

Tecniche avanzate di misura di temperatura in impianti turbogas

Gianinoni, G.L. Lapini
CESI RICERCA, via Rubattino 54, 20134 Milano

Negli impianti turbogas per la produzione di energia elettrica, la disponibilità di informazioni in linea sulla temperatura dei gas caldi in ingresso alla turbina e sulla temperatura in esercizio delle palette consentirebbe di ottimizzare le diverse fasi di sviluppo, messa a punto e gestione della turbina a gas, aumentandone l'efficienza senza raggiungere il limite di stress termico dei materiali e dei rivestimenti. A questo scopo, è necessaria strumentazione avanzata, accurata e affidabile su lungo periodo.

A causa delle condizioni operative particolarmente ostili, strumentazione idonea per applicazioni in linea è da poco tempo disponibile o in fase di sviluppo e richiede ancora una fase di validazione su macchine in esercizio.

In questo lavoro saranno discussi i risultati relativi alla messa a punto ed alla sperimentazione in campo di un pirometro ottico per la misura della temperatura del metallo delle palette e di due sensori per la misura della temperatura dei gas in ingresso alla turbina (TIT).

Il pirometro ottico è stato a lungo sperimentato su una turbina a gas industriale da circa 100 MW in normale esercizio.

Un termometro a fibra ottica per la misura della TIT, dotato di un elemento sensibile da inserire nel flusso dei gas caldi, è stato sperimentato su due test rig che simulano le condizioni dei gas in ingresso a turbogas industriali; ne è stata inoltre studiata la modalità di installazione in "retro-fit" su una macchina in normale esercizio.

Per la misura della TIT è stato sviluppato un sensore innovativo che non richiede l'inserimento di nessun elemento sensibile nel flusso gassoso, basato sulla misura della radiazione emessa dai gas caldi su una banda di CO₂ nell'infrarosso. Nei test su un banco prova combustori il prototipo ha mostrato una sensibilità sufficiente per seguire le fluttuazioni dei gas di combustione, fornendo risultati incoraggianti per una ulteriore fase di sviluppo e prova.

CONSIDERAZIONI GENERALI

L'utilizzo sempre più frequente di turbine a gas "heavy duty" nel settore della produzione di energia elettrica è fortemente stimolato dall'elevata efficienza che queste macchine riescono ad ottenere in ciclo combinato. Tale risultato è stato raggiunto, fra l'altro, con un progressivo incremento della temperatura di ingresso dei gas in turbina (TIT): si è infatti passati da temperature di circa 1100 °C per macchine progettate nella metà degli anni '80, a valori di 1250-1300 °C per le macchine attualmente più diffuse (progettate verso la metà degli anni '90) e l'evoluzione tecnologica porterà entro il decennio in corso a valori di TIT di 1450-1500 °C, con un incremento previsto di circa 12.5 °C/anno.

La TIT rappresenta un parametro essenziale per il controllo termodinamico, per il buon funzionamento e per la vita operativa di una turbina a gas. Nonostante ciò, su macchine in normale esercizio tale temperatura non viene misurata in modo diretto, ma viene calcolata con opportuni algoritmi a partire dalla temperatura dei gas misurata nel condotto di scarico, dove i valori tipici sono dell'ordine di 550-600 °C ed è possibile utilizzare senza problemi le normali termocoppie. La mancanza del monitoraggio in continuo di questo parametro è legata alla difficoltà tecnologica di realizzare un sistema di misura di costo ragionevole, affidabile su lunghi periodi senza necessità di manutenzioni e ricalibrazioni, nell'ambiente molto ostile ed aggressivo (anche per le elevate velocità di flusso) all'ingresso dei gas in turbina.

Parallelamente alla TIT, i materiali utilizzati per la realizzazione delle pale della turbina hanno subito un analogo processo evolutivo: sulla base di dati storici, la crescita della temperatura operativa dei materiali è stata di circa 5 °C/anno ma, data la differenza con l'aumento della TIT, è stato necessario migliorare anche i processi di raffreddamento delle pale utilizzando modalità di protezione e di asportazione del calore sempre più sofisticate. L'aumento di efficienza, e quindi di importanza, dei sistemi di raffreddamento ha comportato che questi diventassero anche più sensibili a perturbazioni esterne, con la conseguenza che eventuali leggere alterazioni nel corso dell'esercizio della macchina possano provocare conseguenze critiche sulle temperature di lavoro delle pale e quindi sulla durata ed integrità delle stesse.

Di qui nasce l'esigenza della diagnosi precoce di eventuali anomalie di funzionamento o di alterazioni del sistema di raffreddamento (specialmente quelle del primo stadio di turbina) mediante la misura della temperatura del metallo delle palette.

Tale rilievo è inoltre assai utile nel caso in cui gli esercenti degli impianti vogliano implementare i cosiddetti "programmi di calcolo della vita residua della palettatura" (LMS, Life Management Systems) volti ad ottimizzare l'utilizzo delle macchine ed i cicli di manutenzione, in quanto permette la verifica diretta e la calibrazione dei modelli di calcolo con cui si valutano gli effetti di fatica termomeccanica durante la vita operativa, in particolare nel corso dei transitori di avviamento e arresto.

In sostanza, la possibilità di controllare in linea la temperatura TIT dei gas e quella del metallo delle palette consentirebbe di ottimizzare la gestione degli impianti turbogas, migliorandone l'efficienza e la vita utile, senza raggiungere i limiti di stress termico dei materiali e dei rivestimenti.

A questo scopo CESI RICERCA ha condotto la messa a punto di due differenti tecniche di misura della TIT e la sperimentazione in campo di un sistema ottico-pirometrico per la misura della temperatura del metallo delle palette.

I risultati di tali attività costituiscono l'oggetto del presente articolo.

