

ALCUNI ASPETTI DI ANALISI DEL SEGNALE NELLA MISURA SONICA DI TEMPERATURA DEI GAS IN GENERATORI DI VAPORE

Angelo Cavaliere (1), Angelo Farina (2), Luca Gregori (1), Gian Antonio Zanetta (1)

- (1) CESI S.p.A., Via Reggio Emilia 39, 20090 Segrate (MI), Italia, www.cesi.it
- (2) UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Parco Area delle Scienze 181/A, 43100 Parma

SOMMARIO

L'articolo affronta alcune problematiche di analisi del segnale concernenti il sistema strumentale T-Sonic, originalmente sviluppato da CESI e finalizzato alla determinazione con metodi sonici di mappe termiche in flussi gassosi, tipicamente nelle caldaie di gruppi termoelettrici a vapore.

In particolare vengono illustrati i risultati ottenuti dalla revisione ed aggiornamento degli algoritmi di elaborazione del segnale per la determinazione della temperatura, con lo scopo di migliorare l'affidabilità e ripetibilità delle misure, soprattutto in presenza di elevato rumore di fondo presente in determinate condizioni di esercizio.

Infine sono documentati i risultati ottenuti su dati sperimentali acquisiti su impianto, per mezzo di sonde installate su una caldaia di un gruppo a vapore da 660MW.

1. INTRODUZIONE

La misura di temperatura in camera di combustione di una caldaia industriale in impianti di produzione dell'energia elettrica e la possibilità di tracciare una mappa della distribuzione di temperatura del flusso dei gas sono elementi di rilevante interesse ai fini della diagnostica e del controllo del processo per un eventuale bilanciamento delle portate di combustibile ai diversi bruciatori, come indicatore della riduzione di scambio termico per sporcamento dei tubi, per la verifica del superamento di temperature che provoca la vetrificazione dei residui di combustione sui fasci tubieri ed, inoltre, per il calcolo di vita residua dei materiali.

Questi aspetti assumono una rilevanza ancora maggiore in connessione con i cicli innovativi "Ultra-SuperCritici" (USC), caratterizzati da un campo di lavoro che si estende fino a temperature del vapore dell'ordine dei 720°C e pressioni di 400 bar.

Il sistema strumentale T-Sonic può essere impiegato per misure con metodi sonici di temperatura in flussi gassosi, oltreché nelle caldaie di gruppi termoelettrici convenzionali, anche nelle torri di raffreddamento, nella mandata di gruppi turbocompressori o nei condotti di scarico fumi di gruppi turbogas. La misura è basata sul calcolo della velocità di propagazione nel fluido interessato sul percorso degli impulsi sonori da un emettitore ad un ricevitore, montati rispettivamente a monte e a valle di opportune guide d'onda.

La progettazione e l'installazione del sistema T-Sonic su caldaie di impianti termici, ha posto sia problemi pratici dovuti alla criticità dell'ambiente in cui il sistema deve

essere installato (temperature elevate, aggressività chimica, presenza di particolato e possibilità che questo si depositi nei condotti acustici, necessità di raffreddamento delle sonde), sia problemi progettuali relativi all'acustica del sistema guida d'onda/diffusore e alle tecniche di elaborazione del segnale.

Al fine di verificare la possibilità di migliorare le prestazioni del sistema, si era dapprima indagata la modifica della geometria della coppia emettitore/ricevitore [1]. Questi studi avevano però dimostrato che il miglioramento ottenibile poteva essere solo marginale. In ogni caso, lo sporcamento dei coni delle guide d'onda per effetto dei fumi, porta le medesime a lavorare in condizioni abbastanza lontane da quelle di progetto.

Contemporaneamente, i risultati ottenuti da prove effettuate a seguito di una installazione pilota del sistema su un gruppo da 660 MW [2], con coppie emettitore/ricevitore in diverse sezioni di caldaia dell'impianto, hanno dimostrato come il sistema fosse in grado di misurare con una discreta affidabilità e ripetitività la temperatura del gas prodotto dalla combustione, ma hanno nel contempo indicato la necessità di migliorare la qualità e l'affidabilità dei risultati ottenibili anche in condizioni di esercizio particolarmente sfavorevoli, come ad esempio con i soffiatori in funzione.

