

F. Balsamo, A. Paciolla, F. Quaranta

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA NAVALE (D. I. N.) - NAPOLI

Un sistema per la misura a bordo dei parametri caratteristici del funzionamento dell'apparato motore e della navigazione

Introduzione: perché un data logger

La conoscenza delle condizioni di funzionamento è una condizione che riveste oggi particolare importanza nella gestione di un sistema di propulsione navale: varie considerazioni suggeriscono, infatti, l'adozione o l'utilizzo a bordo di sistemi di acquisizione dati. Tra esse ricordiamo le seguenti:

- *miglioramento delle prestazioni dei motori di propulsione*: i motori destinati alla propulsione navale sono oggetto di una continua evoluzione tecnologica che, se da un lato consente il progressivo aumento del rapporto peso/prestazioni, dall'altro causa l'avvicinamento delle condizioni di funzionamento a quelle limiti nei riguardi della resistenza ai carichi termici e meccanici. In altri termini, un motore attuale ad alte prestazioni può reggere ottimamente i carichi nominali fornendo le potenze specifiche previste ma può andare in crisi anche velocemente se, per motivi legati alla imprevedibilità delle condizioni di navigazione, gli si chiede di fornire un carico superiore a quello di progetto. Si può dire che i motori attuali, a parità di pesi ed ingombri, sono più potenti ma meno "permissivi" ossia sopportano le condizioni di sovraccarico peggio di quanto facessero quelli delle generazioni precedenti. Tutto ciò rende desiderabile il controllo costante dei parametri operativi in modo da evitare gli effetti negativi del funzionamento in "overload".
- *studio del comportamento dei motori di propulsione*: motori installati a bordo di navi ed imbarcazioni in genere in tempi non recenti possono risultare oggi inefficienti dal punto di vista del consumo specifico e delle emissioni allo scarico: la sostituzione dell'apparato di propulsione può talvolta risultare conveniente. La valutazione della convenienza di una tale (complessa) operazione richiede, in via preliminare, la determinazione delle effettive condizioni di funzionamento dell'apparato motore e delle sue emissioni.
- *analisi del peggioramento delle condizioni di funzionamento nel tempo ed in presenza di condizioni meteomarine non ideali*: la determinazione dei tempi ottimi di carenaggio così come la scelta della filosofia di manutenzione degli organi di propulsione dipende dalla conoscenza dell'aumento di erogazione di potenza nel tempo dovuto al peggioramento dello stato della carena. La rilevazione in continuo, o con scansioni predeterminate, dei valori dei parametri significativi delle prestazioni dell'apparato di propulsione ha il vantaggio di

facilitare questa decisione oltre a quello di permettere l'elaborazione di statistiche circa il comportamento della carena esaminata. Il rilievo delle prestazioni in condizioni meteomarine avverse ha inoltre il senso di facilitare la gestione dell'apparato di propulsione e di permettere l'ottenimento di alcuni obiettivi (quali, per esempio, la massima durata delle parti in movimento o il mantenimento del livello di prestazioni od altri ancora).

- *monitoraggio*: nelle navi più moderne il complesso dei sensori di misura dei parametri significativi della propulsione e della navigazione è considerato parte integrante del sistema di automazione della nave; un sistema di acquisizione collegato ai sensori installati a bordo permette di realizzare un dettagliato giornale di macchina con l'evidente vantaggio della disponibilità di tutti i dati di funzionamento e la possibilità di effettuare statistiche altamente personalizzate ed efficaci. Ciò introduce un forte aiuto nel campo della gestione in quanto permette di scegliere la politica di funzionamento più idonea e di evidenziare immediatamente i suoi effetti con possibilità di correggere prontamente eventuali impostazioni ritenute poco efficienti. La stessa procedura di manutenzione può giovare della conoscenza dell'effettivo modo di funzionamento del motore ed i tempi degli interventi sulle parti possono essere ottimizzati dal punto di vista funzionale ed economico. Evidenti anche le ricadute di una simile disponibilità sul controllo delle prestazioni a nave nuova e durante l'esercizio.