TECNICHE DI MISURA DELLA TIT

Come si è accennato, la misura della temperatura dei gas in ingresso alla turbina presenta notevoli problemi tecnologici, dovuti non tanto alla mancanza di sensori primari, quanto alla difficoltà di garantirne la durata e la stabilità di misura per lunghi periodi di tempo¹.

Per tale motivo CESI RICERCA ha condotto la sperimentazione di due differenti tecniche di misura della TIT:

- la prima, che richiede di inserire un elemento inerte di modeste dimensioni² nel flusso dei gas caldi, è basata su una fibra ottica per altissima temperatura (zaffiro) che raccoglie l'emissione infrarossa della punta dell'elemento inerte, trasformandola in un segnale elettrico tramite un fotosensore in maniera analoga a quanto si fa nei sistemi pirometrici³; questa tecnica dovrebbe garantire una stabilità della misura di temperatura nel tempo assai migliore di quella ottenibile con le termocoppie;
- la seconda, che presenta il vantaggio di non richiedere l'inserimento di alcun oggetto nel flusso dei gas, è basata sulla misura della radiazione emessa dai gas caldi in una banda di emissione della CO₂ nell'infrarosso.

Sensori a fibra ottica

Lo sviluppo della tecnica di misura a fibra ottica è stata condotta da CESI RICERCA avvalendosi della collaborazione di una azienda statunitense (Conax Buffalo) che produce dispositivi di misura della temperatura basati su tale metodologia, utilizzati con successo in vari processi industriali (metallurgia, industria del vetro, ecc.).



Fig. 1 - Sensore a fibra ottica montato su banco prova.

CESI RICERCA ha curato in particolare l'adattamento della tecnica alle specifiche esigenze di utilizzo sulle turbine a gas e, preliminarmente ad una applicazione su impianto, ha condotto una sperimentazione volta a verificare le prestazioni dei sensori su banchi prova per componenti di turbina a gas, in grado di riprodurre condizioni di temperatura e di flusso dei gas simili a quelle delle macchine reali. Si è inoltre studiata la possibilità di installare i sensori tramite

¹ Nelle fasi di sviluppo e messa punto di nuove turbine a gas è usuale l'installazione di numerosi sensori (termocoppie) per caratterizzare i profili di temperatura dei gas in ingresso alla turbina; si ricorre in questo caso a sistemi speciali di montaggio, a materiali sofisticati, ad eventuali sistemi parziali di raffreddamento. Questi dispositivi sono in genere adatti a funzionare per periodi limitati, e non sarebbero di pratico utilizzo per il monitoraggio continuo delle macchine.

² Si tratta di qualcosa di non molto diverso dalle guaine di protezione che si utilizzano per il montaggio delle termocoppie.

³ La fibra ottica di zaffiro, in grado di sopportare temperature di oltre 1600°C, è utilizzata solo all'interno del sensore; all'esterno del sensore la radiazione infrarossa è convogliata fino al fotosensore tramite una fibra ottica "normale", in grado di sostenere temperature dell'ordine dei 200°C.

penetrazioni già esistenti sulle macchine, adattando la forma dei sensori alle specifiche esigenze meccaniche di montaggio.

La figura 1 mostra il primo prototipo del sensore montato su un banco prova combustori, dove è stato sottoposto ad un primo ciclo di prove. Tali prove ed altre effettuate su un secondo tipo di banco hanno permesso di verificare la validità della tecnologia, suggerendo nel contempo alcune modifiche ed irrobustimenti del sensore prima di ulteriori prove su macchine in normale esercizio. In particolare, il materiale inizialmente scelto per la realizzazione della “punta” della sonda, destinata ad essere immersa nel flusso dei gas, si è dimostrato ottimo quanto a resistenza alla temperatura ma non sufficientemente duttile per il montaggio in un ambiente caratterizzato da urti e sollecitazioni dinamiche. Il progetto del sensore è stato quindi modificato adottando un materiale di caratteristiche termiche leggermente inferiori, ma di migliore duttilità a caldo ed a freddo. Nel contempo si è proceduto anche ad un irrobustimento del cavo ottico del sensore e ad una modifica della configurazione elettronica, inserendo il modulo di condizionamento sul cavo ottico stesso, in modo che all’estremità fosse disponibile in uscita un segnale elettrico standard 4-20 mA.

Nella fase di revisione del progetto si è inoltre studiata una configurazione meccanica del sensore atta a consentirne il montaggio in penetrazioni già esistenti sulla turbina a gas sulla quale si è programmato di svolgere il secondo ciclo di prove durante il normale esercizio.

Il disegno della figura 2 mostra una delle due configurazioni meccaniche appositamente studiate, mentre nella figura 3 è riportata una fotografia del sensore dopo la sua costruzione. Sulla destra della figura 2 si osservi, in particolare, uno spaccato della punta (cava) del sensore, all’interno della quale è visibile la fibra ottica di zaffiro e la guida che la sostiene.

Infine nella figura 4 è mostrato lo studio per il montaggio di una coppia di questi sensori di temperatura a monte ed a valle delle palette mobili del primo stadio di una turbina a gas Nuovo Pignone MS9001E da 110 MW. Si utilizzano in questo caso penetrazioni

