



SCUOLA DOTTORALE / DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA (SDI)

CICLO DEL CORSO DI DOTTORATO
XXIII

Titolo della tesi

**Sviluppo di un Modello teorico e computazionale per l'analisi di propulsori e
velivoli ad ala rotante, basato su tecniche di sintesi di sistemi complessi
mediante reti neurali.**

Nome e Cognome del Dottorando

Danilo Calcagni

A.A.2010/2011

Docente Guida/Tutor: Prof. **Massimo Gennaretti**

Coordinatore: Prof. **Edoardo Bemporad**

Indice

Elenco delle Figure	15
Elenco delle Tabelle	15
1 Introduzione	16
1.1 Scopo della tesi	18
1.2 Contesto del presente lavoro	19
1.3 Configurazioni propulsive di interesse	21
1.4 Sommario della tesi	23
2 Procedura di design e tecniche di ottimizzazione	25
2.1 Tecniche di progettazione	26
2.2 Tecnica di design	28
2.2.1 Design di base	29
2.2.2 Design di finitura	29
2.3 Progettazione ottimizzata	30
2.3.1 Ottimizzazione basata su ricerca parametrica	33
2.3.2 Ottimizzazione basata su algoritmi genetici	35
3 Modello di sintesi di sistemi complessi	38
3.1 Cenno ai modelli esistenti per la sintesi di sistemi complessi	38
3.2 Modello Teorico Rete Neurale	40
3.3 Specifiche rete neurale: architettura ed algoritmo di addestramento	44
3.4 Verifica del modello di rete neurale: definizione del Test-Case	44
3.4.1 Verifica dei risultati mediante uso del validation set	46
3.4.2 Verifica dei risultati mediante comparazione con altri modelli di rete neurale	47

4	Solutore Aero/Idrodinamico	52
4.1	Modelli per l'analisi aero/idrodinamica	52
4.2	Metodo delle equazioni integrali per lo studio di flussi potenziali incompressibili non stazionari	55
4.2.1	Formulazione differenziale; condizioni al contorno sul corpo	55
4.2.2	Condizioni al contorno sulla scia	57
4.2.3	Legame tra la discontinuità del potenziale sulla scia e la distribuzione del potenziale sul corpo	57
4.3	Discretizzazione del problema	58
4.4	Verifica e validazione del solutore aero/idrodinamico: Eliche in mantello	61
5	Applicazione e Risultati	65
5.1	Imbarcazione di media stazza marciante in corsa libera	66
5.2	Specifiche del progetto: Design di base	68
5.3	Specifiche del progetto: Design di finitura	69
5.4	Generazione griglie geometriche di calcolo dell' elica	71
5.5	Generazione dataset di base della superficie di risposta del sistema	72
5.6	Applicazione: ottimizzazione di forma del propulsore	73
5.7	Risultati Design di base	74
5.7.1	Elica della famiglia <i>E1622-ser</i> in configurazione isolata	75
5.7.2	Elica della famiglia <i>E1622-ser</i> in configurazione intubata	79
5.8	Risultati Design di finitura	82
5.9	Confronto configurazioni	82
6	Conclusioni	96
A	Risultati di compendio della tecnica di design	105
A.1	Analisi di sensibilità delle variabili di progetto	105
A.1.1	Eliche in configurazione isolata	105
A.1.2	Eliche in configurazione intubata	106
A.2	Altri risultati di ottimizzazione di base	115
A.2.1	Elica della famiglia Wageningen B-series in configurazione isolata	116
A.2.2	Elica della serie Wageningen Ka in configurazione intubata	117
A.2.3	Elica della famiglia <i>E1622-ser</i> in configurazione intubata: base dati numerico-sperimentali	120

B Rete Neurale	123
B.1 Calcolo dell'errore sul singolo neurone: tecnica di back-propagation	123
B.2 Verifica delle prestazioni della rete neurale	124
B.2.1 influenza del numero di variabili di input sulle prestazioni della rete: P/D e J	126
B.2.2 influenza del numero di variabili di input sulle prestazioni della rete: EAR , P/D e J	126
B.2.3 influenza del numero di punti utili per l'addestramento sulle prestazioni della rete per $Z = 4$: J	127
B.2.4 influenza del numero di punti utili per l'addestramento sulle prestazioni della rete per $Z = 4$: A_e/A_0	129
B.2.5 analisi dell'influenza dei parametri numero di neuroni e numero di strati sulle prestazioni della rete per $Z = 4$	132
B.2.6 analisi influenza del numero di dati utili di addestramento: restart ed ampliamento dataset . .	135
B.2.7 incremento accuratezza in presenza di errori sulle grandezze di output localizzati	135
 C Approfondimento a supporto del modello agli elementi di contorno	 138
C.1 Uso della funzione di Green, soluzione fondamentale nello spazio a tre dimensioni	138
C.2 Equazione della velocità indotta nei punti interni al campo	140
 D Stima delle prestazioni di una carena	 141
 E Set-up sperimentale: carena CNR-INSEAN C2503	 144