Generalità sui sistemi di acquisizione dati

Un data logger deve essere in grado di effettuare, con una frequenza idonea a seguire soddisfacentemente il variare dei fenomeni osservati (detta "frequenza di campionamento"), la lettura e l'immagazzinamento in file dei valori assunti dai parametri significativi di un fenomeno fisico da registrare.

In generale l'hardware di un sistema di acquisizione dati (ossia il complesso delle strutture fisiche atte a trattare il segnale) è composto da alcune sezioni preposte al rilievo ed alla trasformazione del dato.

La rivelazione del parametro oggetto della acquisizione avviene ad opera del sensore; si tratta di un elemento il cui stato varia in funzione della grandezza oggetto della misura. La variazione di energia dell'elemento sensibile viene trasformata dal trasduttore il cui compito è quello di rendere disponibile un segnale analogico; in molti casi la differenza tra sensore e trasduttore non è evidente fisicamente ma solo concettualmente. Nella tabella i sono riassunte le tipologie di segnale elettrico analogico.

segnale	livelli estremi
frequenza	0 ÷ 5 V
tensione	0 ÷ 10 V
Corrente	4 ÷ 20 mA

Tab 1

In alcuni casi, come ad esempio le misure di temperatura, è necessaria la compensazione del segnale in funzione dei parametri ambientali. Nel caso di dispositivi che hanno un

interfaccia elettronica (display, computer etc.) è necessaria una digitalizzazione del segnale che viene effettuata dai convertitori A/D ed eventualmente una operazione di multiplexing per trasmettere segnali diversi su una stessa linea. La trasmissione del segnale per via seriale avviene secondo protocolli definiti da vari standard internazionali (RS 232, IEEE 488, NMEA, etc.).

I dati digitalizzati possono essere visualizzati sul display e contemporaneamente immagazzinati sui supporti magnetici dell'hardware. I sistemi oggi disponibili sono realizzati assemblando elementi più o meno standardizzati e modulari che realizzano, spesso in maniera integrata, le funzioni descritte.

Il sistema di acquisizione dati realizzato dal D.I.N.

L'hardware

Ogni sistema di acquisizione dati deve rispondere alle esigenze legate al tipo di parametri da rilevare ed alle leggi con cui essi variano nel tempo. D'altronde, la fioritura di componenti nel campo della strumentazione e dei controlli mette oggi a disposizione molte alternative.

Il D.I.N. ha realizzato un suo sistema originale con due obiettivi prioritari:

- idoneità all'acquisizione dei parametri fondamentali di funzionamento dell'apparato motore e della navigazione;
- massima flessibilità ed estensibilità del sistema, dei sensori, dei trasduttori.

In generale un data logger deve essere in grado di raccogliere dati in tutti gli standard più diffusi; deve cioè essere provvisto dei dispositivi e dei software che lo mettano in grado di interpretare correttamente i segnali quale che ne sia la tipologia.

Nel caso del sistema messo a punto nel D.I.N. si è optato per una soluzione che possedesse i seguenti requisiti:

- capacità di realizzare contemporaneamente più letture sia analogiche che digitali;
- ampia espandibilità in termini di capacità di aggiungere con poche e semplici operazioni nuovi canali di lettura;
- ampia possibilità di scelta della frequenza di acquisizione in modo da ottimizzare la lettura in funzione del tipo di fenomeno osservato;
- possibilità di registrare in file (nel formato desiderato) tutte le letture effettuate così da poter elaborare i dati acquisiti con l'ausilio dei software disponibili in Dipartimento.

Il sistema si basa su un personal computer portatile TOSHIBA T4400C ed una Deskstation IV della stessa marca avente la funzione di alloggiare altre schede di interfaccia con il computer. Questa scelta ha permesso di realizzare un sistema ricco di moduli di interfaccia (in quanto tra calcolatore e deskstation vi sono almeno 4 slot liberi destinabili a porte o schede dedicate) senza perdere il vantaggio della portatilità del calcolatore che può essere disinserito dalla deskstation.

Le entrate di tipo analogico sono elaborate dai condizionatori di segnale (tipo moduli 6B della ANALOG DEVICES) i quali consentono di effettuare la compensazione, la conversione A/D e la linearizzazione di segnali provenienti da termocoppie, termoresistenze, sensori di posizione, pressione etc. Il rack su cui sono alloggiati i moduli provvede alla trasmissione delle misure al computer secondo lo standard seriale RS 232.