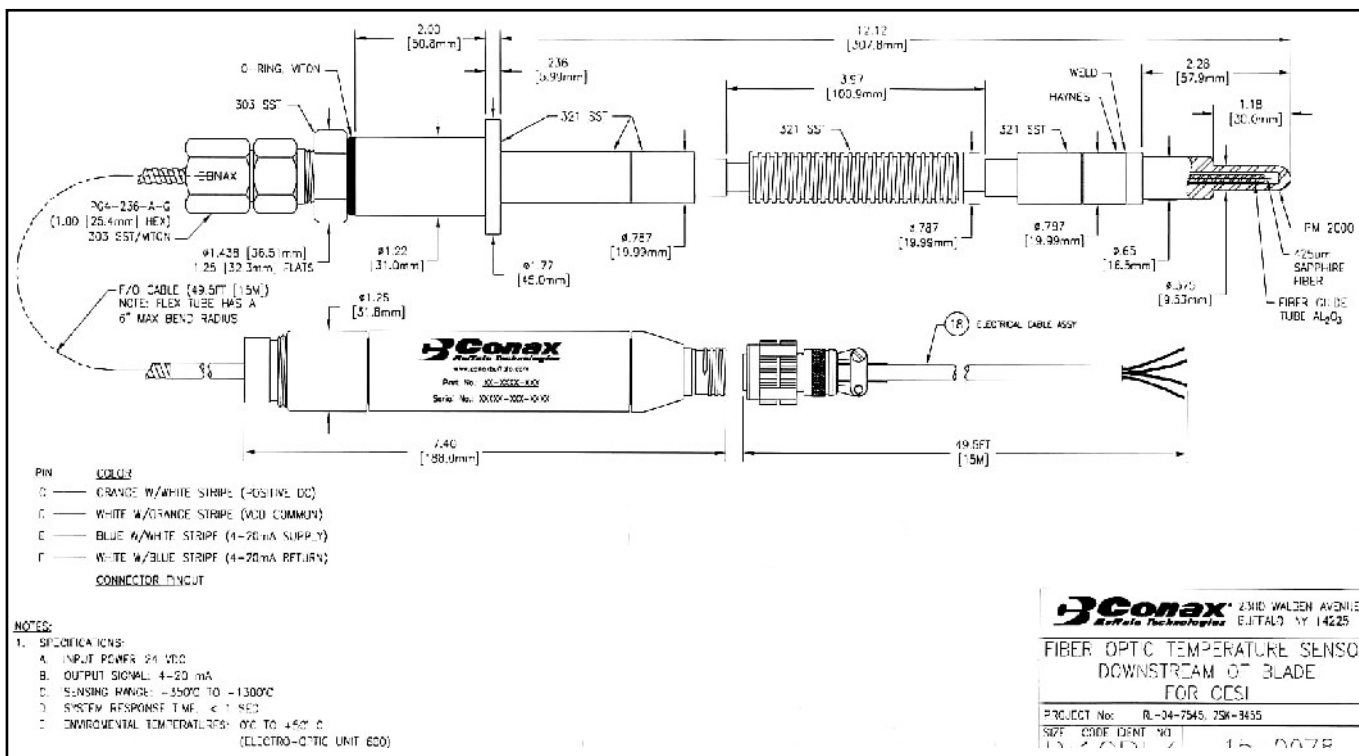




Fig. 3 – Sensore a fibra, come realizzato.

Fig. 2 - Disegno di ingegnerizzazione

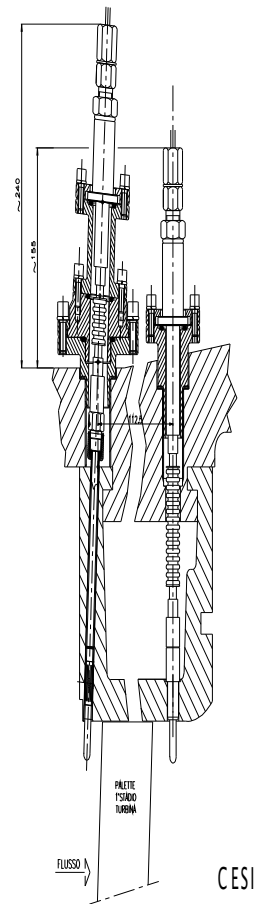


Fig. 4 - Montaggio per due sensori.

finale del sensore a fibra ottica.

endoscopiche esistenti sulla cassa esterna della turbina, realizzando appositi adattatori di guida e fissaggio dei sensori. Alla data di stesura del presente articolo non è stato ancora possibile effettuare la prova su impianto dei sensori in oggetto. I risultati della prova saranno oggetto di successive pubblicazioni.

Sensore ottico per misura della TIT

Per svincolarsi dalla necessità di inserire un elemento sensibile nel flusso di gas caldi è stato sviluppato da CESI RICERCA il prototipo di un sensore innovativo non intrusivo che raccoglie la radiazione emessa dai gas di combustione tramite un sistema ottico che “guarda” il flusso attraverso un accesso ottico. Le misure fotometriche di emissione dei gas sono effettuate dal sensore su una banda di CO₂ nell’infrarosso. All’uscita dei combustori di una macchina turbogas, in condizioni stazionarie i gas si trovano ad una pressione di 15-18 bar e possono raggiungere temperature di 1600-1700 K. A seconda del tipo di macchina e della forma dei “tubi di transizione” che collegano i combustori con la turbina, la corrente di gas caldo può avere una dimensione variabile da circa 10 a 40 cm. Per poter seguire in modo significativo le fluttuazioni di temperatura dei gas, la misura deve essere ottenibile con una precisione di ±10 K ad una frequenza di ripetizione di 1-10 Hz.

La tecnica di fotometrico, pirometria in (o metodo di utilizzata in reagenti con riflettività trascurabile [1]. La grandezza di misura è l'irradianza di corpo grigio o di riga spettrale, che è definita dal prodotto delle due funzioni:

$$W_B(\lambda, T) \cdot \Delta\lambda = \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{C_1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \cdot \Delta\lambda$$

misura adottata è di tipo estensione della emissione-assorbimento Planck-Kirchhoff), già miscele gassose non

$$H(\lambda, T) = W_B(\lambda, T) \cdot Abs(\lambda, T)$$

dove $W_B(\lambda, T)$ è l'irradianza di corpo nero (su un angolo emisferico di 2π) e $Abs(\lambda, T)$ è l'assorbimento del corpo grigio o della riga.

