

# L'acquisizione a bordo dei dati di propulsione e di navigazione

di Flavio Balsamo, Antonio Paciolla, Franco Quaranta

Presso alcune Istituzioni di ricerca italiane è in corso un'attività di indagine sul funzionamento degli impianti di propulsione navali tesa a rilevarne le caratteristiche, individuare le modalità di gestione più vantaggiose dal punto di vista economico, studiare sistemi alternativi che permettano di ottenere il contenimento di consumi ed emissioni. Tale attività si basa sul rilievo preliminare dei parametri di propulsione e navigazione degli impianti attraverso campagne di acquisizione dati che vengono realizzate a bordo delle navi prese in esame. Vengono qui presentate due esperienze realizzate sul campo in realtà operative piuttosto differenti tra loro: la navigazione lagunare dei vaporetto che garantiscono il servizio di trasporto pubblico a Venezia e l'esercizio dei traghetti nel golfo di Napoli.

**L**a necessità di approfondire la conoscenza dei sistemi di propulsione delle navi e di registrarne le varie condizioni di funzionamento spinge oggi ad elevare il livello di monitoraggio dei suoi apparati grazie al sostegno tecnologico già da tempo ac-

Ing. Flavio Balsamo, dottore di Ricerca in Ingegneria Navale, Consulente tecnico presso gli Armatori D'Amato, Napoli; prof. ing. Antonio Paciolla, professore di Impianti di Propulsione Navale presso il Dipartimento di Ingegneria Navale dell'Università "Federico II", Napoli; ing. Franco Quaranta, ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria Navale dell'Università "Federico II", Napoli.

quisito nel campo dell'automazione. I vantaggi del *follow-up* del sistema di propulsione e di quelli di navigazione sono legati a diversi aspetti tecnologici e gestionali: conoscere bene le caratteristiche di funzionamento della nave migliora infatti la diagnostica e la prevenzione dei guasti di macchina, permette di prevedere (e pilotare ove necessario e possibile) il comportamento degli apparati in condizioni non ottimali di navigazione, consente di intervenire sui parametri di tenuta al mare al fine di migliorarne la qualità; fornisce, in definitiva, uno strumento di controllo estremamente valido in quanto tratto dalla interpretazione del-

la storia di funzionamento dei sistemi da gestire. Per questi motivi alcune organizzazioni operanti in settori affini a quello degli impianti navali hanno intrapreso una attività in collaborazione avente per finalità lo studio dei sistemi di propulsione: il Dipartimento di Ingegneria Navale (Din) dell'Università "Federico II" di Napoli, l'Istituto Motori (Im) del Cnr e lo studio "Ingegneria dei Sistemi e Studio di Tecnologie Avanzate" (Ista) dell'ingegner Brighenti di Venezia.

Le operazioni compiute in collaborazione, che saranno illustrate nel seguito, possono essere descritte attraverso le fasi seguenti:

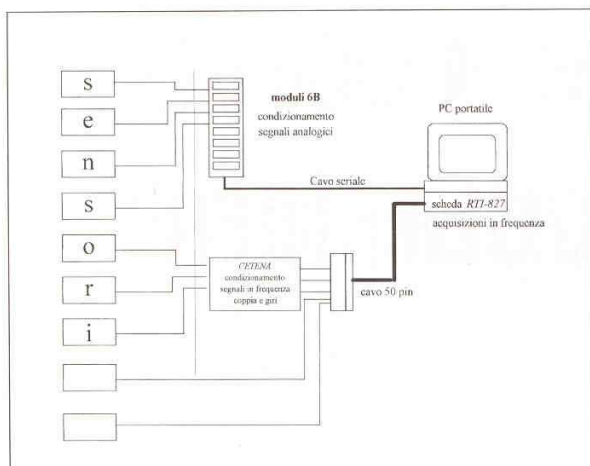


Figura 1 - Schema del data logger

**Tabella 1 - Caratteristiche principali M/B 54**

M/B 54	
Lbp = 20,91 m	Invertitore riduttore: Lohman Gus 200
D = 38,7 t (senza passeggeri)	rapporto medio di riduzione = 4:1
v = 11 kn	Elica: 3 pale (destrorsa)
massimo numero di passeggeri: 224	D = 1.000 mm
Motore: Iveco aifo M821	p = 1.000 mm
Mcr = 162 kW @ 2200 rpm	
potenza nominale in cubica:	140 kW (all'asse motore) @ 1.800 rpm 120 kW (all'elica) @ 440 rpm

- misura *on site* dei parametri legati alla propulsione e navigazione di alcune navi prese in esame;
- analisi dei dati raccolti a bordo e produzione di statistiche utili alla definizione delle effettive condizioni di navigazione;
- valutazione delle migliorie apportabili ai sistemi di propulsione per migliorarne la gestione;
- studio di sistemi di propulsione alternativi a quelli presenti capaci della stessa missione ma in migliorate condizioni di consumo ed emissioni;
- studio dei componenti chiave necessari per la definizione dei sistemi alternativi di propulsione;
- simulazione al computer delle condizioni di funzionamento dei sistemi navali.