Questa configurazione permette di attivare fino a 256 canali per le acquisizioni in analogico: ogni nuova lettura può essere effettuata semplicemente includendo nel sistema un modulo 6B e tarandolo con l'ausilio di un software apposito. Ciò semplifica evidentemente l'operazione di adattamento del sistema ad una variata configurazione di acquisizione.

Le letture dei segnali ad impulsi e digitali vengono invece affidate alle schede (RTI-827 della ANALOG DEVICES) alloggiata nella deskstation; esse sono dotate di contatori di impulsi ed ingressi digitali. Il numero di canali oggi disponibili è di 10 per le letture in frequenza e 6 per i segnali digitali. E' evidentemente possibile aumentare i canali di lettura implementando una nuova (o più di una) scheda; il numero di disponibilità attuali è comunque largamente sufficiente per le normali esigenze di acquisizione in campo navale.

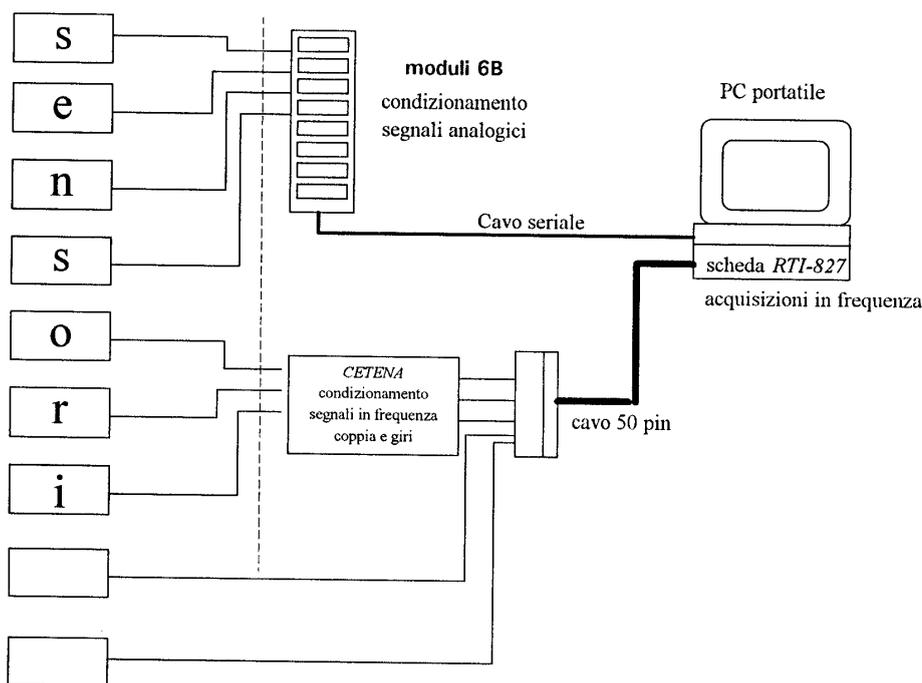


Fig 1

Il risultato di tali scelte è rappresentato in figura 1 in cui si riporta uno schema a blocchi del sistema.

Il software di acquisizione adottato è il NOTEBOOK della LABTECH, prodotto che presenta notevoli caratteristiche di familiarità per l'utente e che permette la gestione e l'eventuale variazione del lay-out di data logging con manovre semplici e veloci. Ciò risulta particolarmente comodo in quanto rende possibile l'accesso alle utility del software anche durante lo svolgimento di una campagna di acquisizione.

I sensori

La flessibilità dell'hardware realizzato permette il collegamento di numerosi tipi di sensori; in particolare, è possibile effettuare i seguenti tipi di misure:

- temperature
- pressioni
- velocità angolari
- coppie motrici
- potenze erogate
- velocità della nave
- immersione della nave
- consumo di combustibile (medio ed istantaneo)
- posizione della leva di comando della pompa combustibile
- emissioni allo scarico

Temperature, pressioni, velocità angolari ed altre variabili classicamente acquisite per via analogica, vengono misurate rispettivamente con termocoppie, indicatori di pressione, accoppiamenti pick up - ruota polare ed altri sensori specifici nelle loro versioni e configurazioni più idonee alle misure da effettuare. Tutti i segnali analogici vengono inviati ai moduli 6B e trattati come descritto in precedenza.