Nell'ipotesi che il gas da misurare possa essere assimilabile ad un corpo nero l'irradianza di corpo grigio dipende solo da $W_B(\lambda, T)$, data dalla legge di Planck:

$$[W/m^2]$$

(dove $C_1 = 3.74 \times 10^{-16}$ [J m²/s], $C_2 = 1.44 \times 10^{-2}$ [m K] e $\Delta\lambda$ è l'intervallo spettrale di lavoro), che risulta così il fattore che determina la dipendenza dalla temperatura e quindi l'accuratezza di misura.

Per ottenere questa condizione, è necessario selezionare un intervallo spettrale (ad esempio mediante il database HITRAN [2]) in cui il gas caldo, ovvero le molecole attive di anidride carbonica, presentino simultaneamente un elevato assorbimento di radiazione IR lungo il percorso ottico (per evitare contributi radiativi dalla parete del condotto convogliatore dei gas) ed una sufficiente trasparenza alla radiazione emessa, affinché possa attraversare una porzione significativa della regione dei gas caldi. Considerando le condizioni di lavoro tipiche dei turbogas è stato individuato un intervallo spettrale di 8-10 nm ($\sim 4-5$ cm⁻¹) intorno a 4461 nm.

Lo schema di principio del prototipo del sistema di misura è riportato nella figura 5, dove è mostrato in una configurazione meccanica adatta per l'installazione su un banco prova combustori in pressione. Il sistema è costituito da tre sottosistemi principali: la sonda ottica, interfacciata con il combustore, l'unità di rivelazione, alla quale è convogliato mediante fibra ottica il segnale generato dal gas, l'unità di acquisizione ed analisi dei dati. La sonda ottica, costituita da una lente in ZnSe protetta da una finestra ottica, è interfacciata con il combustore mediante un tubo in acciaio, raffreddato e mantenuto in leggera sovrappressione mediante flusso d'aria, inserito attraverso la cassa esterna del banco prova fino a lambire il flusso di gas caldi. Una fibra ottica in alogenuri d'argento posta su un microposizionatore raccoglie la radiazione e la trasporta verso l'apparato di rivelazione, montato all'interno di un box metallico (Fig. 6). Qui la radiazione è dapprima collimata, quindi filtrata mediante un filtro interferenziale ($\lambda_c=4461$ nm, FWHM=10 nm) ed infine focalizzata su di un rivelatore IR foto-conduttivo in PbSe con superficie attiva di 0.5×0.5 mm². Un chopper meccanico è posizionato in prossimità della terminazione della fibra

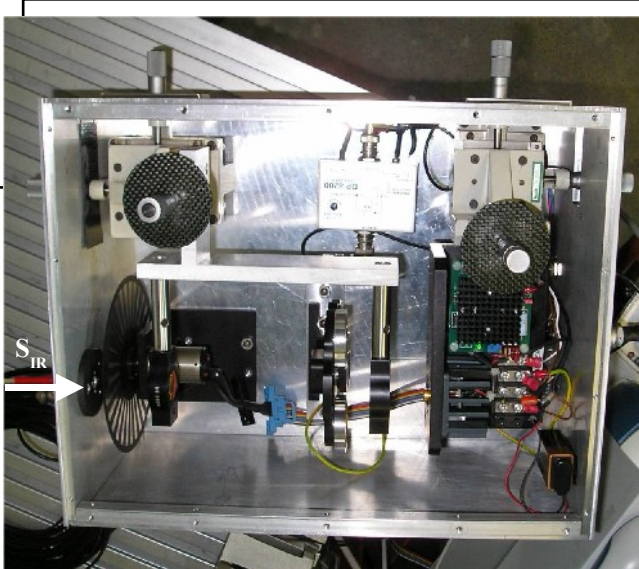


Fig. 6 - Apparato di rivelazione.

Fig. 5 - Schema del sensore ottico per misura della TIT.

ottica all'ingresso. Il segnale del rivelatore viene amplificato ed inviato all'unità di acquisizione ed analisi dei dati, composta da una scheda di acquisizione a 16 bit da 20 kS/s collegata con PC.

Il software acquisisce il segnale pre-amplificato del sensore, estrae un valore medio e registra i dati rilevati. Simultaneamente acquisisce e registra valori di temperatura misurati da termocouple di controllo.

Dopo una serie di prove preliminari in laboratorio volte a verificare la dipendenza del segnale IR dalla temperatura, nonché la ripetibilità e la sensibilità di misura del sistema [3], il sensore TIT è stato installato su un banco prova combustori a piena pressione (Fig. 7), sul quale ha funzionato nel corso di alcuni cicli di prova di un combustore.

Nella figura 8 è mostrato un tipico esempio delle misure ottenute durante uno di tali test. La curva 1) rappresenta l'andamento del segnale mediato (in mV) misurato dal sistema TIT. Gli altri parametri riportati sono forniti dal sistema di controllo del banco prova e rappresentano rispettivamente: la pressione all'interno della camera di combustione (2), la concentrazione di CO₂ (3) e la temperatura adiabatica calcolata (4).