Alla luce di tali risultati, gli sforzi sono perciò stati diretti al miglioramento delle tecniche di eccitazione e di elaborazione del segnale, sfruttando peraltro le risorse HW già disponibili.

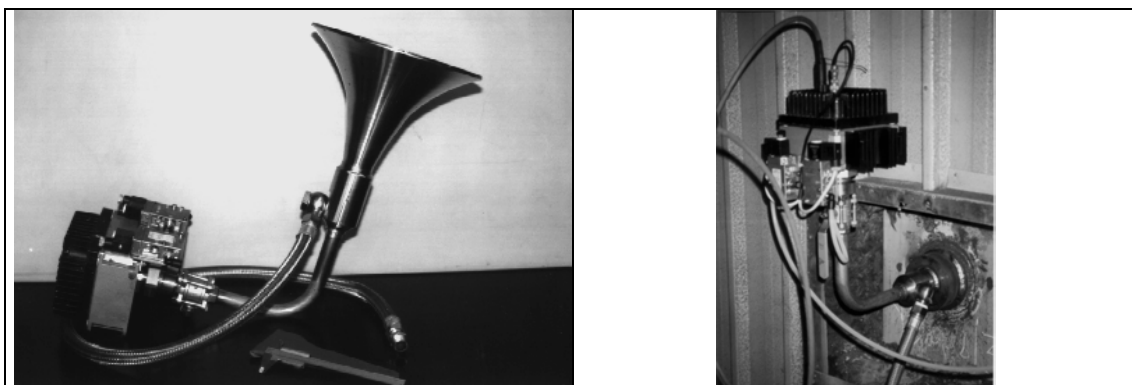
Nel seguito, dopo alcuni cenni al problema fisico ed un breve richiamo alla descrizione del sistema T-Sonic e ai risultati pregressi, si riportano i risultati delle elaborazioni con nuove metodologie delle misure effettuate in campo su un impianto da 660 MW, alla luce dei quali è stata sviluppata una nuova tecnica di trattamento dei segnali.

2. SISTEMA T-SONIC E PROBLEMI DELLA MISURA DI TEMPERATURA IN CALDAIA

Nella configurazione originale, il sistema T-Sonic è costituito da un certo numero di trasduttori, ai quali viene permanentemente accoppiato un sistema di elettronica analogica e digitale locale in grado di effettuare tutte le analisi del segnale necessarie. Ciascuna unità, facendo impiego dello stesso trasduttore, ha la doppia funzione di emettitore e ricevitore e comunica con le altre unità tramite un bus di campo digitale dedicato a bassa velocità. Sul bus viene anche collocato un controller costituito da un PC con apposita scheda di interfaccia al bus di campo.

Ciascuna unità periferica (vedi Fig. 2.01) è costituita di 4 elementi:

- Guida d'onda in acciaio inox, raffreddata ad aria, inserita oltre i fasci tubieri entro la camera di combustione o condotto fumi; l'installazione sperimentale su un gruppo da 660MW sfrutta in realtà un portello di ispezione visiva.
- Trasduttore elettroacustico costituito da un driver a compressione per trombe.
- Elettronica analogica di amplificazione di potenza (in trasmissione) e di segnale (in ricezione).
- Elettronica digitale. Essa comprende il convertitore A/D e quello D/A (a 12 bits), un DSP di limitata potenza di calcolo ed a virgola fissa, una quantità di memoria sufficiente alla gestione di blocchi-dati (di lunghezza massima pari a 4096 campioni a 16 bits) e l'interfaccia digitale al bus di campo.



