USO DI AEwin

È possibile inizializzare il programma allo stesso modo di un qualunque programma di Windows:

Start > Programmi > Physical Acoustic > AEwin

Comparirà la seguente schermata (Figura 1):

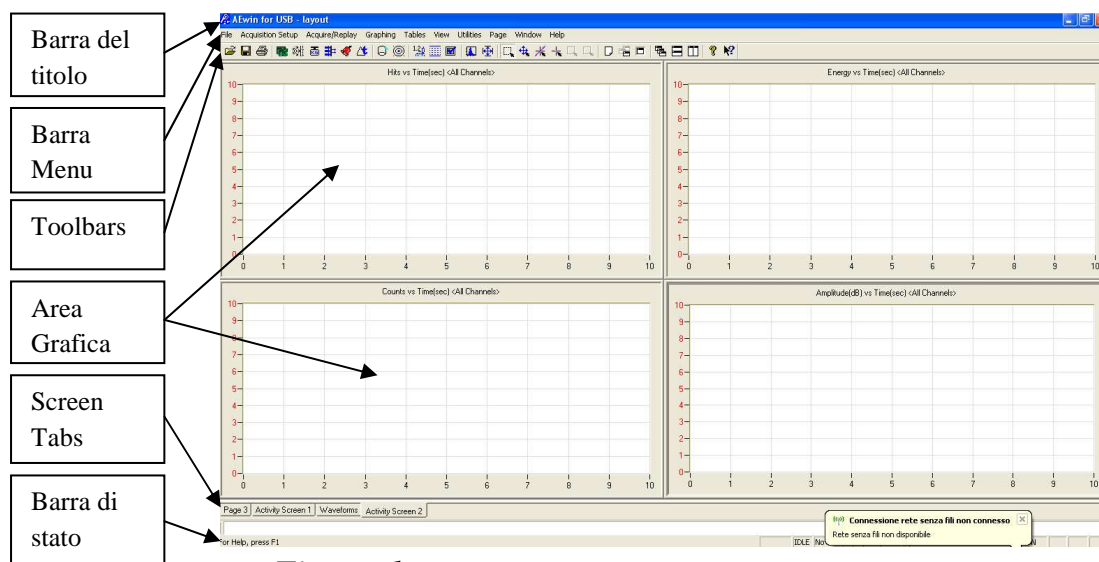


Figura 1- Schermata di apertura di AEwin

2.1 Acquisizione dei dati per la prima volta

Per l'esecuzione di un test è necessario seguire i seguenti passi (si suppone che lo strumento sia già collegato al pc e che il sensore sia già attaccato alla struttura da monitorare):

1. Caricare il file Layout.(LAY) più appropriato a seconda delle condizioni di esecuzione della prova. Ad esempio, nel nostro caso, avendo un solo canale, sarà opportuno usare il layout standard "Layout.LAY" (sono presenti anche altri layout standard come "Layout4.LAY" che consente di impostare 4 canali per

l'acquisizione ecc.). E' comunque possibile modificare tale layout (a seconda delle esigenze della prova), mostrando alcune grafici piuttosto che altri o monitorando alcuni parametri piuttosto che altri (questo verrà illustrato successivamente). Per caricare il file Layout.LAY:

Barra Menu > File > Open Layout > Layout.LAY > Enter

2. Iniziare l'acquisizione. Per fare questo:

Barra Menu > Acquire/Replay > Acquire

A questo punto comparirà una finestra per segnalare di inserire il nome del file e di indicare se si voglia salvare il file su disco.

1. Assicurarsi che la casella "Save to DTA file (Auto-Dump)" sia contrassegnata in caso si vogliano salvare i dati
2. Inserire il nome desiderato per il file nella casella "File name"
3. Iniziare il test premendo Start

A questo punto è possibile vedere gli andamenti dei vari parametri nei grafici in tempo reale.

3. Per terminare l'acquisizione:

Barra Menu > Acquire/Replay > Pause

2.2 File menu

Saranno illustrate di seguito le principali opzioni di questo menu.