Elenco delle figure

1.1	Rappresentazione dell'analisi di configurazioni propulsive ad uso di una tecnica di design basata su modelli per la sintesi di sistemi complessi.	17
2.1	Esempio di superficie di risposta del sistema, sulla quale viene identificata una regione di punti rappresentativi di configurazioni compatibili con i vincoli del problema ed una spezzata, luogo dei punti di massimo locale.	34
2.2	Schema risolutivo della ricerca della soluzione ottima mediante una tecnica mista di variazione sistematica/vincolata delle variabili di design.	34
2.3	Esempio di diagramma di flusso di un modello di ottimizzazione basato sull'uso di algoritmi genetici per la ricerca della soluzione del problema.	37
3.1	Schema tipico di una rete neurale (NN o ANN) multistrato di tipo <i>feed-forward</i> . Sinistra: architettura generale della rete. Destra: particolare della struttura dei singoli neuroni	42
3.2	Caso completo. Verifica risultati NN per $Z = 5$ ed $A_e/A_0 = 0.60$: vista 3D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.	48
3.3	Caso completo. Verifica risultati NN per $Z = 5$ ed $A_e/A_0 = 0.70$ e sottocasi: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.	48
3.4	Confronto tra il solutore ANN CNR-INSEAN e Neurosolution. Sinistra: schema della rete neurale considerata. Destra: schema del dataset di test.	49
3.5	Caso completo. Mappa 3D dell'errore commesso da diversi solutori ANN per il sottocaso relativo ad $Z = 4$ ed $A_e/A_0 = 0.85$: coefficiente di spinta. Sinistra: ANN CNR-INSEAN. Destra: Neurosolution.	50
3.6	Caso completo. Mappa 3D dell'errore commesso da diversi solutori ANN per il sottocaso relativo ad $Z = 4$ ed $A_e/A_0 = 0.85$: coefficiente di coppia. Sinistra: ANN CNR-INSEAN. Destra: Neurosolution.	50
3.7	Caso completo. Andamento coefficiente di spinta il sottocaso relativo ad $Z = 4$ ed $A_e/A_0 = 0.85$ $P/D = [0.6; 1.0; 1.4]$ per diversi solutori ANN. Sinistra: ANN CNR-INSEAN. Destra: Neurosolution.	51

4.1	Esempio di discretizzazione a pannelli di una elica e della sua scia.	59
4.2	Elica CNR-INSEAN E1622: caratteristiche al variare del coefficiente di avanzo in condizioni di flusso uniforme non cavitante. In alto: curva di elica isolata. In basso a sinistra: contributo elica/mantello alla spinta del propulsore. In basso a destra: prestazioni propulsore in condizione di flusso confinato da mantello	62
4.3	Elica CNR-INSEAN E1622: simulazione idrodinamica delle propulsore in condizioni di flusso uniforme cavitante; $J = 0.20$, $\sigma_N = 0.35$. Sinistra: vista 3D magnificata dell'elica cavitante. Destra: mappa del coefficiente di pressione C_p sulla superficie del ventre elica.	63
4.4	Elica Wageningen $K_a4 - 70$ di passo pari a $P/D = 1.2$ in duct 19A: caratteristiche al variare del coefficiente di avanzo in condizioni di flusso uniforme non cavitante, confinato da mantello; confronto numerico-sperimentale. Sinistra: risultati numerici mediante codice di analisi idrodinamica. Destra: risultati numerici con correzione da dati sperimentali.	63
5.1	Modello di carena CNR-INSEAN C2503 equipaggiata con elica intubata CNR-INSEAN E1622. Sinistra: particolare del modello preparato per la prova di autopropulsione. Destra: particolare del propulsore durante la prova di elica isolata.	67
5.2	Immagini al vero dell'imbarcazione e del propulsore presenti presso il CNR-INSEAN come modelli di carena C2503 (sinistra) ed di elica E1622 (destra).	67
5.3	Schema di funzionamento dello strumento sviluppato in tale lavoro per la determinazione automatica di un rotore ottimizzato.	71
5.4	Schema di funzionamento della rete neurale utilizzata dall'ottimizzatore per la ricerca della soluzione del problema in esame.	74
5.5	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia Wageningen E1622 – Series. Risultati ottenuti su base dati numerica. Andamento dell'efficienza ottima al variare del rapporto passo/diametro.	76
5.6	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia Wageningen E1622 – Series. Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: vista 3D dell'efficienza ottima al variare del rapporto passo/diametro e del rapporto di area espansa. Destra: vista 2D dell'efficienza ottima al variare del rapporto passo/diametro.	76
5.7	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia E1622 – Series. Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: andamento dell'efficienza ottima al variare del numero di pale. Destra: andamento del rapporto passo/diametro ottimo al variare del numero di pale.	77

5.8	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: andamento del diametro ottimo al variare del numero di pale. Destra: andamento della velocità nave al variare del numero di pale.	77
5.9	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Risultati ottenuti su base dati numerica. Rapporto di area espansa al variare del numero di pale.	78
5.10	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Risultati ottenuti su base dati numerica. Andamento dell'efficienza ottima al variare del rapporto passo/diametro, parametrizzata in funzione del rapporto di area espansa.	80
5.11	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: andamento dell'efficienza ottima al variare del numero di pale. Destra: andamento del rapporto passo/diametro ottimo al variare del numero di pale.	80
5.12	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: andamento del diametro ottimo al variare del numero di pale. Destra: andamento della velocità nave al variare del numero di pale.	81
5.13	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Risultati ottenuti su base dati numerica. Rapporto di area espansa al variare del numero di pale.	81
5.14	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche della famiglia <i>E1622 – Series</i> , nell'intorno della configurazione determinata nella fase di ottimizzazione di base. Risultati ottenuti su base dati numerica riguardanti la condizione di flusso libero. Sinistra: distribuzione radiale di passo; Destra: distribuzione radiale di corda.	83
5.15	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche della famiglia <i>E1622 – Series</i> , nell'intorno della configurazione determinata nella fase di ottimizzazione di base. Risultati ottenuti su base dati numerica riguardanti la condizione di flusso libero. Sinistra: distribuzione radiale di skew; Destra: distribuzione radiale di rake.	83
5.16	Ottimizzazione di base di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche convenzionali isolate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: coefficiente di spinta e coppia al variare del coefficiente di avanzo; Destra: efficienza al variare del coefficiente di avanzo.	84