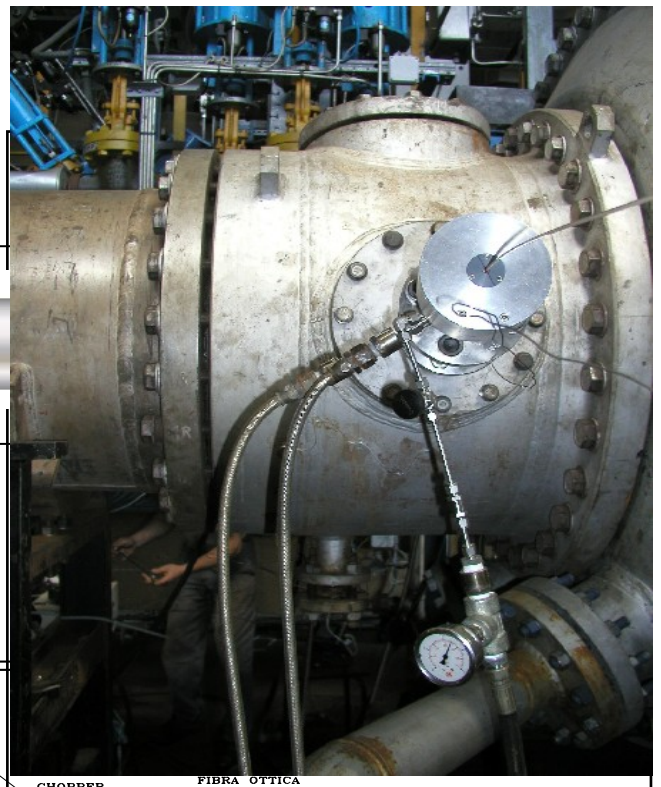
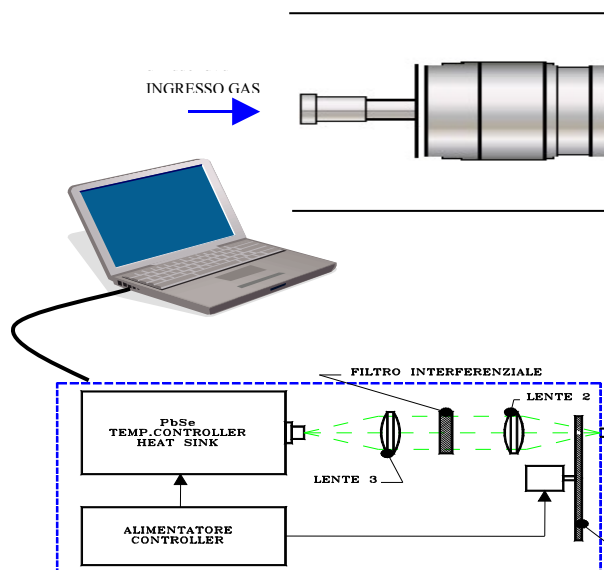


Fig. 7 - Sonda installata sul banco prova.

Quest'ultima grandezza è quella con cui può essere confrontato il valore misurato dal sensore TIT. Il periodo di misura precedente

alla prima linea tratteggiata non viene considerato, in quanto corrisponde alla fase di accensione del combustore in cui i parametri di processo sono instabili; lo stesso vale per il periodo posteriore alla seconda linea, in cui si è verificata una situazione di instabilità del combustore. Nell'intervallo tra le linee tratteggiate, in cui la pressione si è mantenuta stabile all'interno della camera di combustione, si può notare che il segnale TIT è molto ben correlato con la temperatura adiabatica. In questo intervallo è anche evidente un significativo gradiente termico, che è stato ben rivelato dal sensore TIT e da cui è possibile stimare una sensibilità di misura dell'ordine dei ± 10 K richiesti.

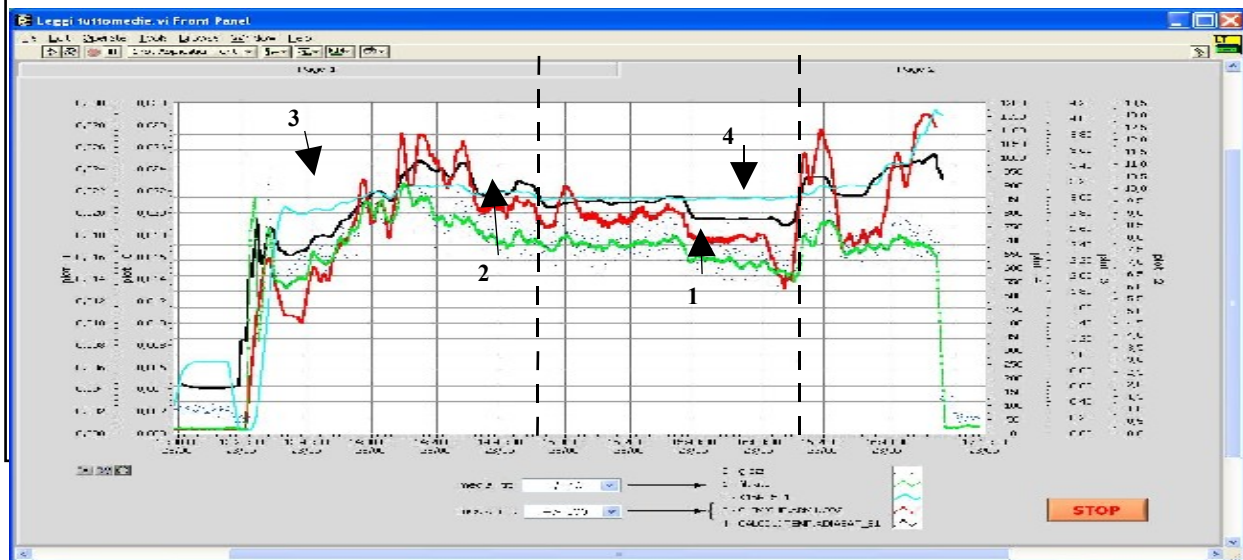


Figura 8 - Misura in continua con il sensore ottico sul banco prova in pressione.