- New Layout: usato per rimuovere tutti i grafici e pagine e ripristinare il layout all'impostazione predefinita di una sola pagina e un solo grafico.
- Open Layout: usato per caricare uno specifico layout
- Save Layout/Save Layout as: usato per salvare la configurazione di uno specifico layout.
- Print pages/Print graph: usati per stampare un grafico o più pagine di grafici.
- Export to JPG: usato per salvare pagine in formato JPG.
- Exit: usato per chiudere il programma.

2.3 Acquisition setup menu

2.3.1 Standard Channel Setup

Nella pagina “Standard Channel Setup” è possibile attivare o disattivare ciascun canale e scegliere i principali parametri per ciascuno di essi.

Acquisition setup > Hardware Setup > Standard Channel Setup

Cliccando su questa opzione comparirà una finestra del tipo mostrato in figura 2:

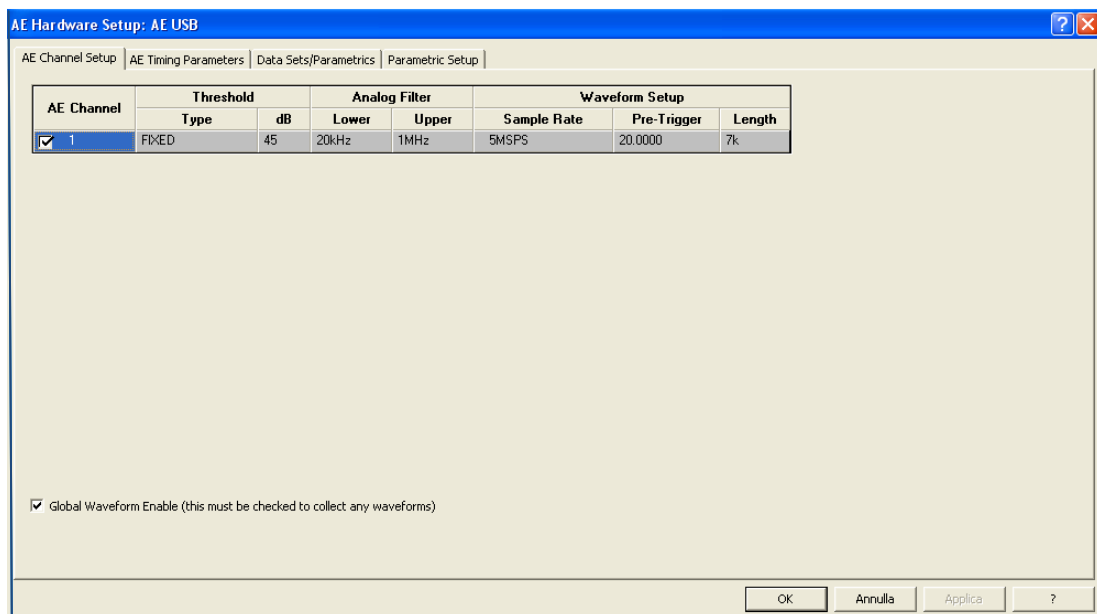


Figura 2- Standard Channel Setup

- AE Channel: è possibile attivare un canale cliccando sulla relativa casella.
- Treshold: può assumere un valore fisso (“Fixed”) o variabile (“Floating”) a discrezione dell’utente. Il “Fixed Treshold” viene utilizzato quando si vuole che il valore del treshold rimanga invariato al livello di dB scelto (nella colonna dei dB). Il “Floating treshold” viene utilizzato in condizioni di rumore di fondo elevato e variabile. Quando si sceglie questa opzione il valore mostrato nella colonna dei dB rappresenta il valore assunto dal treshold all’inizio dell’acquisizione. Il treshold potrà variare di 6 dB sopra l’attuale ASL (livello medio del segnale) letto per quel dato canale. Il treshold comunque non andrà mai al di sotto del valore iniziale specificato nella colonna dei dB.