5.17	Ottimizzazione di base di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia <i>E1622–Series</i> . Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie palare per l'elica <i>E1622</i> originale in configurazione isolata. A sinistra $J=0.514$; a destra $J=0.549$	84
5.18	Ottimizzazione di base di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia <i>E1622–Series</i> . Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie palare per l'elica ottimizzata in configurazione isolata ($J=0.549$). Sinistra: soluzione del problema di ottimizzazione di base; Destra: soluzione del problema di ottimizzazione di finitura.	85
5.19	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Distribuzioni radiali di passo (sinistra) e corda (destra) Confronto tra elica originale ed eliche da ottimizzazione.	86
5.20	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Geometrie delle eliche risultanti sovrapposte all'elica di riferimento. Sinistra: vista 3D. Destra: vista 2D sul piano trasversale all'asse di rotazione.	86
5.21	Ottimizzazione di base di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: coefficiente di spinta e coppia al variare del coefficiente di avanzo; Destra: efficienza al variare del coefficiente di avanzo.	87
5.22	Ottimizzazione di base di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie palare per l'elica <i>E1622</i> originale in configurazione intubata. A sinistra $J=0.514$; a destra $J=0.578$	87
5.23	Ottimizzazione di base di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie palare per l'elica ottimizzata in configurazione intubata ($J=0.578$). Sinistra: soluzione del problema di ottimizzazione di base; Destra: soluzione del problema di ottimizzazione di finitura. . . .	88
5.24	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Distribuzioni radiali di passo (sinistra) e corda (destra) Confronto tra elica originale ed eliche da ottimizzazione.	88
5.25	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Geometrie delle eliche risultanti sovrapposte all'elica di riferimento. Sinistra: vista 3D. Destra: vista 2D sul piano trasversale all'asse di rotazione.	89
5.26	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Analisi di sensibilità dell'efficienza rispetto all'area espansa ed al passo/diametro dell'elica, intorno alla configurazione determinata nella fase di design di finitura dell'elica intubata ($J=0.578$).	90

5.27	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia <i>E1622 – Series</i> . Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: efficienza al variare del coefficiente di avanzo; Destra: distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie palare per l'elica ottimizzata con vincolo $Z = 4$ ($J=0.578$).	91
A.1	Elica convenzionale di base E1622 e sua derivata equivalente E1622-series. Sinistra: coefficiente di spinta al variare del coefficiente di avanzo. Destra: efficienza al variare del coefficiente di avanzo.	106
A.2	Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione del numero di pale sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.	107
A.3	Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione del rapporto di area espansa sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.	107
A.4	Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione del passo sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.	108
A.5	Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione contemporanea del numero di pale, del rapporto di area espansa e del passo sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.	108
A.6	Elica convenzionale di base E1622 e sua derivata equivalente E1622-series. Sinistra: coefficiente di spinta al variare del coefficiente di avanzo. Destra: efficienza al variare del coefficiente di avanzo.	109
A.7	Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione del numero di pale sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.	110
A.8	Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione del rapporto di area espansa sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.	110
A.9	Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione del passo sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.	111
A.10	Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione contemporanea del numero di pale, del coefficiente di area espansa e del passo sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.	111
A.11	Analisi di sensibilità condotta nell'intorno di un punto rappresentativo di un'elica intubata della famiglia <i>E1622 – ser</i> . Effetto di una perturbazione del passo. Sinistra: andamento delle diverse distribuzioni radiali di passo; Destra: effetto delle differenti distribuzioni sulle prestazioni del propulsore intubato.	112
A.12	Analisi di sensibilità condotta nell'intorno di un punto rappresentativo di un'elica intubata della famiglia <i>E1622 – ser</i> . Effetto di una perturbazione sulla corda. Sinistra: andamento delle diverse distribuzioni radiali di corda; Destra: effetto delle differenti distribuzioni sulle prestazioni del propulsore intubato.	112