Le posizioni delle leve del combustibile (ed, in generale, tutte le posizioni da acquisire) vengono rilevate da sistemi di ritrasmissione realizzati con sensori potenziometrici lineari che, alimentati ad una tensione fissa e conosciuta, emettono un segnale dipendente dalla posizione dell'organo di cui devono indicare la posizione. Annotando le tensioni relative alle posizioni iniziale e finale da trasmettere, si potrà, una volta disponibile il file in cui sono registrati i valori di tensione letti, risalire alle posizioni acquisite dalla leva.

La velocità nave può essere misurata con sistemi esterni fissati a bordo soltanto su navi piccole (o su quelle che già dispongono di sensori tachimetrici sotto carena). Quando possibile, viene utilizzato un solcometro a turbinetta (che emette un segnale in frequenza); negli altri casi occorre utilizzare un sistema di rilievo continuo del punto (come GPS, LORAN od altri) ed un software dedicato che permette di ricavare la velocità istantanea del mezzo e di registrarla direttamente in un file.

Il momento motore viene misurato dalle sezioni torsionometriche (al momento 2) di tipo estensimetrico (Ce.Te.Na. T1A993) le quali danno l'indicazione della coppia deducendola dalla deformazione torsionale subita da un tronco di asse intermedio su cui è incollato uno strain gauge a rosetta contenente un ponte di Wheatstone di estensimetri. Il ponte è alimentato, su una diagonale, a 9 V e, sulle estremità dell'altra diagonale, è possibile rilevare la presenza di tensione; in condizioni normali, se il ponte è indeformato (se quindi non c'è torsione sull'asse), la tensione in uscita è nulla. Se c'è deformazione, sulla diagonale secondaria del ponte sarà rilevabile una tensione proporzionale all'allungamento subito dall'estensimetro (in definitiva, dal momento torcente agente sul tronco). Questa tensione pilota un oscillatore che emette un segnale di tipo sinusoidale ad ampiezza costante e frequenza variabile linearmente con la tensione stessa. Il segnale viene così indirizzato, in radiofrequenza, attraverso un'antenna coassiale all'asse ed un pick up fisso, ad un sistema che fa da condizionatore e convertitore: l'output finale è un segnale ad onda quadra di tipo TTL 0-5 V con frequenza proporzionale alla deformazione estensimetrica misurata. Da questa è facile passare al valore della coppia torcente attraverso le caratteristiche statiche dell'asse conoscendo il modulo di elasticità trasversale dell'elemento della linea d'assi su cui insiste lo strain gauge.

Un simile meccanismo presenta l'importante vantaggio di evitare contatti striscianti tra gli elementi rotanti in maniera solidale all'asse e quelli fissi. Data la sensibilità dell'estensimetro

e la velocità di risposta dell'intero sistema, possono essere realizzate accurate letture di coppia motrice, anche in transitorio; rilevando la velocità angolare dell'asse ed eseguendo (anche questo in maniera automatica ed in tempo reale) il prodotto delle due variabili, si può determinare il valore della potenza propulsiva.

Il consumo di combustibile viene rilevato, in condizioni di regime stazionario del motore così come in transitorio, da strumenti diversi a seconda delle portate massime da misurare. Attualmente sono disponibili misuratori volumetrici capaci di misurare consumi di motori di varie taglie (con portate volumetriche da 0.0085 a 50 litri al minuto). Naturalmente, la determinazione del consumo specifico viene effettuata partendo da quella del consumo orario, moltiplicandolo per la densità del combustibile (rilevabile, conoscendo la scala delle densità, attraverso la sua temperatura) e dividendolo per il lavoro compiuto dal motore nella base di tempo dell'osservazione (a sua volta, ottenuto come prodotto tra la potenza spesa ed il tempo stesso). Il segnale emesso dai misuratori volumetrici è generalmente in frequenza anche se per alcuni è disponibile l'uscita analogica.