Il treshold è la prima variabile che controlla la sensibilità del canale.

- Pre-Amp (dB): qui si deve inserire il guadagno del preamplificatore.
- Analog Filter: qui è possibile selezionare i valori per il filtro passa basso e passa alto su ciascun canale attivo. Se si desidera un'analisi della forma d'onda, questi valori devono essere tenuti al di sotto di $\frac{1}{2}$ della frequenza di campionamento.
- Sample Rate: qui è possibile selezionare la frequenza di campionamento in MSPS (Mega Samples Per Second, cioè MHz). Ad esempio, 1 MSPS significa che un campione di forma d'onda è preso ogni μsec ; 2 MSPS significa che un campione è preso ogni $\frac{1}{2} \mu\text{sec}$ e così via.
- Pre-Trigger: questo valore dice al software per quanto tempo registrare (in μsec) prima del punto di trigger (punto nel quale il valore del treshold è superato). È impostato a un valore di 20 μsec . Il valore minimo consentito per il pre-trigger è 0. Il valore massimo consentito si calcola dividendo la lunghezza dell'hit (Hit Length) per la frequenza di campionamento in MHz. Ad esempio, se la lunghezza dell'hit è 1 k (1 k = 1024) e la frequenza di campionamento è 4 MHz, allora il massimo valore di pre-trigger consentito sarà $1024/4 = 256 \mu\text{sec}$.
- Hit Length: questo parametro determina la dimensione della waveform mostrata. Può assumere un valore da 1 k a 15 k a scelta dell'utente. Ad esempio, a una frequenza di campionamento di 4 MHz, una lunghezza dell'hit di 1 k permetterà di visualizzare 256 μsec di dati, una lunghezza di 2 k permetterà di visualizzare 512 μsec di dati e così via.

2.3.2 Advanced Channel Setup

Nella pagina “Advanced Channel Setup” è possibile attivare o disattivare ciascun canale e scegliere i valori dei parametri temporali del processo di misurazione del segnale, quali PDT, HDT e HLT.

Acquisition Setup > Hardware Setup > Advanced Channel Setup

- PDT (Peak Definition Time): un corretto settaggio di questo parametro assicura la corretta identificazione del picco del segnale per misurazioni del tempo di salita e dell'ampiezza del segnale.
- HDT (Hit Definition Time): una scelta corretta del valore di questo parametro assicura che ciascun segnale di AE proveniente dalla struttura sia riportato come una e una sola hit.
- HLT (Hit Lockout Time): una scelta appropriata di questo parametro permette di evitare misurazioni spurie durante il decadimento del segnale così da aumentare la velocità di acquisizione dei dati.

Esistono comunque valori raccomandati per questi parametri a seconda del materiale della struttura da testare (Tabella a).

	PDT	HDT	HLT
Compositi, Non Metalli	20-50	100-200	300
Campioni in metallo di piccole dimensioni	300	600	1000
Strutture Metalliche (elevato smorzamento)	300	600	1000
Strutture Metalliche (basso smorzamento)	1000	2000	20000

Tabella a- Valori raccomandati per i parametri PDT, HDT e HLT

2.3.3 Data Sets/Parametrics

Selezionando "Data Sets Parametrics" comparirà la pagina mostrata in figura 3.