A.13	Analisi di sensibilità condotta nell'intorno di un punto rappresentativo di un'elica intubata della famiglia <i>E1622 – ser.</i> Effetto di una perturbazione dello skew. Sinistra: andamento delle diverse distribuzioni radiali di skew; Destra: effetto delle differenti distribuzioni sulle prestazioni del propulsore intubato.	113
A.14	Analisi di sensibilità condotta nell'intorno di un punto rappresentativo di un'elica intubata della famiglia <i>E1622 – ser.</i> Effetto di una perturbazione del camber. Sinistra: andamento delle diverse distribuzioni radiali di curvatura delle sezioni; Destra: effetto delle differenti distribuzioni sulle prestazioni del propulsore intubato.	113
A.15	Analisi di sensibilità conodotta nell'intorno di un punto rappresentativo di un'elica intubata della famiglia <i>E1622 – ser.</i> Effetto di una perturbazione del rake. Sinistra: andamento delle diverse distribuzioni radiali di abbattimento; Destra: effetto delle differenti distribuzioni sulle prestazioni del propulsore intubato.	114
A.16	Analisi di sensibilità condotta nell'intorno di un punto rappresentativo di un'elica intubata della famiglia <i>E1622 – ser.</i> Effetto di una perturbazione della corda e dello skew. Sinistra: andamento delle diverse distribuzioni radiali di corda; Destra: andamento delle diverse distribuzioni radiali di skew.	114
A.17	Analisi di sensibilità condotta nell'intorno di un punto rappresentativo di un'elica intubata della famiglia <i>E1622 – ser.</i> Effetto di una perturbazione del rake. Sinistra: analisi con ugual segno di perturbazione corda/skew; Destra: analisi con segno discorde di perturbazione di corda/skew.	115
A.18	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia <i>E1622 – Series</i> , nell'intorno della configurazione scelta a riferimento per la verifica dell'algorithmo dedicato all'ottimizzazione di finitura. Risultati ottenuti su base dati numerica riguardanti la condizione di flusso libero. Sinistra: efficienza al variare della modifica su corda (skew) e rake, parametrizzata rispetto al passo.; Destra: efficienza al variare del passo.	116
A.19	Schema risolutivo di ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche convenzionali della famiglia Wageningen <i>B – Series</i>	117
A.20	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche convenzionali della famiglia Wageningen <i>B – Series</i> . Andamento dell'efficienza ottima al variare del numero di pale. Sinistra: risultati ottenuti su base dati numerica. Destra: risultati ottenuti su base dati sperimentale.	117
A.21	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche convenzionali della famiglia Wageningen <i>B – Series</i> . Sinistra: Andamento del diametro ottimo al variare del numero di pale. Destra: Andamento della velocità nave al variare del numero di pale.	118
A.22	Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche convenzionali della famiglia Wageningen <i>B – Series</i> . Rapporto di area espansa al variare del numero di pale.	118

A.23 Schema risolutivo di ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche in mantello mediante l'uso di una doppia rete neurale.	119
A.24 Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche in mantello della famiglia Wageningen $K_a - Series4 - 070$ in duct 19A. Sinistra: Andamento dell'efficienza al variare del rapporto P/D . Destra: Andamento del diametro ottimo al variare del rapporto P/D	119
A.25 Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche in mantello della famiglia Wageningen $K_a - Series$ in duct 19A. Sinistra: Andamento della velocità nave al variare del rapporto P/D . Destra: Andamento del rapporto di area espansa al variare del rapporto P/D	120
A.26 Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche in mantello simili alla CNR-INSEAN E1622. Soluzione puramente numerica. Sinistra: Andamento dell'efficienza al variare del rapporto P/D . Destra: Andamento del diametro ottimo al variare del rapporto P/D	121
A.27 Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche in mantello simili alla CNR-INSEAN E1622. Soluzione puramente numerica. Sinistra: Andamento della velocità nave al variare del rapporto P/D . Destra: Andamento del rapporto di area espansa al variare del rapporto P/D	121
A.28 Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche in mantello simili alla CNR-INSEAN E1622. Soluzione ibrida numerico-sperimentale. Sinistra: Andamento dell'efficienza al variare del rapporto P/D . Destra: Andamento del diametro ottimo al variare del rapporto P/D	122
A.29 Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche in mantello simili alla CNR-INSEAN E1622. Soluzione ibrida numerico-sperimentale. Sinistra: Andamento della velocità nave al variare del rapporto P/D . Destra: Andamento del rapporto di area espansa al variare del rapporto P/D	122
B.1 Caso $Z = 4$; $A_e/A_0 = 0.40$. Verifica risultati NN: vista 2D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.	126
B.2 Caso $Z = 4$; $A_e/A_0 = 0.40$. Verifica risultati NN: vista 3D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.	127
B.3 Caso $Z = 4$; $A_E/A_0 = 0.40$. Verifica risultati NN: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.	127
B.4 Caso $Z = 3$. Verifica risultati NN per $A_e/A_0 = 0.50$: vista 2D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.	128
B.5 Caso $Z = 3$. Verifica risultati NN per $A_e/A_0 = 0.50$: vista 3D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.	128
B.6 Caso $Z = 3$. Verifica risultati NN per $A_e/A_0 = 0.50$: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.	129

B.7	Caso $Z = 4$. Verifica risultati NN per $A_e/A_0 = 0.70$ e sottocasi: vista 3D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.	129
B.8	Caso $Z = 4$. Verifica risultati NN per $A_e/A_0 = 0.70$ e sottocasi: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.	130
B.9	Caso $Z = 4$ con dati mancanti relativi ad $A_e/A_0 = 0.70$. Validazione risultati NN per $A_e/A_0 = 0.70$: vista 3D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.	131
B.10	Caso $Z = 4$ con dati mancanti relativi ad $A_e/A_0 = 0.70$. Validazione risultati NN per $A_e/A_0 = 0.70$: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.	131
B.11	Caso $Z = 4$ con dati mancanti relativi ad $A_e/A_0 = 0.40, 0.55; 1.00$. Validazione risultati NN per $A_e/A_0 = 0.55$: vista 3D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.	132
B.12	Caso $Z = 4$ con dati mancanti relativi ad $A_e/A_0 = 0.40, 0.55; 1.00$. Validazione risultati NN per $A_e/A_0 = 0.55$: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.	132
B.13	Caso $Z = 4$ con dati mancanti relativi ad $A_e/A_0 = 1.00$. Validazione risultati NN per $A_e/A_0 = 1.00$: vista 3D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.	133
B.14	Caso $Z = 4$ con dati mancanti relativi ad $A_e/A_0 = 1.00$. Validazione risultati NN per $A_e/A_0 = 1.00$: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.	133
B.15	Caso $Z = 4$. Coefficiente di spinta. Effetto del numero di neuroni. Sinistra: 1 strato nascosto; centro: 2 strati nascosti; destra: 3 strati nascosti.	134
B.16	Caso $Z = 4$. Efficienza. Effetto del numero di neuroni. Sinistra: 1 strato nascosto; centro: 2 strati nascosti; destra: 3 strati nascosti.	134
B.17	Caso $Z = 4$. Effetto del numero di neuroni per strato e del numero degli strati nascosti della rete. Andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.	134
B.18	Caso $Z = 4$. Effetto dell'inserimento di nuovi dati di addestramento sulla capacità di simulazione della rete neurale (sinistra: coefficiente di spinta) e sulla velocità di addestramento (destra: andamento del residuo di addestramento).	136
B.19	Caso $Z = 6$. Verifica risultati NN per $A_e/A_0 = 0.95$. Sinistra: andamento del coeff. di spinta. Centro: andamento dell'efficienza per il sottocaso $P/D = 1.2$. Destra: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.	136
B.20	Caso $Z = 6$. Verifica risultati NN per $A_e/A_0 = 0.95$: confronto tra reti a 13 e 18 neuroni per singolo strato nascosto. Sinistra: andamento del coeff. di spinta. Centro: andamento dell'efficienza. Destra: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.	137
E.1	Dettaglio delle fasi di lavorazione della carena CNR-INSEAN C2503.	145