- Fig. 2.01 -

La versione originale del software impiegato sul DSP suddetto consente la misura del tempo di volo da un trasduttore ad un altro (o anche al generatore stesso, per riflessione sulla parete opposta) mediante la generazione di un segnale sinusoidale a frequenza rapidamente variabile (Chirp), della durata di 10 ms, nel campo di frequenza da 1500 a 4500 Hz, ed utilizzando una frequenza di campionamento tipicamente fissata a 100 kHz.

Del segnale acquisito in ricezione, eventualmente mediato e sottoposto ad una serie di opportune elaborazioni successive, viene infine calcolata la cross-correlazione come antitrasformata della funzione di cross-spettro con il segnale di eccitazione, dalla quale si ricava il tempo di volo del segnale.

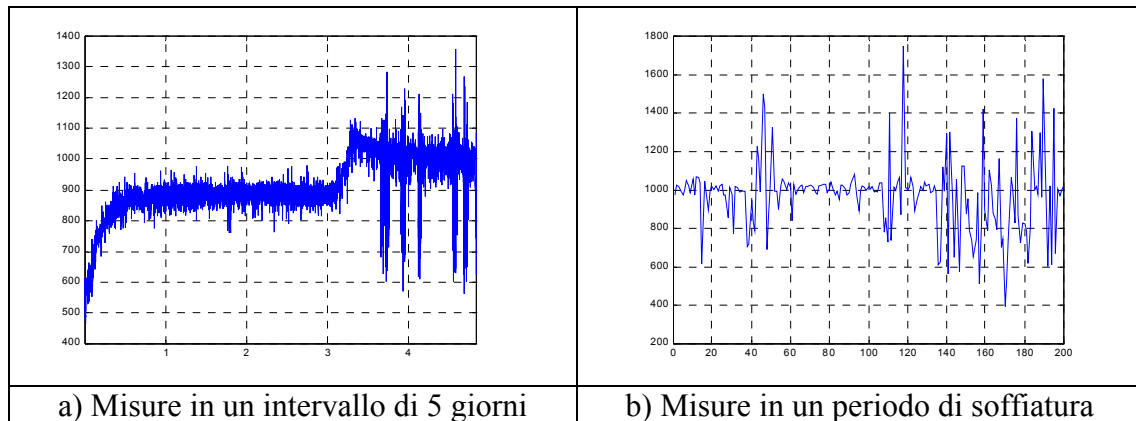
Certamente la caldaia rappresenta, per una misura di tipo sonico, un ambiente alquanto ostile, sia a causa della sua rumorosità, sia in relazione al fatto che il mezzo in cui il suono si trasmette è tempo-variante ed in continua evoluzione in virtù dei fenomeni fisici e chimici che in esso hanno luogo. Si era cercato di ovviare a questi problemi procedendo all'esecuzione di due elementari operazioni:

- mediare i segnali ottenuti nel corso di alcune successive acquisizioni, nell'ipotesi che il rumore estraneo si possa considerare casuale;
- mediare l'esito di alcune successive misure (in termini di temperatura calcolata), così da limitare sia le inevitabili oscillazioni dovute alle imprecisioni sulla determinazione del tempo di volo dell'impulso sonico, sia quelle intrinsecamente associate al fenomeno osservato.

A patto di seguire questa semplice procedura in fase di acquisizione dei dati, era stato possibile ottenere misure di discreta qualità, sufficientemente correlate al carico elettrico prodotto, che è il parametro più direttamente confrontabile con la temperatura in camera di combustione. Ad esempio, in Fig. 2.02 a) è riportato il grafico dell'andamento termico registrato in fase di riavviamento dopo un blocco di caldaia. Per le acquisizioni avvenute in assenza di disturbi, la misura appare dispersa entro un intervallo che non eccede mai i $\pm 50 \div 75^\circ\text{C}$, con una deviazione standard calcolata, ad esempio, sulle temperature registrate il secondo giorno, di 20°C , ovvero l'1.7% della temperatura assoluta media sul periodo considerato.