Acquisition Setup > Hardware Setup > Data Sets/Parametrics

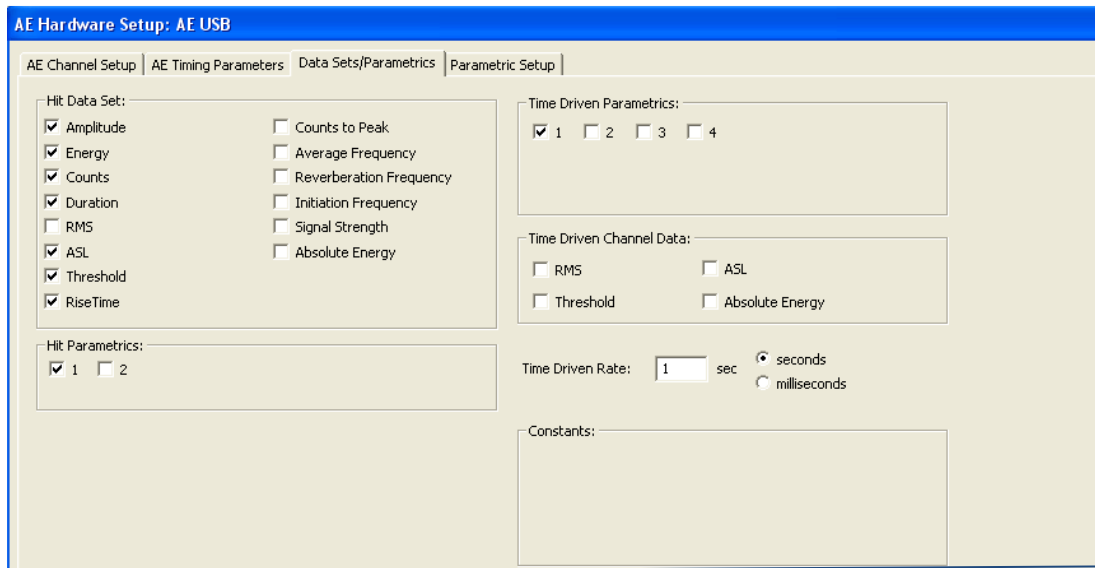


Figura 3- Data Sets/Parameters

- **Hit Data Set:** permette di selezionare quali parametri misurabili devono essere inclusi nella descrizione di ciascuna hit, semplicemente marcando la casella vicino al relativo parametro. “Time of Test” non è mostrato perché è sempre incluso nel set di dati.
- **Hit Parametrics:** permette di selezionare quali input parametrici devono essere inclusi nella descrizione di ciascuna hit, ad esempio segnali di carico esterno. Si possono includere al massimo due input parametrici o un input più il contatore dei cicli (“Cycle Counter”). Questi input parametrici devono essere inclusi anche in “Time Driven Data Set”.
- **Time Driven Parametrics e Time Driven Channel Data:** oltre alla descrizione delle hits, AEwin permette di registrare alcune grandezze come RMS, ASL, Treshold, Energy e input parametrici, semplicemente marcando la casella di fianco alla grandezza che si desidera registrare.
 - **Time Driven Rate:** questo parametro controlla la frequenza di lettura dei dati da includere nelle registrazioni. Può andare da 10 msec a 1800 sec e deve essere un multiplo di 10 msec. Valori tipici sono nel range 1000÷60000 msec (1÷60 sec).
- **RMS/ASL Time Constant:** le costanti di tempo possono essere settate da 10 ms a 1000 ms in step di 10 ms.

2.3.4 Parametric Setup

La pagina “Parametric Setup” (Acquisition Setup > Hardware Setup > Parametric Setup, Figura 4) permette di scalare le tensioni misurate all’ingresso parametrico, così che il sistema mostri i corrispondenti valori di carico e pressione. Questa pagina permette inoltre di decidere in quali unità esprimere le grandezze negli assi dei grafici (kN, psi) e di selezionare quattro filtri disponibili sul gain.