Per realizzare la prima fase delle sperimentazioni descritte, viene utilizzato un sistema di misura operativo nel Din consistente in un vero e proprio

laboratorio mobile di misure navali attraverso il quale è possibile rilevare, in maniera continua e con la frequenza di campionamento desiderata, le grandezze coinvolte nella navigazione e nella propulsione delle navi in esame quali coppia motrice, numero di giri motore, temperature e pressioni coinvolte nel ciclo di funzionamento del motore, indici di carico, passo eliche, consumo combustibile, velocità della nave ed altre che, volta per volta vengono considerate d'interesse per la ricerca in fase di sviluppo. In Figura 1 uno schema del sistema utilizzato per le misure [1].

### L'esperienza veneziana: la navigazione in laguna

La navigazione dei vaporetti che a Venezia garantiscono il servizio pubblico cittadino avviene in condizioni

decisamente particolari rispetto alla generalità dei casi: infatti, la navigazione in acque interne e costiere impone delle condizioni del tutto diverse da quelle tipiche delle imbarcazioni impegnate in rotte medio lunghe.

In queste ultime infatti, dopo un breve periodo di transitorio necessario al raggiungimento della velocità di rotta, gli apparati motore lavorano in condizioni prevalentemente stazionarie, sensibili al più (e comunque soffrendo limitati aggiustamenti delle condizioni di propulsione) alle eventuali variazioni delle condizioni meteomarine. Le imbarcazioni destinate a navigazione in acque interne, invece, hanno generalmente un profilo operativo composto di sequenze quasi sempre in condizioni di transitorio, dovendosi spesso variare la velocità dell'imbarcazione, quando non effettuare fermate di servizio.

Condizioni simili comportano sistema-



Figura 2 - Un momento delle operazioni condotte sul vaporetto messo a disposizione dalla Actv di Venezia



Figura 3 - Il vaporetto n. 54 sul quale si sono realizzate campagne di prove al vero in varie condizioni di moto

ticamente il sottoutilizzo delle risorse di potenza dell'apparato di propulsione (che deve essere comunque proporzionato per il carico massimo da sopportare durante la navigazione) ed un alto grado di irregolarità nell'erogazione di potenza; queste due circostanze, com'è noto dalla dinamica dei motori a combustione interna, generano la diminuzione del rendimento di conversione dell'energia (e con esso l'innalzamento del consumo specifico del motore) e, cosa di grande importanza viste le recenti evoluzioni delle condizioni ambientali dei luoghi fortemente abitati, il peggioramento delle emissioni allo scarico.

L'interesse per questa realtà deriva dunque dai larghi margini di miglioramento della gestione che si sono manifestati dal punto di vista dello sfruttamento dell'energia e delle emissioni dagli apparati motori operanti nelle condizioni descritte.

Per la definizione delle condizioni operative del vaporetto si sono effettuate alcune campagne di prove al vero sul vaporetto n. 54 in varie condizioni di moto (in acqua libera, all'ormeggio, in esercizio di linea sulle tratte più significative coperte dal vaporetto). Nelle Figure 2 e 3 alcuni momenti delle operazioni condotte sul vaporetto gentilmente messo a disposizione dalla Actv (Azienda del Consorzio dei Trasporti Veneziano); le caratteristiche principali dell'imbarcazione sono riportate in Tabella 1.

Nelle Figure da 4 a 8 sono presentati alcuni esempi dei dati raccolti in alcune corse unitamente alle relative informazioni statistiche.

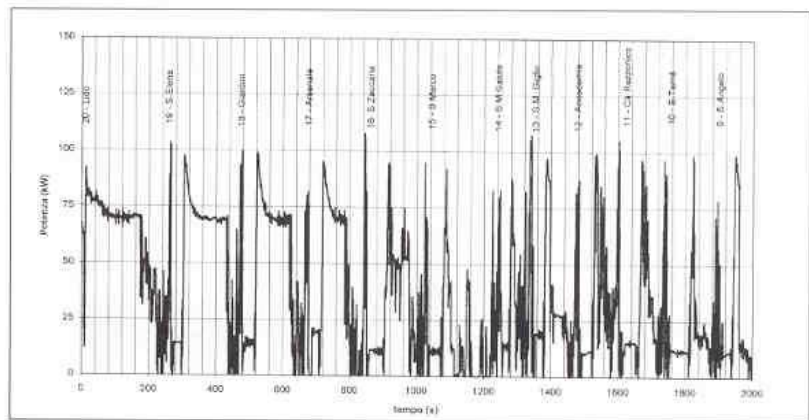


Figura 4 - Linea 1: prima parte corsa andata (Lido-S. Angelo)

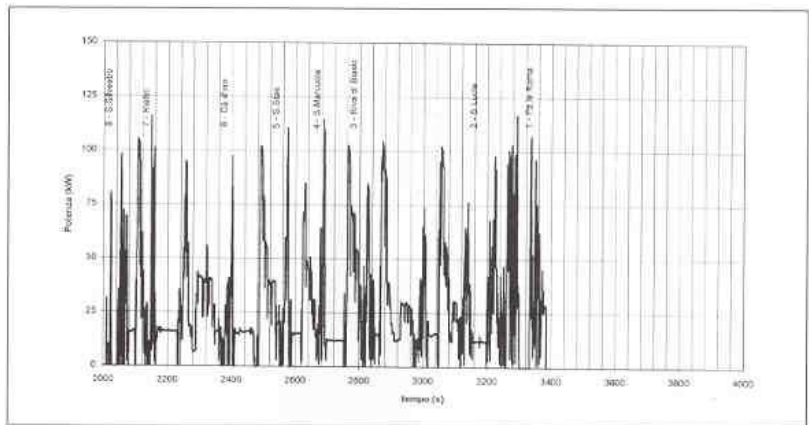


Figura 5 - Linea 1: seconda parte corsa andata (S. Silvestro-P.le Roma)