INSTALLAZIONE E GESTIONE DI UN SISTEMA OTTICO-PIROMETRICO

Per la misura diretta della temperatura delle palette mobili di una turbina, viste le elevate temperature in gioco e la necessità di effettuare una misura senza contatto, l'unico strumento applicabile è un sistema ottico-pirometrico, che misura l'energia irradiata nel campo dell'infrarosso dalla superficie delle pale, la quale è correlata alla temperatura secondo la legge di Planck. La tecnologia dei pirometri è consolidata, largamente usata in vari campi industriali (ad esempio nella metallurgia), e permette di adattare abbastanza facilmente gli apparati strumentali alle varie esigenze di misura. In particolare, nel caso delle turbine, scegliendo opportunamente il campo di frequenza di lavoro del fotodiode di rivelazione, i gas caldi risultano praticamente trasparenti alla radiazione di interesse, permettendo di misurare senza apprezzabile disturbo da parte dei gas stessi la temperatura del metallo delle palette rotanti. L'utilizzo di più pirometri, abbinati a dispositivi ottico-meccanici di orientamento per poter analizzare l'intera superficie delle palette, è comune nelle fasi di sviluppo e messa a punto di nuove macchine. Tali applicazioni sono peraltro assai complesse e richiedono un'assistenza assidua da parte del personale che svolge i test. Ben diverso è il caso in cui lo strumento debba essere utilizzato in maniera continuativa ed affidabile, durante il normale esercizio delle macchine in una centrale elettrica, che prevede migliaia di ore di funzionamento senza fermate o interventi manutentivi.

In questo senso l'esperienza condotta da CESI RICERCA è stata rivolta non tanto allo sviluppo di nuovi strumenti rispetto a quelli (sebbene poco diffusi) disponibili sul mercato, quanto ad una verifica operativa delle esigenze e modalità della loro installazione e gestione, nonché della loro affidabilità nel tempo. In particolare, CESI RICERCA ha curato tutte le fasi del processo di utilizzo dello strumento, a partire dal progetto meccanico di installazione, durante il quale sono state definite le penetrazioni necessarie a ricavare nella cassa della macchina un "cammino ottico" attraverso cui osservare le palette in movimento⁴, fino al montaggio e gestione dello strumento in impianto.

⁴ Il "cammino ottico" è una foratura che penetra verso l'interno della macchina, opportunamente orientata in modo da poter osservare la zona voluta della schiera di palette del primo stadio della turbina. L'orientamento del pirometro è fisso, la direzione di misura è all'incirca radiale ed è quindi possibile osservare una piccola parte delle superficie delle pale. Tale foratura viene raccordata con un opportuno adattatore esterno flangiato, sul quale si collega la finestra ottica, un elemento che garantisce sia la tenuta alla pressione interna dei gas, sia il passaggio della radiazione infrarossa emessa dalle palette rotanti.

L'installazione del sistema pirometrico è stata effettuata su una turbina a gas Nuovo Pignone MS 9001E da circa 110 MW, inserita in un ciclo ripotenziato a vapore. Come si vede in figura 9, il sistema strumentale (di produzione LAND INFRARED) è formato da:

- un “termometro” (non a contatto) costituito da una testa ottica, collegata mediante un cavo a fibra ottica ad un condizionatore di segnale che fornisce in uscita segnali lineari (4÷20 mA) proporzionali ai profili di temperatura ed alla media delle temperature delle palette, nonché ai picchi ed alla media dei picchi di temperatura;
- un sistema di acquisizione dei dati, basato su una scheda veloce di conversione A/D ed un PC industriale, che memorizza i dati raccolti e fornisce in linea i parametri di misura.

Grazie all’ottima risposta in frequenza del fotodiodo e dell’intera catena elettronica, il sistema di misura è in grado di acquisire molti punti di misura della temperatura durante il passaggio delle singole palette; esso esegue infatti circa 3000 letture al giro (equivalenti a 33 letture per paletta), perfettamente sincronizzate con la rotazione tramite un segnale di trigger fornito da un keyphasor (segnale 1x giro).

Le caratteristiche principali del sistema sono le seguenti:

- campo di misura: 650÷1100 °C
- output: 4÷20 mA nel campo di misura
- accuratezza: ± 2 °C
- risoluzione: ± 0.2 °C
- limiti di temperatura ambiente: [350 °C per la testa ottica
[350 °C per la fibra ottica (terminale caldo)
- 30÷70 °C per il condizionatore di segnale
- deriva nel tempo: < 0.5 °C
- alimentazione: ± 18÷30 VDC a 175 mA max
- numero di campionamenti per giro 3000 tipici