E.2	Dettaglio del modello di elica CNR-INSEAN <i>E1622</i> , utilizzato nella campagna sperimentale relativa alla carena C2503.	146
E.3	Foglio relativo alla prova di resistenza, nella campagna sperimentale relativa alla carena C2503. . . .	146
E.4	Foglio relativo alla prova di autopropulsione, nella campagna sperimentale relativa alla carena C2503.	147
E.5	Foglio relativo alle prestazioni del propulsore CNR-INSEAN <i>E1622</i> , in configurazione di elica isolata, nella campagna sperimentale relativa alla carena C2503.	148
E.6	Foglio relativo alle prestazioni del propulsore CNR-INSEAN <i>E1622</i> , in configurazione di elica intubata, nella campagna sperimentale relativa alla carena C2503.	149

Elenco delle tabelle

3.1	Tabella riassuntiva della serie sistematica Wageningen “B-Series”	45
5.1	Tabella riassuntiva dei casi test	74
5.2	Caratteristiche geometriche e prestazionali delle eliche in configurazione isolata a valle della fase di design di base. ¹ : confronto a parità di punto di lavoro; ² : confronto tra punti di lavori equivalenti dal punto di vista dei vincoli su spinta e coppia.	92
5.3	Caratteristiche geometriche e prestazionali delle eliche in configurazione intubata a valle della fase di design di base. ¹ : confronto a parità di punto di lavoro; ² : confronto tra punti di lavori equivalenti dal punto di vista dei vincoli su spinta e coppia.	93
5.4	Caratteristiche geometriche e prestazionali delle eliche in configurazione isolata a valle della fase di design di finitura. ¹ : confronto a parità di punto di lavoro; ² : confronto tra punti di lavori equivalenti dal punto di vista dei vincoli su spinta e coppia.	94
5.5	Caratteristiche geometriche e prestazionali delle eliche in configurazione intubata a valle della fase di design di finitura. ¹ : confronto a parità di punto di lavoro; ² : confronto tra punti di lavori equivalenti dal punto di vista dei vincoli su spinta e coppia.	95
B.1	Andamento dell’errore commesso dalla rete neurale al variare dei parametri di base.	135

Capitolo 1

Introduzione

Nel corso degli ultimi decenni le tecniche per la progettazione di forma di propulsori destinati al campo aeronautico/navale sono in continua evoluzione.

In virtù delle molteplici e differenti condizioni operative, il progettista ha bisogno di strumenti capaci di adattarsi ad esse senza perdere di accuratezza nelle prestazioni predette, mantenendo elevata la velocità di esecuzione. Strumenti numerici sono continuamente sviluppati come supporto alla progettazione di tali propulsori ed i modelli teorici che sottendono tali strumenti sono sempre più complessi.

La principale causa risiede nello sviluppo di calcolatori informatici sempre più elaborati e veloci che permettono l'impiego di strumenti matematici sempre più complessi incrementando l'accuratezza dei risultati con minimo o nullo aggravio in termini di risorse.

Sebbene questi strumenti siano sempre più accessibili, le tecniche standard sviluppate precedentemente in assenza di strumenti informatici di supporto sono tuttora impiegate in molti campi, sotto particolari condizioni.

Tali tecniche fanno riferimento a diagrammi sperimentali e su relazioni empiriche per il calcolo delle prestazioni del propulsore in esame.

Tuttora, in campo navale piuttosto che in campo aeronautico, sono adottate tali tecniche, specialmente per le piccole-medie imprese armatoriali, per le quali il ritorno temporale dei costi di progettazione, accedendo alle più moderne tecniche, sarebbe troppo elevato.

In conseguenza di ciò anche la capacità nell'investigare la soluzione è limitata nella scelta del numero delle variabili di progetto: parametri globali caratterizzano le diverse configurazioni studiate, così come l'analisi viene condotta su grandezze globali e non direttamente relazionabili con fenomeni fisici locali.

Il presente lavoro si pone come obiettivo primario quello di realizzare uno strumento completamente automatizzato per la progettazione ottimizzata di forma di propulsori aeronautici e navali, basato su modelli teorico/numerici veloci, robusti, ma anche sufficientemente accurati.