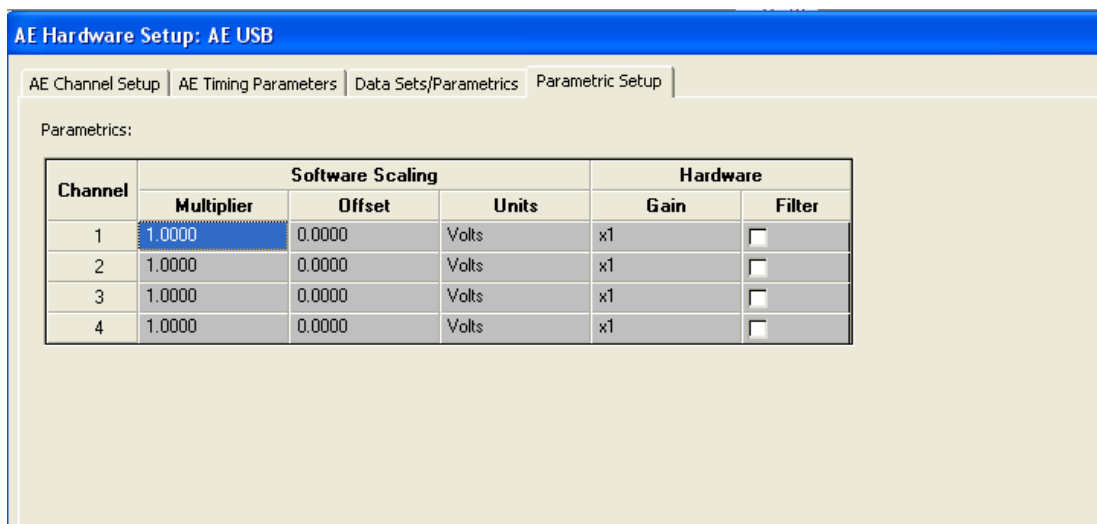


Figura 4- Parametric Setup

Il processo di ridimensionamento parametrico utilizzato da AEwin è:

$$\text{Valore mostrato} = (\text{Tensione misurata} \times \text{Multiplier}) + \text{Offset}$$

I valori di default sono 1.00 per il multiplier, 0.00 per l’offset e “Volts” come unità di misura così che il sistema mostrerà la tensione “grezza” in arrivo all’ingresso parametrico.

Per scalare l’uscita di un trasduttore lineare di misurazione del carico, il modo più semplice per trovare i valori giusti per il Multiplier e per l’Offset è quello di andare in una prova simulata (nella cartella degli esempi presente nel software), accedere ai vari valori del test premendo F7 e leggere dal display le tensioni parametriche corrispondenti a due carichi molto distanti. Supponendo che i valori di tensioni letti siano V1 per il carico L1 e V2 per il carico L2, i giusti valori per il Multiplier e per l’Offset saranno:

$$\text{Multiplier} = (L1 - L2)/(V1 - V2)$$

$$\text{Offset} = (V1 \times L2 - V2 \times L1)/(V1 - V2) = L1 - \text{Multiplier} \times V1$$

Una volta cliccato OK per uscire dalla finestra di dialogo, i valori scalati dell'ingresso parametrico appariranno su tutti i grafici mostrati e su tutte le liste di dati. I valori minimi e massimi per gli assi dei grafici devono essere specificati nei valori scalati e l'unità inserita verrà visualizzata sul grafico (es. 0-1000 psi). I dati "grezzi" su disco conterranno le tensioni lette inizialmente e la scala verrà ripetuta ogni volta che il file verrà riprodotto.

2.4 Acquire/Replay

Tramite i comandi che si trovano nella finestra di dialogo che compare cliccando su "Acquire/Replay" nella barra menu è possibile iniziare un test ("Acquire"), controllarlo ("Pause"), terminarlo ("Abort") e riprodurlo ("Replay"). La riproduzione è consentita in qualunque momento successivo alla prova, anche nel caso lo strumento non sia collegato al pc.

2.5 Gestione dei grafici

Il comando "Graphing" nella Barra Menu viene utilizzato per settare i parametri dei vari grafici.

Per "Graph" si intende la finestra all'interno della quale si trova il grafico vero e proprio (chiamato Plot); all'interno di un Graph quindi ci possono essere più plot. Le finestre o "Graphs" si trovano nella pagina chiamata "Screen" (o semplicemente Page).