Anche le emissioni allo scarico sono state misurate ed analizzate; in Figura 9 è riportato un esempio di distribuzione delle emissioni di  $\text{NO}_x$  rilevate durante una corsa del vaporetto in linea lungo il Canal Grande.

Da tutte le tracce dei rilievi eseguiti e dalle relative statistiche risultano evidenti alcune circostanze:

- l'erogazione della potenza è estremamente variabile nel tempo e caratterizzata da forti gradienti talché si può dire che l'intero esercizio del vaporetto avviene in condizioni di transitorio e che, eccezione fatta per un breve periodo di tempo in cui l'imbarcazione dagli ultimi moli della Riva degli Schiavoni raggiunge il Lido, non esistono praticamente tratti percorsi a regime permanente con valori costanti dei parametri in gioco. Questo grado di irregolarità influisce negativamente sul funzionamento del motore ed eleva consumi ed emissioni nocive;
- il valore medio della potenza utilizzata è largamente inferiore a quello installato a bordo ed anche a quello massimo effettivamente utilizzato (peraltro per brevissimi periodi di tempo e, generalmente, in fase di manovra di arresto ed inversione di

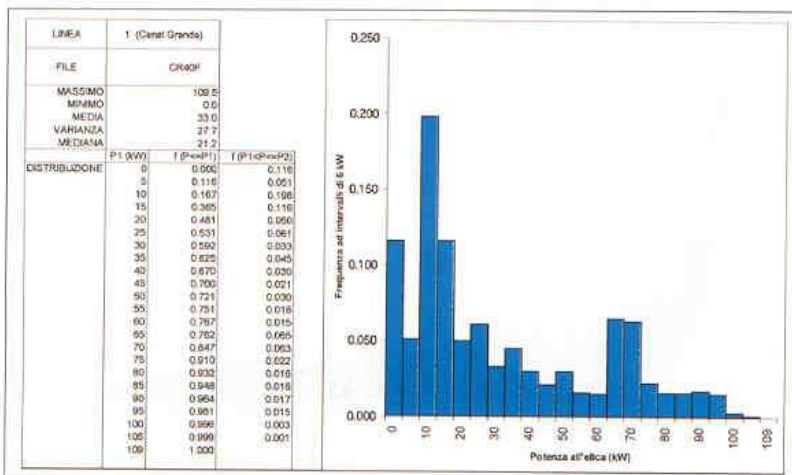


Figura 6 - Linea 1: analisi potenza all'elica

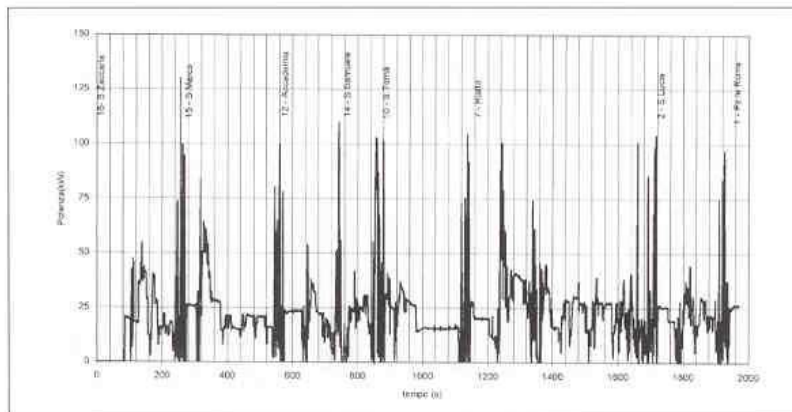


Figura 7 - Linea 82 rossa: corsa circolare (S. Zaccaria-P.le Roma)

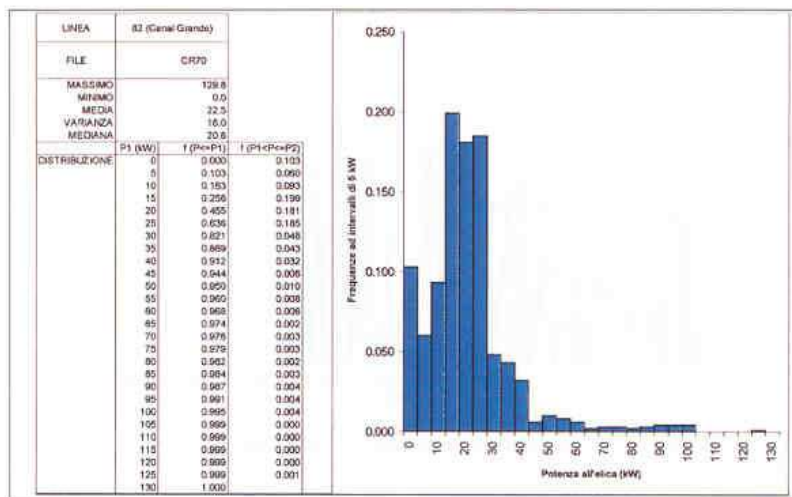


Figura 8 - Linea 82 rossa: analisi potenza all'elica

marcia). C'è quindi un deciso *sottoutilizzo* delle risorse di potenza dell'apparato motore che, al pari della circostanza precedente, genera il peggioramento dei consumi ed emissioni del motore principale;