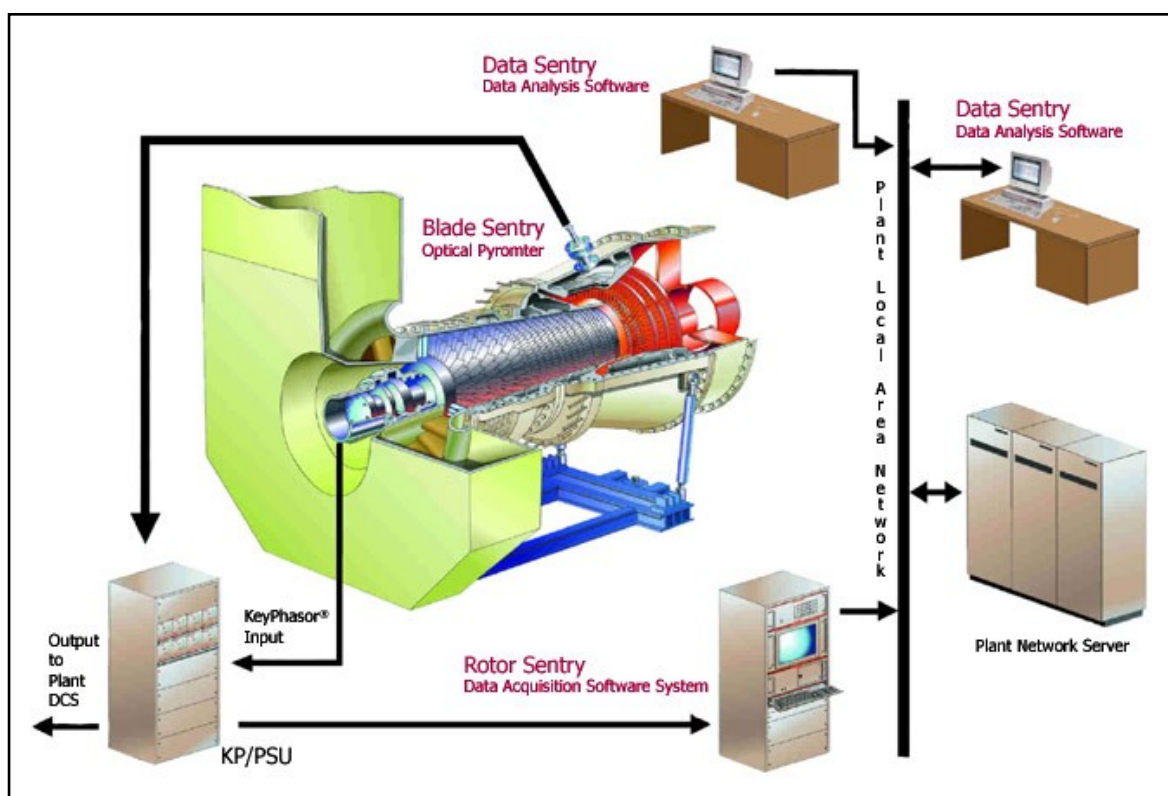


Fig. 9 - Schema del sistema pirometrico per turbogas.

Conseguentemente al tipo di installazione adottata, che prevede la collocazione della finestra e della testa ottica esternamente alla cassa della turbina (disposizione necessaria per applicazioni che prevedono l'utilizzo dello stesso per lunghi periodi) l'area focalizzata dalla testa ottica sulla paletta ed interessata alla misura di temperatura corrisponde ad uno spot di circa 6 mm di diametro.

L'installazione del sistema è stata effettuata in occasione di una revisione generale della turbina, durante la quale è stato possibile eseguire le lavorazioni meccaniche per realizzare



Fig. 10 - Finestra ottica e testa del pirometro.

la penetrazione nell'involucro esterno della macchina. La Fig. 10 mostra un dettaglio della finestra ottica e della testa sensibile del pirometro montate sulla cassa esterna della turbina.

I dati raccolti nel primo semestre di funzionamento del sistema hanno permesso di verificare la correttezza dell'installazione e di effettuare un primo positivo test di affidabilità del sistema stesso. La sperimentazione è poi proseguita per ulteriori dodici mesi in modo da verificare che la stabilità di misura e la risposta del sistema si mantenessero inalterate nel tempo, e che non fosse necessario effettuare operazioni periodiche di manutenzione dello strumento, quali la pulizia della finestra o la ricalibrazione del sensore, a cadenza superiore a una volta all'anno.

Un esempio dei dati raccolti dal sistema in un periodo di funzionamento della turbina a gas di circa un mese è riportato nella figura 11. Nel grafico sono presentate la temperatura

media delle palette del primo stadio (su questa macchina in numero di 92), le temperature di picco e la media delle temperature di picco.

Come si può intuire da questi andamenti, la macchina ha avuto un funzionamento piuttosto discontinuo, con avvii e arresti giornalieri, funzionamenti a carico parziale, soste nei fine settimana. Si può osservare comunque che le temperature medie

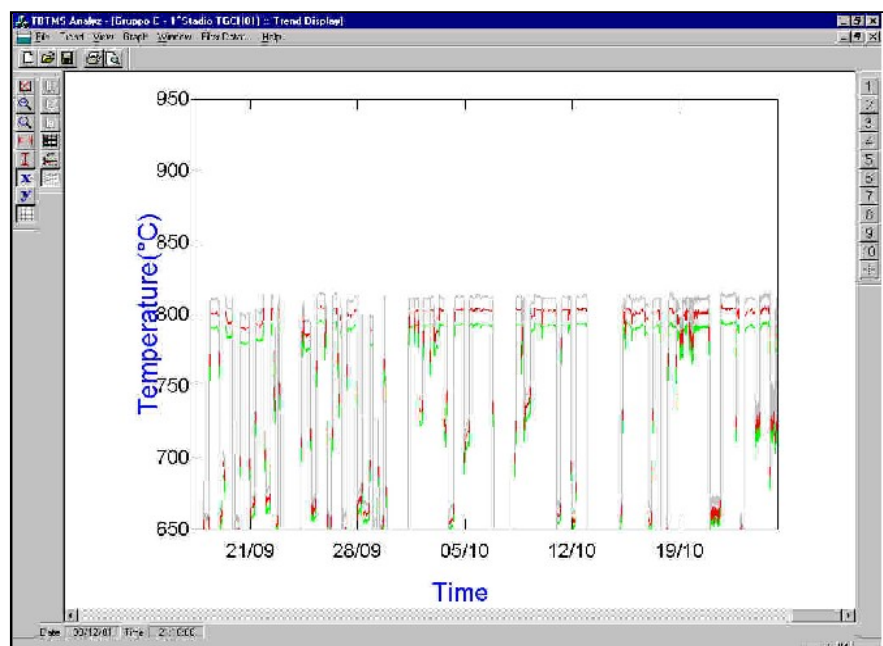


Fig. 11 - Temperature medie delle pale registrate dal pirometro.