Con la strumentazione oggi disponibile in DIN è possibile effettuare anche rilievi di emissioni allo scarico; per esse l'esigenza di trasportabilità della strumentazione contrasta con quella di affidabilità delle misure la cui precisione dipende molto strettamente dalla complessità dell'analizzatore la quale, a sua volta, ne limita l'uso al laboratorio. Si sono ottenuti comunque risultati interessanti utilizzando una apparecchiatura portatile della Tecnotest (modelli 500 e 495) per il rilievo di emissioni gassose e della fumosità in condizioni di stazionario. Con essa possono essere determinati i valori di NO, CO, CO₂, HC e indice Bosch delle emissioni del motore oggetto di prova a regime ma si possono avere indicazioni utili a comprendere la dinamica delle emissioni anche in transitorio. Si pensa infatti di analizzare il flusso di dati relativi alle emissioni di imbarcazioni in servizio individuando dei "cicli" di funzionamento legati a determinate modalità di emissione; ciò, se da un lato impedisce la determinazione delle emissioni istantanee, permette dall'altro la non meno interessante valutazione di quelle relative ad ogni ciclo intero con il vantaggio di permettere previsioni di emissione di imbarcazioni destinate ad operazioni scomponibili in una serie di cicli. Il segnale in uscita da questo strumento è digitale (nello standard RS 232) e l'ingresso nel calcolatore avviene attraverso una porta seriale.

La precisione delle misure

Chi si occupa di misure ben sa che la cosa più difficile è determinare con esattezza l'errore compiuto in ogni lettura; ciò sia per la difficoltà di individuare a fondo le caratteristiche di tutti gli elementi coinvolti nella lettura di un parametro, sia per la variabilità dell'errore commesso nell'arco dei valori che tale parametro può assumere (il che permette, al massimo, la determinazione di un *errore medio*). Volendo comunque dare una indicazione sulla precisione di lettura dei vari parametri, se ne riportano in tabella 2 i valori presumibili (da ritenere indicativi), ottenuti attraverso una analisi compiuta su ciascuna delle catene di misura: dove la lettura può essere effettuata con diversi tipi di sensori (accreditati di diverse precisioni) si riportano i valori minimi e massimi ipotizzabili per essi.

grandezze	sensori	errori
temperature	termocoppie	$\pm 1.5^{\circ}\text{C} \div \pm 2.5^{\circ}\text{C}$
momento motore	torsiometro ad estensimetri	$\pm 10\%$ (1)
velocità angolare	pick-up	(2)
consumo di combustibile	flussimetro volumetrico	$\pm 0.2\% \div \pm 0.5\%$

posizioni	ritrasmettitori potenziometrici	± 2 %
emissioni	analizzatori	(3)

- (1) Per la determinazione del momento motore occorre conoscere il valore del modulo di elasticità trasversale G ; in genere tale valore non è precisato nella specifica dell'asse intermedio né viene dato nelle schede tecniche del materiale con cui esso è costruito. L'errore precisato è pertanto supponibile nell'ipotesi di conoscenza del valore di G ; in caso contrario, è consigliabile procedere alla taratura statica del torsionometro che presenta l'ulteriore vantaggio di migliorare la precisione di tutta la catena di lettura della coppia.
- (2) Nella ipotesi di trasmissione perfetta degli impulsi, l'errore assoluto E compiuto nella lettura del numero di giri da un pick up affacciato ad una ruota fonica con z denti dipende soltanto dalla risoluzione del segnale (in pratica, dalla incertezza di lettura dell'ultimo passaggio di un dente nel periodo di campionamento) e vale pertanto: $E = 60 \nu / z$
ove ν è la frequenza di acquisizione in Hz.
- (3) Gli analizzatori Tecnotest attualmente utilizzati (dati in comodato dalla casa costruttrice all'Istituto Motori di Napoli) sono accreditati di buona precisione. Per quantizzare l'errore di misura degli emessi (sia gassosi che fumi) è in corso una indagine di correlazione delle misure realizzate con tali analizzatori e quelle effettuate con l'ausilio di strumentazioni analoghe da laboratorio capaci di elevata (e conosciuta) precisione.