Il suo funzionamento si basa sull'uso sinergico di strumenti atti alla modellazione geometrica tridimensionale del-

l'elica, alla simulazione numerica delle prestazioni offerte dal propulsore. Altri strumenti dedicati alla sintesi della superficie di risposta del sistema in esame sono identificati e sviluppati per permettere la ricerca della soluzione ottimale al problema in modo rapido e nei limiti dell'accuratezza propria del simulatore numerico. Una schematica rappresentazione delle fasi descritte si trova in fig. 1.1.

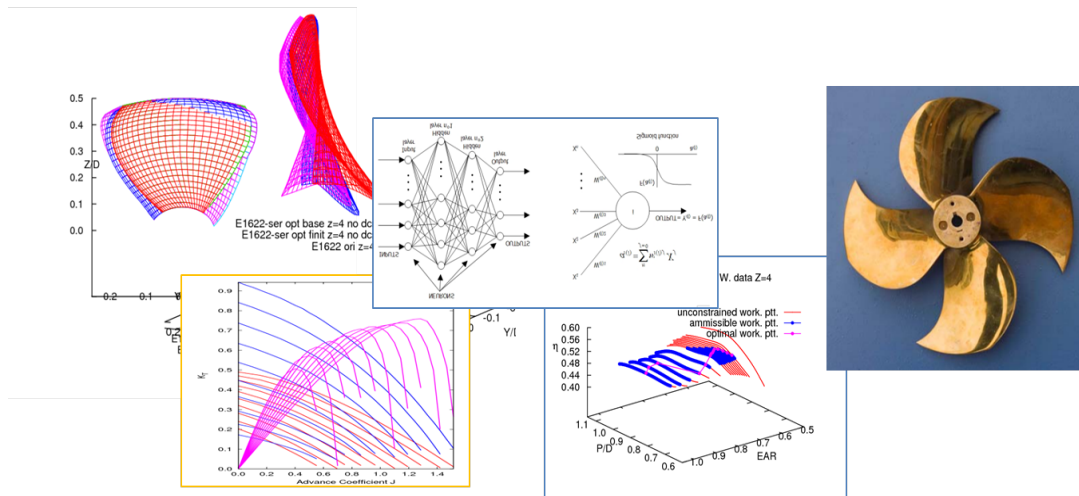


Figura 1.1: Rappresentazione dell'analisi di configurazioni propulsive ad uso di una tecnica di design basata su modelli per la sintesi di sistemi complessi.

Non è obiettivo primario di tale lavoro lo sviluppo delle metodologie per l'analisi aero/idrodinamica in se, quanto il loro sviluppo controllato nell'ottica di utilizzarli in maniera efficiente in un algoritmo per la progettazione. In particolare, il modello teorico che sottende lo strumento per l'analisi idrodinamica del propulsore si basa su una metodologia agli elementi di contorno ¹, valida per lo studio del flusso intorno a corpi portanti rototraslanti ed estesa allo studio di propulsori in configurazione multicorpo (eliche in mantello, controrotanti, eliche in presenza di timone, eliche in tunnel). La tecnica di progettazione è di tipo ottimizzata, a partire da una configurazione base, utilizzata per la costruzione di una serie sistematica di propulsori. Il solutore aero/idrodinamico viene quindi applicato per la predizione delle prestazioni esercitate dalle eliche di detta serie sistematica; il luogo dei punti delle prestazioni in funzione dei parametri caratteristici della configurazione presa in esame forma la superficie di risposta del sistema.

La superficie di risposta del sistema viene quindi sintetizzata per poi essere esplorata successivamente in tempi minimi in modo ricorsivo per la ricerca del punto di soluzione del problema.

Per la sintesi della superficie di risposta del sistema è stata sviluppata una rete neurale di tipo *feed-forward*, addestrata mediante una tecnica di tipo *back-propagation*, mentre l'ottimizzazione è stata performata mediante l'utilizzo di un modello basato su algoritmi genetici ² e sulla ricerca della soluzione secondo una tecnica parametrica.

Nell'ottica di rendere performante la tecnica di design, essa avviene in due fasi distinte sequenziali: di base e di finitura;

¹sviluppata nel corso degli anni passati presso l'Istituto CNR-INSEAN

²sviluppato nel corso degli anni presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica Industriale della Università degli Studi "Roma Tre"

la prima fase è dedicata alla definizione di parametri geometrico/operativi globali del propulsore, mentre alla seconda fase compete la definizione delle distribuzioni radiali delle grandezze geometriche, avendo fissati i parametri globali. All'interno del campo di variabilità dei parametri geometrico/operativi viene ricercata la configurazione che massimizza la funzione obiettivo, soddisfacendo la totalità dei vincoli imposti nel problema. Nell'applicazione considerata in tale lavoro l'efficienza idrodinamica rappresenta la funzione obiettivo, mentre vincoli legati alla spinta ed alla coppia traducono l'esigenza di interfacciare il propulsore con la carena trainata ed il motore primario.

La tecnica di design, benchè richieda, a rigore, una risoluzione di tipo iterativa, viene qui risolta in un singolo passo, poichè obiettivo primario è la validazione della metodologia in se.

I singoli modelli teorico-numeriche che compongono lo strumento di design vengono verificati e validati singolarmente.

Diversi test-case a complessità variabile sono utilizzati come esercizi di design per la validazione della tecnica di design.

Un'applicazione finale basata sulla progettazione, su base dati numerica, di un propulsore destinato ad equipaggiare un'imbarcazione di media stazza è considerata. Per essa vengono considerate due tipologie di propulsore: ad elica isolata convenzionale e ad elica intubata.