- I valori delle emissioni misurate risultano relativamente elevati; in Tabella 2 viene riportato un prospetto comparativo dei valori medi rilevati e di quelli accettati dalle ultime direttive Cee (in realtà questi limiti sono validi nel solo campo dell'autotrazione ma è estremamente probabile la loro estensione ai *non road vehicles* tra cui i veicoli marini). Dal confronto è facile rilevare che le condizioni attuali di funzionamento del vaporetto non sono tali da permettere all'imbarcazione di soddisfare limitazioni di questo genere.

Si creano, dunque, in questo caso decisamente particolare di navigazione,

situazioni simili a quelle caratteristiche del traffico automobilistico in ambito urbano dove sono molto rare le condizioni di moto stazionario ed il ciclo di lavoro del veicolo avviene con

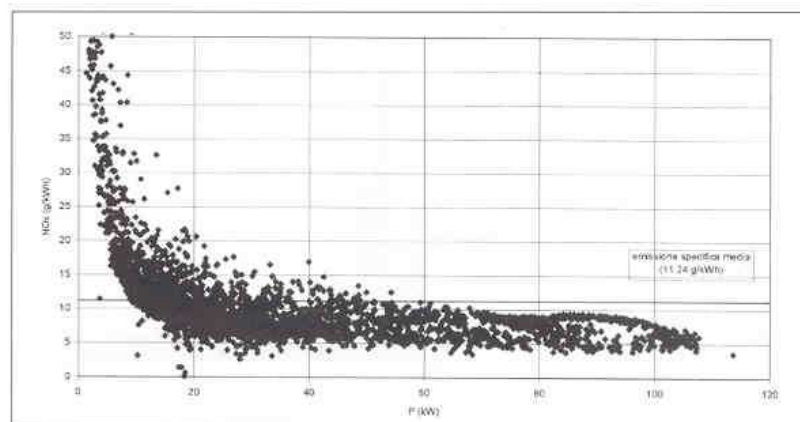


Figura 9 - Diagramma scatter delle emissioni specifiche di NO<sub>x</sub> (linea 1)

frequenti accelerazioni, decelerazioni ed arresti così rendendo estremamente irregolare il profilo di carico del motore ed innalzando consumi ed emissioni.

L'analisi delle posizioni assunte dalla leva del combustibile durante l'esercizio di linea ha poi evidenziato una notevole disomogeneità nella conduzione del veicolo da parte dei vari Conducenti (o Armi) del vaporetto ed ha permesso di individuare un collegamento tra le caratteristiche di conduzione e la qualità dell'utilizzo del veicolo (fondamentalmente attraverso il consumo di combustibile necessario per una corsa).

L'applicazione studiata si è così mostrata potenzialmente migliorabile sotto il profilo della resa energetica e delle emissioni allo scarico; si è pertanto preso in considerazione un sistema di propulsione alternativo in grado di compiere la stessa missione in condizioni di migliorata resa energetica. Sono stati esaminati diversi sistemi alternativi (più o meno innovativi sul piano tecnologico) che fossero in grado di rispondere alla esigenza di rinnovamento della motorizzazione del vaporetto in condizioni di esercizio immutate rispetto a quelle attuali.

Si è vagliato il campo delle possibilità alternative dalla semplice rimotorizzazione con un motore più moderno e dalle caratteristiche più idonee all'applicazione, alla soluzione totalmente elettrica; l'alternativa più idonea, in quanto non richiede applicazioni tecnologiche troppo impegnative e che quindi accoppia una notevole congruenza tecnica ad una discreta abbordabilità finanziaria, sembra essere quella ibrida costituita da un motore a

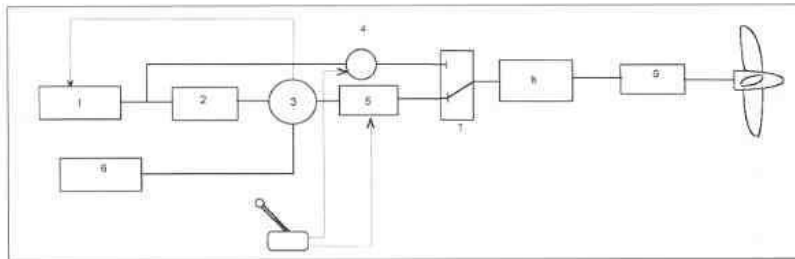


Figura 10 - Schema del sistema ibrido proposto (1 - Diesel - generatore; 2 - Raddrizzatore; 3 - Controllo del carico; 4 - Sistema di attacco diretto motore a propulsore; 5 - Inverter; 6 - Batterie; 7 - Selettore attacco diretto; 8 - Motore elettrico finale; 9 - Propulsore)