L'esame della stessa Fig. 2.02 mostra, peraltro, come esistano delle fasi di esercizio durante le quali il sistema fornisce valori in assoluto poco credibili e comunque caratterizzati da una forte dispersione attorno al valor medio. Si tratta delle fasi di "soffiatura" che periodicamente vengono eseguite per rimuovere i residui solidi della combustione dai componenti di impianto. I soffiatori sono numerosi in ogni parte della caldaia ed agiscono frequentemente e con tempi di singola soffiatura anche di 8' e con cicli di soffiatura che complessivamente possono durare anche 90'. Durante le fasi di

attività, ogni coppia di soffiatori eroga oltre 3 kg/s di vapore a circa 20 bar di pressione nella caldaia da 660 MW: si capisce dunque come il rumore prodotto da questi ultimi sia tale da poter disturbare in modo significativo la misura stessa. Un esempio è dato in Fig. 2.02 b), dove sono illustrati i risultati di elaborazioni del valore di temperatura ottenute nel corso di 200 misure consecutive, senza operare medie sul segnale, durante una fase di esercizio con i soffiatori in funzione.



- Fig. 2.02 -

Bisogna accennare al fatto che sulla precisione del valore assoluto di misura pesano alcuni fattori legati alla fisica del problema, quali in particolare i gradienti di temperatura nei fumi in prossimità delle pareti e nei condotti delle guide d'onda, le dilatazioni termiche della caldaia, le incertezze sulla composizione dei fumi. Un buon compendio dei diversi fattori si trova in [3], insieme alle indicazioni per compensare i possibili errori.

3. REVISIONE DELLE TECNICHE DI GENERAZIONE ED ELABORAZIONE DEL SEGNALE

I risultati delle esperienze e delle analisi condotte nel passato e richiamate nei precedenti paragrafi, hanno fornito la motivazione per individuare alternative diverse nella modalità di generazione ed elaborazione del segnale.

Sono state indagate due ipotesi sostanzialmente diverse. La prima era quella di ottimizzare i parametri di acquisizione e di aggiungere alcune funzioni di post-elaborazione sulla stessa base HW del sistema. La seconda era quella di prevedere una diversa architettura del sistema e trasferire tutta la capacità di elaborazione al SW. Questa seconda alternativa ha fornito i risultati migliori ed è stata preferita anche perché offre maggiore facilità di manutenzione e sviluppo del sistema.

Rimuovendo il vincolo di tempi di misura inutilmente stretti, considerati i tempi di risposta del sistema caldaia, si è adottato uno sweep logaritmico relativamente lento della durata di 5 s, con dati acquisiti con frequenza di campionamento di 48 kHz in un range di frequenza da calibrare con prove preliminari su impianto. Lo sweep siffatto produce un'eccitazione con contenuto in frequenza equivalente a rumore rosa.

L'insieme totale dei campioni acquisiti è stato trasformato nel dominio della frequenza per records successivi con overlap del 75%. Ciascuno di questi records di dati è stato filtrato con filtri passabanda a 6 poli, con frequenza centrale di volta in volta centrata su quella del particolare record in esame. La banda passante del filtro è stata fissata compatibilmente con la velocità di sweep, in modo tale da includere le frequenze eccitate nel singolo record e da tener conto del ritardo sul segnale in ricezione rispetto a quello di emissione. In questo modo è stato realizzato un equivalente filtro a

inseguimento digitale, che ha prodotto effetti apprezzabili soprattutto nelle fasi in cui il rapporto segnale/rumore era peggiore (fasi di soffiatura).

La funzione di cross-correlazione ottenuta dopo queste elaborazioni, tende comunque a dare luogo ad una serie di rapide oscillazioni che rendono incerta la corretta determinazione del picco massimo istantaneo. La soluzione matematica a tale problema di instabilità del segnale è fornita dalla trasformata di Hilbert [4]. In particolare, la ricerca del massimo della funzione di cross-correlazione è stata effettuata sul quadrato del modulo della cosiddetta “funzione analitica” calcolata con la trasformata di Hilbert. Il quadrato di questa funzione è sempre positivo, non presenta mai nè oscillazioni, nè passaggi per lo zero ed esalta i picchi. Indipendentemente dunque dal fatto che il tempo di volo vero coincida con uno zero-crossing o con un massimo della forma d’onda originale, il segnale di modulo al quadrato avrà sempre il picco massimo nella posizione corrispondente.