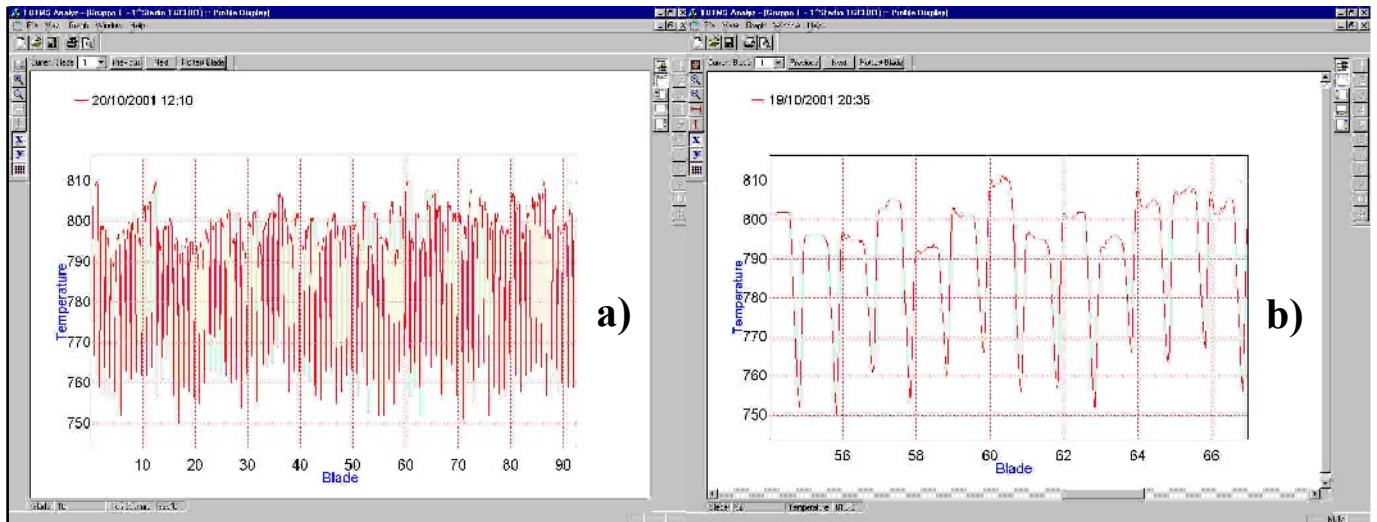


Fig. 12 - Profili di temperatura: a) di tutte le palette; b) di un sottoinsieme di palette.

registrate nei periodi di funzionamento a pieno carico tendono a mantenersi sugli stessi livelli (attorno agli 800 °C). Oltre ai valori medi il sistema consente di visualizzare i profili di temperatura misurati nella singola rotazione e sulla singola pala.

Nella figura 12a) è riportato un esempio dei profili termici relativi all'intera schiera di palette del primo stadio. Nel caso in esame, le zone a più alta temperatura rappresentano la porzione di superficie del ventre della pala osservata dal pirometro, mentre quelle a temperatura più bassa corrispondono alle cime delle palette, che sono assai più fredde per la presenza dei fori di uscita dell'aria di raffreddamento.

Si osservi che esistono lievi differenze di temperatura fra le singole pale, come è più evidente nella figura 12b), che riporta uno zoom su 13 delle 92 pale dello stadio. Tali differenze entro certi limiti sono fisiologiche, ma se superano una soglia, opportunamente impostabile via software, possono indicare un'anomalia del sistema di raffreddamento anche della singola paletta e dare di conseguenza origine ad un allarme.

CONCLUSIONI

CESI RICERCA ha condotto una estesa sperimentazione per verificare la fattibilità pratica della misura della temperatura dei gas in ingresso alla turbina (TIT, un parametro attualmente non direttamente misurato, ma calcolato a partire dalla misura della temperatura dei gas allo scarico) e della misura delle metallo delle palette mobili dei gruppi turbogas industriali.

Per la misura della temperatura dei gas in ingresso alla turbina (TIT), la sperimentazione ha riguardato sia una sonda a fibra ottica, da immergere nel flusso dei gas caldi, sia un sensore innovativo, basato su una tecnica di spettroscopia di emissione di una banda di CO₂, che non richiede l'inserimento di nessun elemento sensibile nel flusso gassoso. Il primo sensore è stato provato su due banchi prova per combustori che simulano le condizioni dei gas in ingresso a turbogas industriali, consentendo di metterne a punto il progetto e di ottimizzarlo per la successiva fase di prova su una turbina a gas in esercizio.

Il prototipo del secondo sensore è stato messo a punto in laboratorio e successivamente installato su un banco prova in pressione per combustori di turbogas. Le prove sul banco hanno mostrato che il sistema produce un segnale ben correlato con la temperatura dei gas calcolata in base ai parametri di processo, con una sensibilità sufficiente per consentire di

seguire le fluttuazioni caratteristiche nei gas di combustione durante il funzionamento stazionario dei combustori. Grazie alla sua semplicità costruttiva, il sensore risulta promettente per l'applicazione su un impianto turbogas reale.

Per quanto riguarda la misura della temperatura del metallo delle palette, l'esperienza di utilizzo e gestione di un sistema pirometrico su una turbina a gas industriale da circa 110 MW in normale esercizio è stata positiva e senza inconvenienti per tutto il periodo (circa un anno e mezzo) della sperimentazione. In particolare non si sono osservati particolari degradi della misura dovuti a sporcamenti della finestra ottica (per la quale era stato in ogni caso predisposto un semplice sistema di autopulizia, con aria di sbarramento prelevata dal compressore della turbina stessa) od a variazioni della calibrazione del sensore. L'esperienza ha quindi confermato la validità del sistema come strumentazione di monitoraggio continuo, in grado di funzionare per lunghi periodi, in un ambiente industriale.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato finanziato con il Fondo Ricerca di Sistema per il settore elettrico nazionale istituito con Decreto Ministero dell'Industria DM 26/1/2000.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G.A. Hornbeck - "Optical methods of temperature measurement", Appl. Opt. Vol. 5, No. 2, 1966, p.179.
- [2] University of South Florida - "HITRAN Database", Copyright 1997.
- [3] I. Gianinoni, E. Golinelli, L. Fiorina, U. Perini - "Sonda ottica per la misura della temperatura di ingresso turbina negli impianti turbogas", Atti 9° Convegno Nazionale "Strumentazione e metodi di misura elettroottici", Frascati (ROMA) 2005, p. 165.