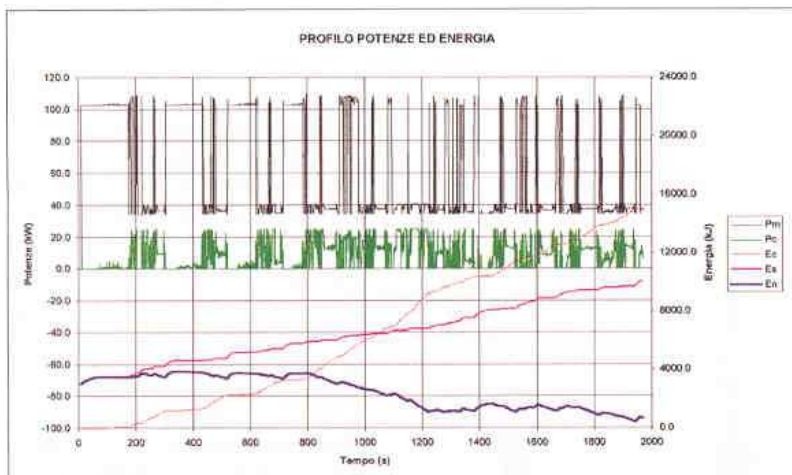


Figura 11 - Simulazione linea 1 con vaporetto ibrido: prima parte corsa andata (Lido-S. Angelo)

**Tabella 2 - Confronto tra i valori rilevati delle emissioni specifiche ed i limiti vigenti**

corsa	CO (g/kWh)	NOx (g/kWh)
linea 1	5.97	8.4
linea 82 rossa	3.64	8.68
linea 82 verde	2.8	9.33
limiti internazionali	4.0	7.0

**Tabella 3 - Consumi presumibili per sistema ibrido**

consumo totale (g)	ibrido	10410
	sistema tradizionale	12893
consumo orario (g/h)	ibrido	11022
	sistema tradizionale	13651
riduzione media di consumo		~20%
consumo specifico medio (all'asse motore - g/kWh)	ibrido	214
	sistema tradizionale	348

combustione interna funzionante a numero di giri costante accoppiato ad un alternatore che fornisce l'energia elettrica necessaria alla propulsione ad un motore finale, anch'esso elettrico. Nel sistema è

prevista la presenza di una serie di batterie elettriche costituenti un polmone energetico con la finalità di immagazzinare energia o cederne al motore finale a seconda delle fasi di funzionamento dell'impianto di propulsione, così permettendo la separazione tra la produzione della potenza necessaria alla propulsione ed il suo utilizzo.

Un sistema di questo tipo è in grado di permettere il *constant running* del motore a combustione interna (e nelle condizioni migliori per ridurre consumi ed emissioni) e, contemporaneamente, il soddisfacimento della richiesta di potenza al propulsore che, come si è visto, è estremamente variabile nel tempo.

In Figura 10 è riportato uno schema del sistema ideato.

Come motore termico è stato adottato un diesel commerciale (Mcr: 147 kW @ 2.700 giri/min) funzionante alla velocità costante di 1.800 giri/min.

Il sistema è stato concepito e dimensionato tenendo presenti le seguenti finalità:

1. capacità di erogare la potenza necessaria per tutto l'arco del ciclo di lavoro;
2. disporre in tutte le fasi dell'energia necessaria all'avanzamento;
3. avere, a corsa completata, una quantità di energia immagazzinata nelle batterie almeno pari a quella presente all'inizio della corsa.

In tal modo il vaporetto si rende del tutto indipendente da fonti esterne di energia.

Su questo sistema si è impostata una simulazione di funzionamento secondo i profili di carico caratteristici delle principali linee servite; in altri termini, i profili di carico rilevati a bordo sono stati applicati ad un modello di funzionamento teorico del vaporetto mosso dal sistema ibrido il che ha permesso di prevedere, in una prima fase di va-

**Tabella 4 - Caratteristiche principali della M/N Sibilla**

Lbp = 64,30 m	Motori 2 x Gmt B.230.12
b = 14 m	Mcr = 2 x 1850 kW @ 1100 rpm
T <sub>AV</sub> = 2,87 m; T <sub>AD</sub> = 3,47	rapporto di riduzione = 3,846:1
Δ = 1.785 t	
v = 18 kn	Eliche: 2 a 4 pale (P <sub>0,7</sub> x D = 2,437 x 2,4)

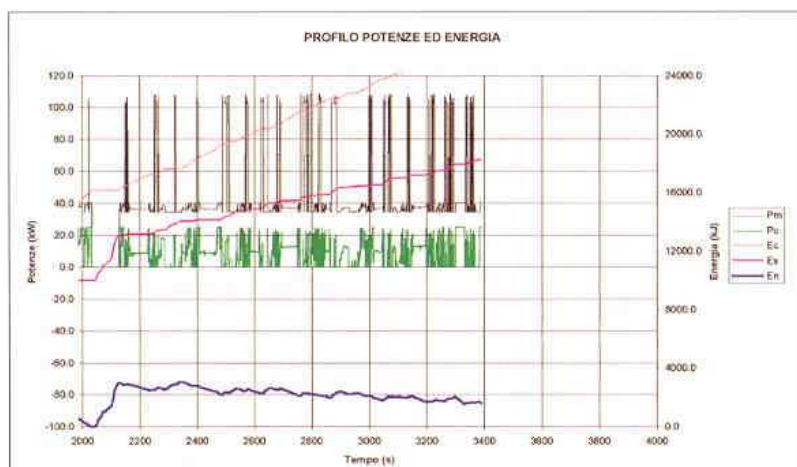


Figura 12 - Simulazione linea 1 con vaporetto ibrido: seconda parte corsa andata (S. Silvestro-P.le Roma)