E’ stata poi ulteriormente introdotta la possibilità di determinare il tempo di volo non esattamente sul massimo assoluto della funzione sopra descritta, ma al superamento di un valore di soglia fissato in percentuale del massimo (pretrigger). In tale modo, si seleziona sempre il primo picco importante del segnale, anche allorquando un picco successivo al primo assume un valore leggermente più elevato. Ovviamente con questo secondo metodo, il valore stimato è sempre sistematicamente inferiore rispetto al criterio del massimo assoluto, ma la differenza è trascurabile, data l’acutezza del picco normalmente ottenuto. Per contro si evitano errori macroscopici legati alla presenza di picchi successivi, dovuti a particolari combinazioni di riflessioni.

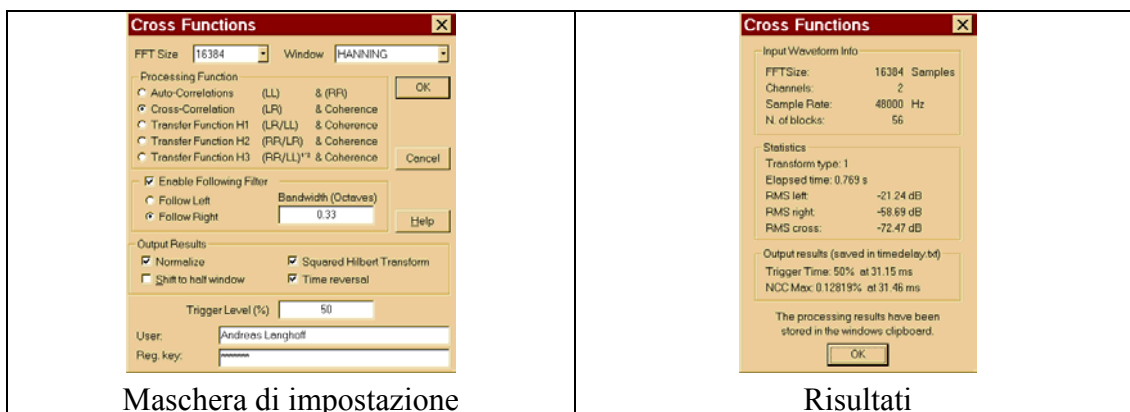
Sono poi in corso di sviluppo e validazione anche altre tecniche di elaborazione, come quella di convoluzione con il filtro inverso per ottenere l’equivalente della risposta all’impulso del sistema [5] o di una diversa modalità di filtro ad inseguimento digitale [6]. Su queste tecniche non si hanno ancora risultati consolidati.

Si aggiunge solo un rapido cenno per dire che è stato anche provato il metodo di misura della risposta impulsiva con la tecnica MLS (Maximum Length Sequence) [7], che ha fornito però risultati inutilizzabili ed è quindi stato scartato. La pessima prestazione della tecnica MLS è peraltro perfettamente giustificata, in quanto è noto che tale metodo funziona solo in sistemi perfettamente lineari e tempo-invarianti, mentre la propagazione nella camera di combustione subisce continue ed importanti fluttuazioni.

4. PIATTAFORMA SOFTWARE

La tecnica di elaborazione del segnale su descritta è stata implementata per via puramente software, utilizzando come base l’eccellente editor di forme d’onda CoolEditPro. Esso già dispone delle funzioni atte alla generazione del segnale di eccitazione, ed all’esecuzione della emissione e campionamento sincroni delle forme d’onda.