Infatti, le eliche intubate sono una delle tipologie propulsive più utilizzate in campo navale e la loro applicazione è in continua espansione per le loro caratteristiche che le rendono soluzioni appetibili in vari campi; a titolo di esempio esse vengono utilizzate in configurazione di manovratori azimuthali (azimuth thrusters), di pompe a getto (pumpjets), oltre che di turbine ad asse orizzontale per lo sfruttamento dell'energia propria delle correnti marine (tidal turbines) ed eoliche (aerogeneratori).

I risultati nelle varie configurazioni vengono confrontate rispetto al propulsore di riferimento.

1.1 Scopo della tesi

Obiettivo della tesi è lo sviluppo di uno strumento automatizzato per la definizione di configurazioni propulsive ottimali sotto opportune condizioni al contorno, mediante lo sviluppo di strumenti matematici accurati e robusti. La metodologia di design sviluppata viene quindi applicata e testata su un caso di interesse pratico; la successiva analisi dei risultati ottenuti completano l'attività svolta in ambito dottorale.

Tale attività si incentra nella costruzione e nella successiva esplorazione di una cosiddetta superficie di risposta di un sistema propulsivo, ovvero nella determinazione delle prestazioni di una famiglia di eliche differenti tra loro nelle caratteristiche geometriche/operative, in linea con quanto mostrato nel lavoro svolto da Kuiper [24]. Questi, una volta definita una serie sistematica di eliche e realizzazione i modelli in scala, ha condotto un'attività sperimentale collezionando i dati prestazionali delle stesse in termini di spinta e coppia al variare delle condizioni operative (velocità di avanzamento e regime di rotazione); successivamente è stata costruita la superficie di risposta delle eliche della famiglia Wageningen. A differenza dell'attività condotta da Kuiper, in tale lavoro, la costruzione di detta superficie avviene sulla base delle prestazioni predette da un modello matematico basato su una tecnica agli elementi di contorno e nell'ampliamento delle grandezze geometriche considerate per la definizione della serie sistematica di eliche; in

tal modo una serie sistematica virtuale viene costruita. Successivamente la superficie di risposta del sistema viene sintetizzata ad opera di una rete neurale, mentre due ottimizzatori basati sull'applicazione di algoritmi genetici e su un modello parametrico sono impiegati per la ricerca della soluzione ottima sulla superficie di risposta del sistema.

1.2 Contesto del presente lavoro

Il presente lavoro si inserisce in un contesto di forte interesse della comunità scientifica aeronautica e navale verso configurazioni propulsive efficienti.

Infatti, esigenze legate alla necessità di ridurre i consumi e contenere le emissioni nocive stanno trainando negli ultimi anni la ricerca. Considerando il mezzo di trasporto in generale, i miglioramenti che possono essere potenzialmente ottenuti intervenendo sull'apparato propulsivo sono tra i più promettenti.

Il modo con cui tali obiettivi possono essere perseguiti sono molteplici. Preso a riferimento il caso navale, Bjorshol [4] mostra possibili soluzioni alternative per la corretta gestione dell'energia potenziale del combustibile impiegato sulle imbarcazioni, tale da migliorare globalmente l'efficienza del sistema: dalla moltiplicazione delle linee d'assi in modo da limitare i carichi specifici sulle pale, all'impiego di motori elettrici, versatili, da abbinare al motore primario, in modo tale da far lavorare quest'ultimo a regimi stazionari, prossimi al punto di massima efficienza, oltre che permettere l'alloggiamento del propulsore in zone limitatamente interessate dallo strato limite viscoso della carena; inoltre la propulsione ibrida convenzionale termica/elettrica consente di massimizzare l'efficienza in virtù dei servizi ausiliari necessari per lo svolgimento delle attività a bordo: dalla climatizzazione alla movimentazione degli organi di lavoro (p.e. argani per la movimentazione delle reti da pesca, etc.). In alternativa alla doppia propulsione si pone la cogenerazione, mediante la quale l'energia termica contenuta nei gas di scarico viene utilizzata per il riscaldamento di vapore da inviare a turbine apposite e/o per il diretto sfruttamento come fonte di riscaldamento.

Tralasciando la possibilità di investigare possibili soluzioni fin qui descritte, tale lavoro si pone l'obiettivo di identificare soluzioni propulsive efficienti dal punto di vista dell'attuatore: l'elica, con la sua forma abbinata alle prestazioni offerte nel punto di lavoro.

Gli aspetti maggiormente trattati nella letteratura riguardano lo sviluppo dei modelli per la descrizione della fenomenologia che interviene in tale tipologia di propulsori e lo sviluppo di tecniche automatizzate per la ricerca della migliore configurazione, adatta alle specifiche richieste.

Esempi di rotori intubati possono trovarsi nei lavori a firma di:

- Werle e Presz [42], in cui sono analizzate sottoforma di turbine intubate eolico e marine, mediante l'utilizzo di dati sperimentali e numerici basati su simulazioni CFD;
- Deucker [13], in cui viene affrontata la progettazione metodologica su base sperimentale e numerica (modello di lifting line, mediante il quale il corpo portante viene rappresentato mediante una serie di linee vorticali che determinano un campo di moto fluidodinamico equivalente a quello del corpo in esame), di un siluro per investigazioni sottomarine non guidato (AUV); in particolare viene analizzata la configurazione propulsiva di

tipo ring propeller; essa viene confrontata con altre soluzioni possibili come l'elica convenzionale isolata, eliche controrotanti, vane-wheel, pre-post swirl stators, ducted propellers.