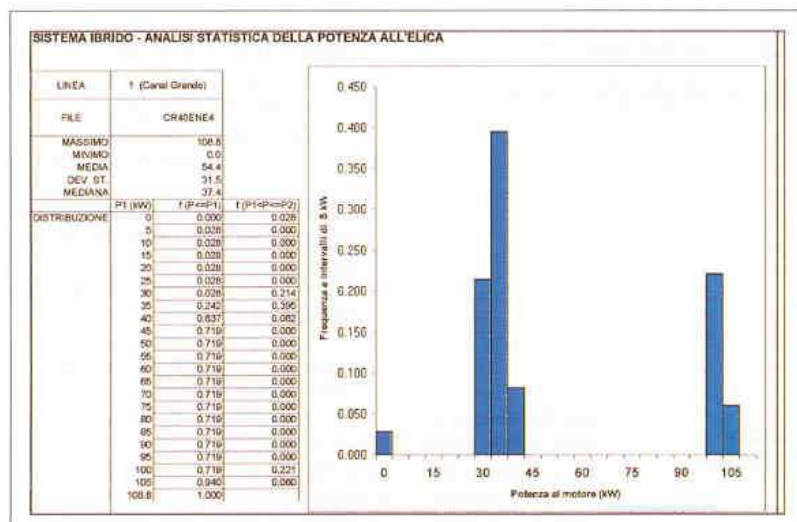


Figura 13 - Sistema ibrido: analisi potenza all'elica

lutazione, gli esiti di una eventuale applicazione al vero.

Nelle Figure 11, 12 e 13, a titolo di esempio, sono mostrati gli andamenti dei principali parametri coinvolti nel funzionamento del sistema ibrido e cioè quelli della potenza al motore, all'elica e le energie coinvolte nel ciclo oltre alle relative statistiche; maggiori dettagli sull'argomento possono essere tratti dai lavori in bibliografia [2, 3, 4, 5].

La Tabella 3 mostra i consumi presumibili per il sistema ibrido nelle condizioni di esercizio caratteristiche di una corsa sulla linea 1 e li paragona con quelli del sistema attuale.

Dai dati è possibile trarre le conclusioni che seguono.

- Il sistema proposto è in grado di compiere la missione caratteristica

dell'attuale vaporetto con le stesse prestazioni ed è completamente autonomo dal punto di vista energetico nel senso che non si rende necessaria alcuna fase di carica delle batterie a spese di fonti energetiche esterne all'imbarcazione.

- Il consumo specifico si riduce in maniera sensibile anche tenendo conto delle ripetute trasformazioni di energia che avvengono in un simile sistema. In altri termini, il decremento di rendimento relativo ai rendimenti dei vari componenti presenti nel sistema viene del tutto riassorbito dal miglioramento delle condizioni di funzionamento del motore.

- Le emissioni allo scarico sono sostanzialmente ridotte dal nuovo ciclo di lavoro. Le quantità emesse di CO, HC, e particolato diminuiscono per effetto del funzionamento più regolare tipico del sistema alternativo proposto. Gli ossidi di azoto non subiscono invece riduzioni dovute alle migliorate condizioni di funzionamento; c'è da dire però che è pensabile l'adozione di una semplice marmitta catalitica finale la quale, con un sistema funzionante a punto fisso, può ridurre praticamente a zero le emissioni di NO<sub>x</sub>.

L'indagine sinora condotta va integrata con una serie di ulteriori calcoli che la rendano un vero e proprio studio di fattibilità; a questo scopo, gli Enti coinvolti nella ricerca si sono consorziati con altre organizzazioni europee ed hanno presentato due richieste di finanziamento Cee finalizzate allo studio ed alla realizzazione di un progetto di vaporetto alternativo destinato ad operare in laguna con l'obiettivo di ridurre emissioni e consumi.

**Tabella 5 - Grandezze misurate durante la campagna di prove sulla M/N Sibilla e relativi sensori**

Grandezza da rilevare	Sensore
temperature gas di scarico (DS e SN)	termocoppie tipo "K"
temperature carica aria	termocoppie tipo "J"
temperature acqua raffreddamento prima motore (DS e SN)	termocoppie tipo "J"
temperature acqua raffreddamento dopo motore (DS e SN)	termocoppie tipo "J"
temperatura combustibile	termocoppia tipo "J"
consumo combustibile	flussimetro volumetrico
numero di giri motori (DS e SN)	pick up e ruota fonica
coppie motori (DS e SN)	torsiometri CeTeNa
posizioni leva combustibile dopo regolatore (DS e SN)	potenziometri angolari
passi eliche (DS e SN)	potenziometri angolari
velocità nave	GPS differenziale