È possibile:

- Creare il numero di Screen necessari aggiungendo o eliminando Screen Pages e aggiungere titolo a ciascuna pagina, semplicemente cliccando col tasto destro del mouse su Screen (sullo schermo in basso a sinistra) e cliccando sulla relativa voce.
- Creare il numero di finestre necessarie aggiungendo o eliminando Graphs, semplicemente cliccando col tasto destro del mouse su uno di essi e andando sulla relativa voce ("New Graph").
- Scegliere i parametri da mostrare sugli assi di ciascun grafico e il modo di visualizzazione (istogramma 2D, istogramma 3D ecc.) semplicemente cliccando col tasto destro del mouse sul grafico da settare e selezionando la voce "Graph setup". Comparirà in questo modo una finestra di dialogo del tipo mostrato in figura 5, nel quale è

possibile scegliere i parametri da graficare e il modo di visualizzazione del grafico in questione

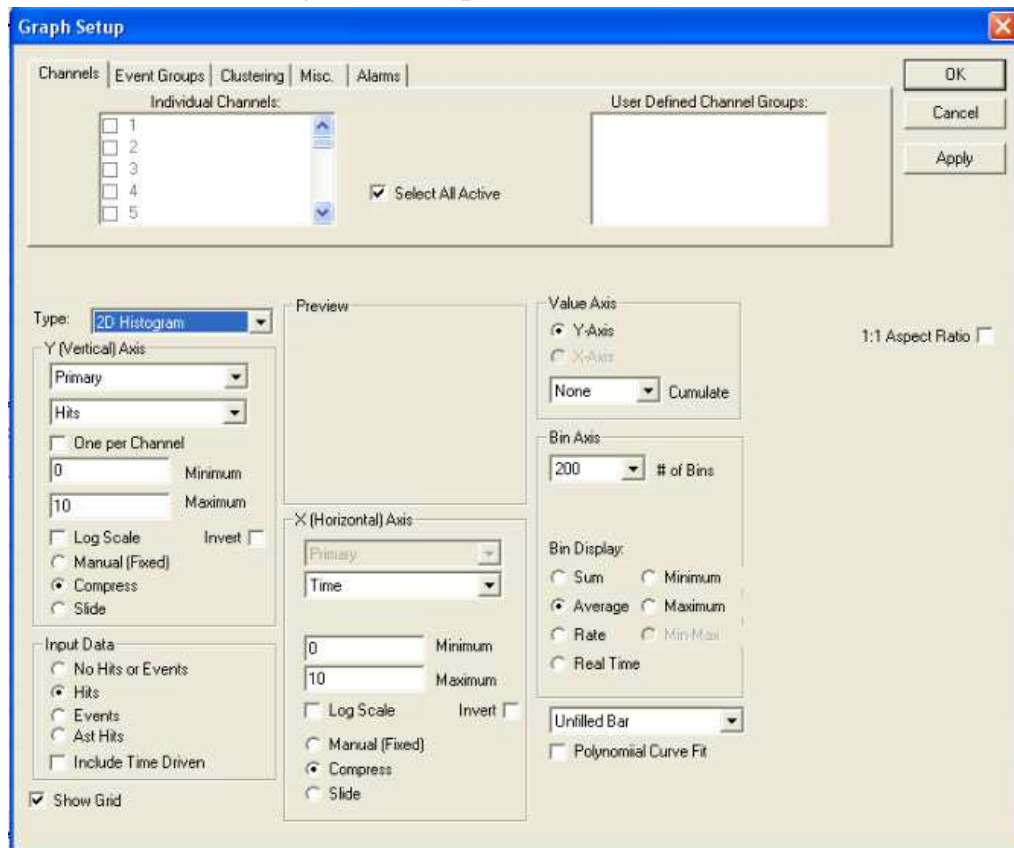


Figura 5- Graph Setup

2.6 Esportazione dei dati

E' possibile esportare i file in formato ASCII tramite:

Barra Menu > Utility > ASCII output

quindi scegliendo i dati che si vogliono trasferire nel file di testo.

È possibile anche esportare i risultati di un grafico in un file di tipo Excel cliccando col tasto destro del mouse sul grafico desiderato e selezionando "Export Data to File".