E’ stato necessario sviluppare un apposito modulo addizionale (“plug-in”) per CoolEdit, che implementa le funzioni di cross-correlazione, filtro inseguitore, trasformata di Hilbert e ricerca del fronte di salita del picco. La figura 4.01 mostra l’interfaccia utente di tale modulo software, nella fase di impostazione dei parametri di elaborazione, e nella successiva fase di compendio dei risultati. Il valore del tempo di volo viene automaticamente salvato in coda ad un file di testo (timedelay.txt), mentre nella “clipboard” di Windows viene caricato il risultato della elaborazione (profilo temporale del quadrato della funzione analitica), utile per la successiva visualizzazione grafica, ottenibile direttamente entro il programma CoolEditPro.



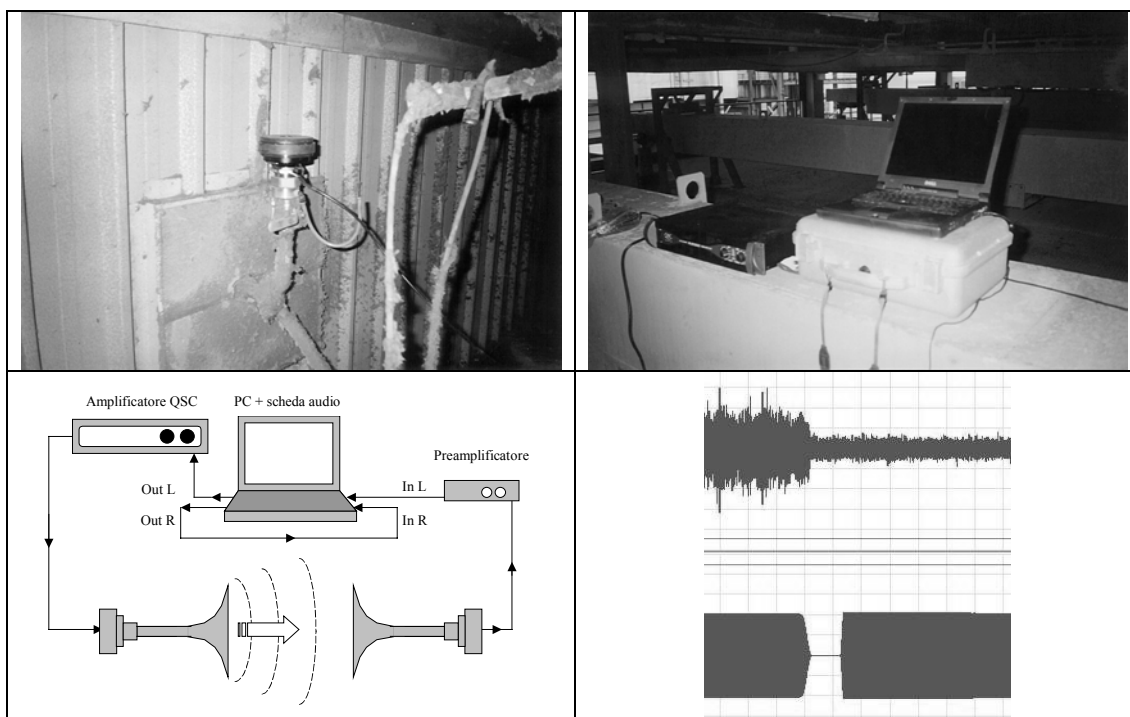
- Fig. 4.01 -

5. RISULTATI SPERIMENTALI

La sperimentazione su impianto è stata effettuata servendosi dei sistemi strumentali elettroacustici di emissione e ricezione e delle guide d'onda già installati sulla caldaia di un impianto a turbogeneratore a vapore da 660 MW. Detti sistemi sono stati tuttavia alimentati e guidati in maniera del tutto indipendente dal sistema T-Sonic; analogamente le acquisizioni ed elaborazioni dei dati sono state condotte con sistemi HW e SW del tutto indipendenti.