L'esperienza nel golfo di Napoli

La zona marittima che comprende i golfi di Napoli e Salerno oltre alle isole di Procida, Ischia e Capri può essere considerata una delle più trafficate al mondo con tutti i problemi di gestione del territorio che ciò comporta, dalla semplice razionalizzazione del traffico alla protezione dell'ambiente prossimo alle zone portuali (in quanto immerse in realtà cittadine ad alta densità abitativa) all'esigenza di ottimizzazione economica dei trasporti. Per questi motivi il Din e l'Im in collaborazione con l'Istituto "G. Simeon" di Napoli hanno deciso di interessarsi attivamente del problema iniziando una attività di ricerca e studio sulle condizioni di funzionamento degli apparati motore delle navi operanti nell'ambito descritto e sulle condizioni di navigazione in quest'area. Per gentile concessione della società CaReMar, che gestisce parte del traffico da e per le isole napoletane, una nave traghetto (le cui principali caratteristiche sono riportate in Tabella 4) è stata strumentata in modo completo per consentire il rilievo dei parametri riportati nella Tabella 5. Sulla M/N *Sibilla* sono state compiute ben 21 corse complete da Napoli e Pozzuoli per le isole del golfo in varie condizioni di carico (registrate al pari delle altre caratteristiche di esercizio). Come esempio dei risultati conseguiti, le Figure 14 e 15 mostrano i valori di potenza (motore destro, sinistro e sbilanciamento ossia differenza tra l'erogazione di potenza dei due motori) e di velocità nave misurata con il GPS differenziale (in collaborazione con l'Istituto di navigazione "G. Simeon" di Napoli) nei tratti Napoli-Procida e Procida-Ischia) in cui sono riportate le distribuzioni del consumo specifico e delle emissioni specifiche degli ossidi di azoto (dal solo motore di dritta) in funzione della potenza erogata. La finalità

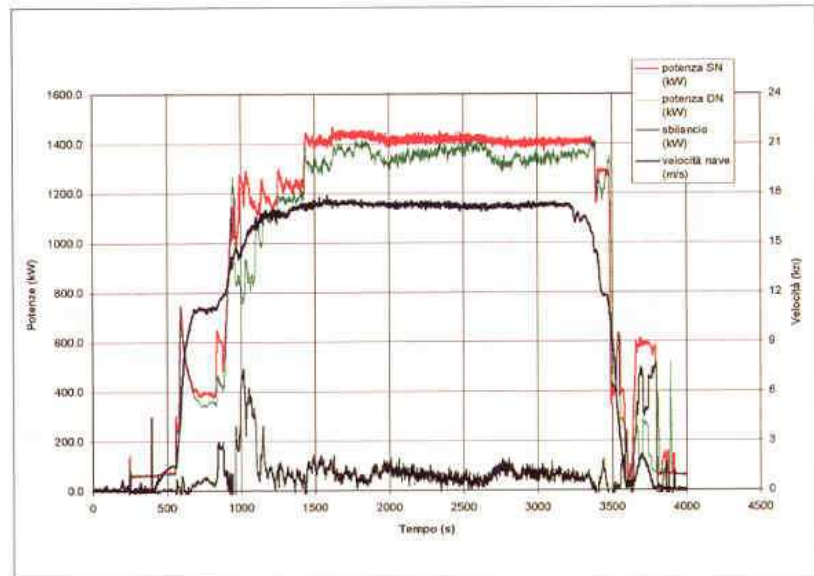


Figura 14 - Esempio di rilievi di potenza e velocità nel tratto Napoli-Procida

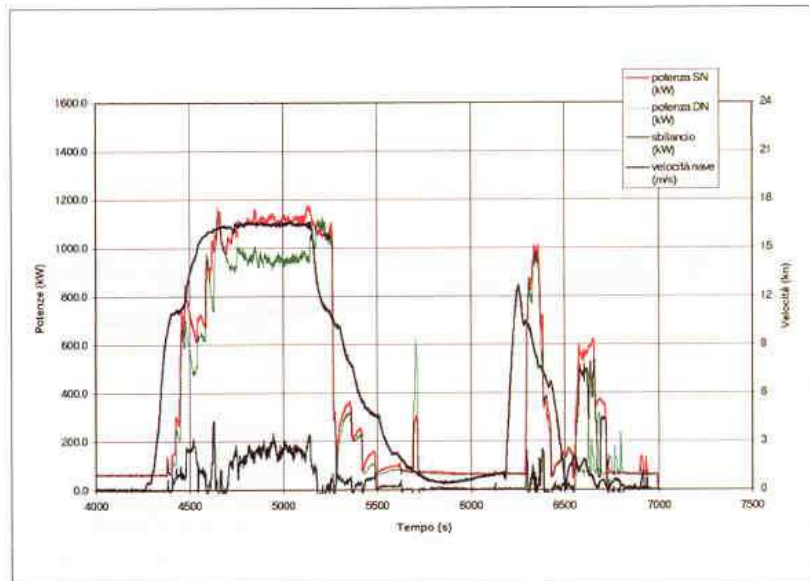


Figura 15 - Esempio di rilievi di potenza e velocità nel tratto Procida-Ischia

di questo filone di ricerca consiste sostanzialmente nel tentare una correlazione tra le condizioni di navigazione (dovute al variare del carico trasportato, delle condizioni meteomarine, dello sporcamento di carena) e le prestazioni in termini di velocità di esercizio, di consumi specifici ed emissioni allo scarico. Si prevede di estendere questa indagine alle varie categorie di navi operanti nel golfo in modo da rendere il più possibile continua la monitoraggio delle navi; è in programma, inoltre, l'estensione dell'esperien-