Tab 2

Naturalmente, se la determinazione dell'errore di lettura di una grandezza è ritenuta insoddisfacente si procede alla taratura della relativa linea di rivelazione in modo da individuare la precisione della misura e, quando ritenuto opportuno, la sua ripetibilità.

Applicazioni del sistema

Il D.I.N. in collaborazione con altre Istituzioni, ha realizzato una campagna di rilievo dati su un vaporetto destinato al servizio di linea sul Canal Grande di Venezia.

variabile	sensore
temperatura gas di scarico	termocoppia tipo K
temperatura acqua ingresso motore	termocoppia "stickon" tipo J
temperatura acqua uscita motore	termocoppia "stickon" tipo J
temperatura aria ingresso	termocoppia tipo K
coppia motrice	unità torsionometrica a strain gauge
giri motore	pick-up
giri elica	pick-up
velocità nave	solcometro
emissione di NOx	analizzatore <i>TecnoTest 500</i>
emissione di CO	analizzatore <i>TecnoTest 500</i>
emissione di CO ₂	analizzatore <i>TecnoTest 500</i>
emissione di O ₂	analizzatore <i>TecnoTest 500</i>
fumi	fumimetro <i>TecnoTest 495</i>
consumo combustibile	flussimetro <i>Flowtronic 205</i>

Tab 3

In tabella 3 un prospetto delle misure effettuate e dei relativi sensori usati.

Dai rilievi delle caratteristiche di funzionamento è emersa la possibilità di prospettare accorgimenti migliorativi (dal punto di vista del consumo specifico e delle emissioni) nonché di guardare alle possibili alternative impiantistiche che permettano di realizzare la medesima missione del

vaporetto ottimizzando le prestazioni dal punto di vista di propulsione e manovrabilità.

Per il prossimo futuro si pensa di utilizzare il sistema di acquisizione dati per lo studio delle variazioni delle caratteristiche di propulsione legate al deterioramento della carena nonché alla navigazione in condizioni meteomarine non ottimali.

Questo tipo di indagine si presenta interessante per gli evidenti aspetti di ottimizzazione della propulsione (sia dal punto del feed - back che può originare a livello progettuale sia per le variazioni attuabili in sistemi esistenti tesi a migliorarne la gestione) ed è composto almeno di una fase iniziale, di rilievo delle caratteristiche di funzionamento dell'apparato motore da indagare, e di una di analisi e controllo delle sue variazioni nel tempo ed in condizioni di funzionamento non favorevoli.

Il parco d'interesse coincide con quello circolante: non v'è realtà marittima, infatti, che non sia potenzialmente interessata ad aggiornamenti tecnici che, migliorando le caratteristiche di propulsione, contribuiscano a contenere le spese di gestione e le emissioni nocive. Queste ultime, in particolare, saranno oggetto di regolamentazione in modo analogo a quanto avviene già da tempo per gli impianti terrestri (fissi e per autotrazione): di conseguenza, gli operatori del campo marittimo dovranno adoperarsi perché le emissioni delle imbarcazioni soddisfino le limitazioni poste dai regolamenti che verranno promulgati al fine di contenere l'inquinamento specialmente nelle zone di navigazione prossime ai centri abitati.

Ringraziamenti

I più sentiti ringraziamenti vanno all'Ing. Giulio Santo (I.T.D.) per l'impostazione e l'identificazione dei componenti del sistema ed ai Signori Francesco Paolo Violano (Istituto Motori del CNR, Napoli), Gennaro Gargiulo e Carlo Quaranta per l'appoggio tecnico fornito nella scelta e messa a punto di sensori e trasduttori.

Bibliografia

- Bentley, J. P. *Principles of measurement system* London & New York: Longman construction press, 1983
- Usher, M.J. *Sensori e trasduttori* ed. it. Milano: Tecniche Nuove, 1989
- Schatt, S. *Le reti locali* ed. it. Milano: Tecniche Nuove, 1988
- Balsamo, F.; Brighenti, A.; Landri, G.; Paciolla A.; Quaranta F. *Experimentation and measurements on the propulsion plant of a water bus in service on the "Canal Grande" in Venice* in *III CIMAC Symposium on small diesel engines, Warsaw, 23-24/5/1994* CIMAC 94