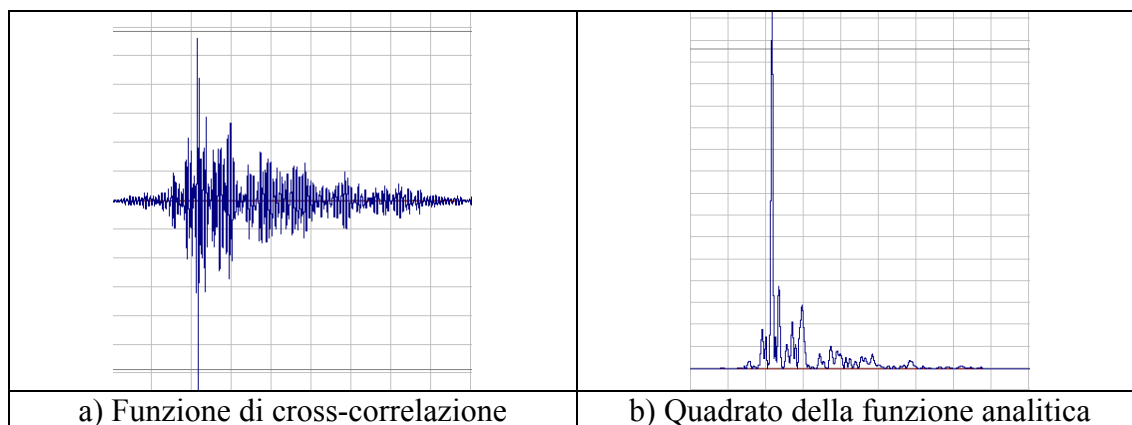
In Fig. 5.01 è illustrata l'attrezzatura sperimentale di misura su impianto ed il relativo schema di principio.

Nella stessa figura è anche riportata una registrazione dei segnali captati (traccia in alto) e dei pacchetti di segnale emessi in corrispondenza (traccia più in basso). La registrazione è stata effettuata nel momento in cui si è passati da una fase di esercizio con i soffiatori in azione a quella senza soffiatura. Si evidenzia come il rumore di fondo in fase di soffiatura è almeno due o tre volte più alto che nella fase successiva. Comunque in entrambi i casi il segnale utile risulta sommerso dal rumore.



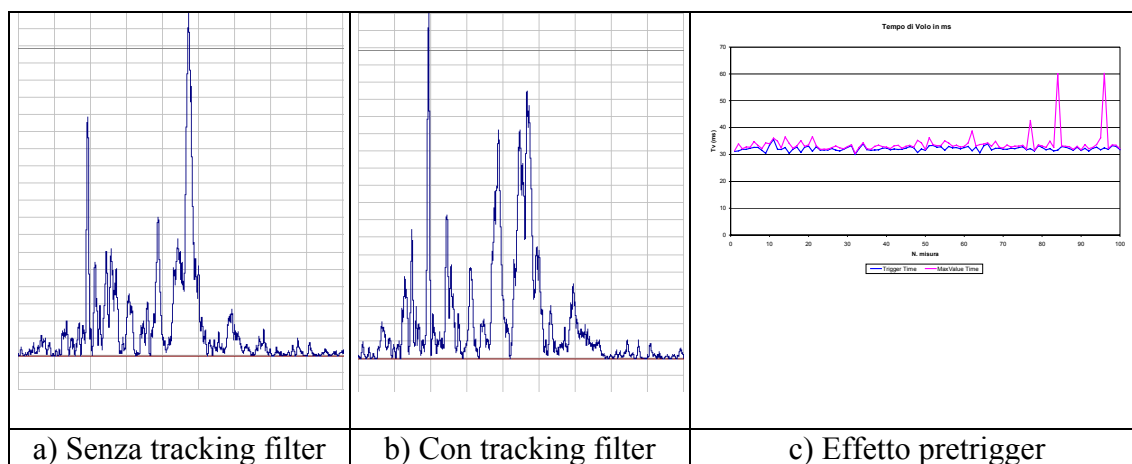
- Fig. 5.01 -

In Fig. 5.02 sono invece documentati i grafici tipicamente ottenuti come funzione di cross-correlazione e come quadrato della funzione analitica della trasformata di Hilbert, da cui risulta evidente come con questo tipo di post-elaborazione la ricerca del picco della funzione di cross-correlazione e, conseguentemente, l'individuazione del tempo di volo siano notevolmente semplificate.