za a bordo dei mezzi veloci per i quali, accanto all'interesse nei confronti dei parametri di propulsione e navigazione, è particolarmente importante la conoscenza delle accelerazioni verticali e di quei parametri che contribuiscono a definire la qualità della tenuta al mare.

Bibliografia

[1] F. Balsamo, A. Paciolla, F. Quaranta, *Un sistema per la misura a*

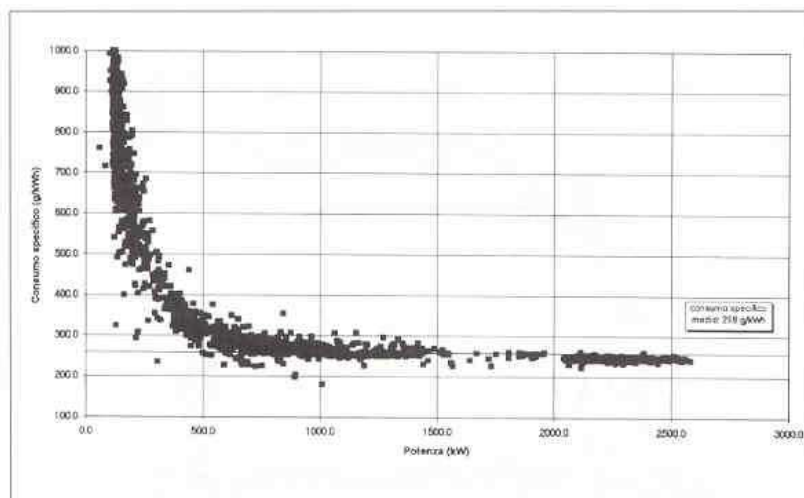


Figura 16 - Rilievi di consumo specifico (tratto Napoli-Procida-Ischia)

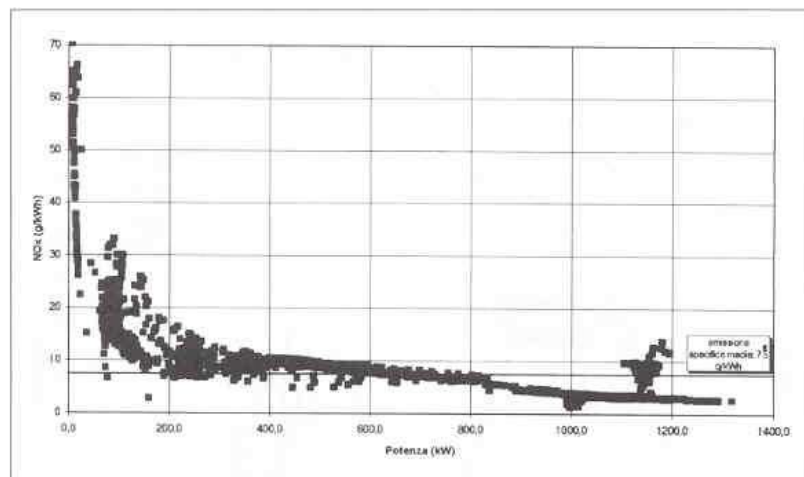


Figura 17 - Rilievi di NO<sub>x</sub> (tratto Napoli-Procida-Ischia; motore DS)

- bordo dei parametri caratteristici del funzionamento dell'apparato motore e della navigazione, Napoli, Dipartimento di Ingegneria Navale, 1994.
- [2] F. Balsamo, A. Brighenti, G. Landri, A. Paciolla, F. Quaranta, *Experimentation and measurements on the propulsion plant of a water bus in service on the "Canal Grande" in Venice*, in Journal of Polish Cimac, International Council on combustion engines, Warsaw 23-24/5/1994, Warsaw, Cimac, 1994 vol. 1, n. 1, pag. 5-17.
- [3] F. Balsamo, A. Brighenti, G. Landri, A. Paciolla, F. Quaranta, *Sistema ibrido per vaporetto: studio di pre-fattibilità*, Napoli, Istituto Motori del Cnr (paper n. 94RR8222), 1994.
- [4] F. Balsamo, A. Brighenti, G. Landri, A. Paciolla, F. Quaranta, *The propulsion of public transport vessels in coastal and inner waters: working data acquisition, elaboration and study of alternative solutions*, in Atti del Congresso Nav 94, Roma 5 - 7/10/94.
- [5] F. Balsamo, A. Brighenti, G. Landri, A. Paciolla, F. Quaranta, *The propulsion of coastal and inland water transportation vessels - Working data acquisition and preliminary design of innovative systems to reduce pollutant emissions*, paper D75 - in 21<sup>th</sup> International Congress on combustion engines Interlaken, Cimac, 1995.