Maggiori informazioni si possono trovare nel Manuale d'uso del Software AEwin.

BIBLIOGRAFIA

- [1]: R.D. Finlayson, “Handbook of Nondestructive Evaluation: Chapter 10 Acoustic Emission Testing”, 2000, Mc Graw Hill Companies.
- [2]: G.P. Gregori, G. Paparo, “Multifrequency Acoustic Emission for Monitoring the time Evolution of Microprocesses within Solids, Reviews of Quantitative Nondestructive Evaluation”, Proceedings of AIP Conference, 2003, pp.1423-1430.
- [3]: A. Anastasopoulos, D. Kourousis e K. Bollas, “Acoustic Emission Leak Detection of Liquid Filled buried Pipeline”, Enviroacoustics ABEE, Atene.
- [4]: Markus G.R. Sause, “Investigation of Pencil-lead breaks as Acoustic Emission Sources”, University of Augsburg, Institute for Physics, Experimental Physics II, D-86135 Augsburg, Germany.
- [5]: “Time-frequency Analysis of the Calibrating Signals Generated in the Hsu-Nielsen System”, Technical University of Opole
- [6]: Didem Ozevin e James Harding, “Novel Leak Localization in Pressurized Pipeline Networks using Acoustic Emission and Geometric Connectivity”, Department of Civil and Materials Engineering University of Illinois, Chicago.
- [7]: M. Ohtsu, “Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of AE source: application in situ hydrofracturing test”, Geophys Res, 1991, 96 (B4), pp. 6211-21.
- [8]: M. Ohtsu, K. Ono, “A generalized theory of acoustic emission and Green’s function in a half space”, AE, 1984, 3 (1), pp.124-133.
- [9]: Aggelis, D.G, Matikas, T.E, Shiotani, T., “Advanced acoustic techniques for health monitoring of concrete structures”, 2010. In: Kim, S.H., Ann, K.Y. (Eds), “The Song’s Handbook of Concrete Durability”. Middleton Publishing Inc., pp. 331-378.

- [10]: D.G. Aggelis, “Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters”, *Mechanics Research Communication*, 2011, 38, pp. 153-157.
- [11]: T. Suzuki, Y. Ikeda, Y. Tomoda and M. Ohtsu, “Water leak evaluation of existing pipeline by acoustic emission”, *Acoustic Emission*, 2005, 23, pp. 272-276.
- [12]: AWWA, “Water Audits and Leak Detection. Manual of Water Supply Practice M36”, 1999, America Water Works Association, Denver, CO.
- [13]: WAA, “Report 26 Leakage Control Policy & Practice”, 1980, UK Water Authorities Association.
- [14]: J. Morrison, S. Tooms, D. Rogers, “District Metered Areas. Guidance Notes”, 2007, International Water Association, UK.
- [15]: O. Hunaidi, A. Wang, “A new system for locating leaks in urban water distribution pipes”, *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 2006, Vol.17, Issue 4, pp. 450-466.
- [16]: O. Hunaidi, W. Chu, A. Wang e W. Guan, “Leak Detection Methods for Plastic Water Distribution Pipes”, 1999, AWWA Research Foundation and American Water Works Association.

RINGRAZIAMENTI

Un grazie di cuore ai miei genitori che mi hanno supportato durante tutti questi anni con pazienza e sacrifici, permettendomi di raggiungere sempre i miei obiettivi.

Grazie a tutti gli amici che mi sono stati vicino e mi hanno permesso di affrontare anche i momenti più impegnativi con spensieratezza ed allegria.

Grazie al mio relatore Prof. Marco Troncossi per la grande professionalità e disponibilità e per il supporto e i consigli che mi ha dato durante il periodo di preparazione di questa tesi.

Grazie ai miei correlatori Ing. Alberto Martini e Ing. Davide Nascetti per la collaborazione.

Un grazie infine a tutti i professori che ho incontrato in questi anni di studio, i quali mi hanno permesso di crescere e maturare enormemente.