- Fig. 5.02 -

La Fig. 5.03 mostra invece l'effetto dell'applicazione del filtro a inseguimento digitale ad una delle misure più problematiche, effettuata con soffiatori in azione. In questo caso l'applicazione del filtro ha risolto l'ambiguità di scelta tra il primo picco elevato ed il picco di massimo, ripristinando la coincidenza tra i due picchi.



- Fig. 4.03 -

Infine, nella stessa figura, il terzo grafico documenta l'effetto della introduzione di un pretrigger sulla ricerca del massimo. Le stime di tempo di volo sono riferite a 100 misure effettuate nell'arco di 6 minuti con i soffiatori in funzione. Si osserva che l'applicazione del pretrigger consente di riportare al valore corretto alcune misure altrimenti errate e, nel contempo, riduce la varianza della misura.

6. CONCLUSIONI

Sono state sperimentate con successo nuove metodologie di analisi del segnale per il miglioramento delle prestazioni di un sistema di stima della temperatura in caldaia, originariamente sviluppato da CESI e denominato T-Sonic. La stima è basata sulla misura del tempo di volo di un segnale acustico ed è condotta con tecniche di cross-correlazione.

Nell'articolo è stato illustrato in un certo dettaglio e documentato con risultati ottenuti su impianto come l'adeguamento dei parametri di emissione e ricezione del segnale, l'introduzione di un originale metodologia digitale di filtraggio a inseguimento dei segnali, l'applicazione della trasformata di Hilbert alla funzione di cross-correlazione e l'introduzione di un opportuno pretrigger sul riconoscimento del massimo della funzione risultante abbiano sensibilmente migliorato la qualità e la stabilità dei risultati di misura. E' stato possibile evidenziare il vantaggio ottenuto dalla introduzione di ciascuno di questi provvedimenti.

Nel previsto ulteriore sviluppo di questa tecnica, si intendono approfondire ulteriormente alcuni aspetti di elaborazione del segnale, anche per avere eventualmente la possibilità di confrontare risultati ottenuti con tecniche diverse, e parallelamente si vuole affrontare anche il problema di sviluppare guide d'onda più compatte e tali da semplificare le problematiche di installazione, esercizio e manutenzione su impianto del sistema strumentale. Ciò è reso possibile dai margini ottenuti in fase di elaborazione del segnale che sono tali da poter ammettere una certa perdita di efficienza delle guide.

RINGRAZIAMENTI

L'attività è stata condotta nell'ambito della Ricerca di Sistema finanziata dal Ministero per l'Industria, il Commercio e l'Artigianato.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Provasi, G.A. Zanetta, "Analisi ad elementi finiti di modelli alternativi di corni acustici per misure di temperatura con metodi sonici", Rapporto Finale CESI, A0/041831, Dicembre 2000
- [2] A.Cavaliere, L.Gregori, G.A.Zanetta, "Cicli a vapore innovativi. Metodologie di monitoraggio e diagnostica: risultati preliminari degli studi sulle tecniche di eccitazione ed elaborazione di segnali acustici utilizzati per la determinazione di mappe termiche in camera di combustione", Rapporto Intermedio CESI, A0/021437, Luglio 2001
- [3] J.A.Kleppe, "Engineering Applications of Acoustics", Artech House Inc., Boston/London, ISBN: 0-89006-260-9, 1989
- [4] J.S.Bendat, A.G.Piersol "Random data (2nd Edition)", John Wiley & Sons, 1986
- [5] A. Farina – "Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-sine Technique" - 108th AES Convention, Paris 18-22 February 2000
- [6] H.Vold, J.Leuridan, "High Resolution Order Tracking at extreme Slew Rates, Using Kalman Tracking Filters", Proc. of the Noise & Vibration Conf., Traverse City, Michigan, USA, May 10÷13, 1993
- [7] W.T.Chu "A deterministic broad-band signal for acoustic measurements", Inter-Noise 87, 1199-1202