- Stubblefield [39], in cui viene ripreso ed esteso il lavoro cominciato negli anni passati da Coney [10] e, successivamente, da Mishima [27] sulle eliche navali intubate; la progettazione di tali propulsori avviene mediante uso di dati provenienti da simulazioni con solutori basati su modelli di vortex line per la rappresentazione dell'elica (e modello euleriano per l'analisi del flusso intorno al mantello, portando in conto l'influenza dell'elica per mezzo di un modello di body force), in cui si cerca la configurazione geometrica che massimizza l'efficienza idrodinamica, ovvero che determina la distribuzione ottima di circolazione sulle pale dell'elica in base alla teoria di Betz. La tecnica di progettazione è di tipo ricorsiva; le prestazioni esercitate da propulsori in configurazioni nell'intorno di una scelta come riferimento vengono sintetizzate mediante metodi di regressione lineare o quadratica; sulla base delle predizioni ad opera di tali modelli surrogati viene ricercata la configurazione migliore, la quale viene verificata mediante il modello suddetto per l'analisi idrodinamica ed utilizzata successivamente come configurazione di riferimento intorno alla quale cercare una nuova soluzione.

Nel settore navale, in particolare, l'adozione di tecniche rappresentative dello stato dell'arte in campo sperimentale e numerico può però essere disponibile solo per una limitata platea di industrie, le quali possono permettersi preventivi di spesa pressochè illimitati in virtù di un sicuro ritorno economico in un limitato tempo. D'altra parte, le piccole medie imprese armatoriali adottano per la progettazione degli apparati propulsivi tecniche standard ed, in alcuni casi, obsolete.

Nasce quindi l'esigenza di sviluppare uno strumento automatizzato e sufficientemente veloce ed accurato per la progettazione preliminare dell'elica di un propulsore o per ridisegnare la stessa nel caso di un'imbarcazione esistente.

La tecnica di design considerata definisce la configurazione ottimale mediante una successione di fasi dedicate alla determinazione, rispettivamente, di parametri geometrico/operativi globali e locali del propulsore. Sebbene qui sia usata in singolo step, la tecnica, a rigore, viene risolta in modo iterativo. La separazione, in fasi distinte e successive per la determinazione di parametri globali e locali, permette di ridurre il numero di configurazioni per le quali calcolare le prestazioni con cui costruire la superficie di risposta del sistema. Inoltre, la ricerca della soluzione avviene esplorando detta superficie di risposta in modo veloce mediante l'uso di un apposito modello surrogato a quello per lo studio del sistema fisico, nell'intorno di una configurazione presa a riferimento.

Rispetto alle tecniche di design utilizzate comunemente, tale lavoro considera alla base del solutore aero/idrodinamico un modello valido per lo studio del flusso potenziale intorno a configurazioni complesse; tale scelta permette di avere simulazioni sufficientemente accurate e veloci, oltre che robuste, rispetto all'adozione di modelli più complessi.

Inoltre, i risultati ottenuti a mezzo di un solutore valido per flussi tridimensionali intorno a configurazioni complesse vengono sintetizzati mediante una rete neurale, nell'ottica di cercare di superare i limiti imposti sul dominio delle variabili che derivano dall'adozione di comuni modelli di regressione.

La rete neurale viene quindi utilizzata come modello surrogato di quello alla base del solutore aero/idrodinamico.

Nell'ambito della riprogettazione di sistemi propulsivi di imbarcazioni esistenti i margini di guadagno nominali sono,

dai dati in letteratura disponibili, mediamente dell'ordine del 3-5%; per l'ottenimento di tale obiettivo gioca un ruolo fondamentale non solo l'incremento delle prestazioni avendo fissando il punto di lavoro a quello del propulsore originale, ma anche la ridefinizione del punto di lavoro stesso. Non è infrequente trovare la situazione di un propulsore che sia sovra o sottodimensionato rispetto ad una qualche grandezza (tipicamente il passo): in tal modo le condizioni nominali di design non vengono rispettate durante l'esercizio reale del sistema. Nasce l'esigenza quindi di catturare in modo preciso l'interazione tra il propulsore e la carena-motore con cui si dovrà interfacciare.

Da un lato il motore mostra una curva di coppia disponibile al variare del regime di rotazione che deve necessariamente supplire alla coppia resistente offerta dall'elica; dall'altro, la carena non solo offre una resistenza variabile in funzione della velocità di avanzamento che deve essere uguagliata alla spinta offerta dal propulsore, ma è artefice anche della disuniformità di flusso incidente al propulsore stesso, in virtù dello strato limite rilasciato dalle sue pareti.

In particolare, tale disuniformità del flusso incidente, interagisce con la rotazione dell'elica causando fluttuazioni nel campo di velocità e di pressione. Fenomeni quali quello della cavitazione e delle vibrazioni sono favoriti in tali condizioni: erosione e rumore sono diretta conseguenza.

Se da un lato la progettazione del propulsore avendo in considerazione l'interazione completa propulsore-carena è preferibile, dall'altro lo studio in tale condizioni risulta essere oneroso computazionalmente. In tale lavoro, si considerano gli effetti della scia rilasciata dalla carena sottoforma di un parametro concentrato che indica sinteticamente il difetto di velocità incidente al propulsore rispetto alla velocità di avanzamento dell'imbarcazione. Si rimanda a sviluppi futuri l'implementazione di tecniche per portare in conto l'interazione propulsore-scia non uniforme limitando l'onere computazionale che tale scelta comporta.

1.3 Configurazioni propulsive di interesse

Il presente lavoro di tesi si pone come obiettivo lo sviluppo di tecniche di sintesi di sistemi complessi basati sull'uso di reti neurali e la loro applicazione per l'individuazione di configurazioni ottime per i casi di interesse trattati. Nell'ambito navale, suscita particolare interesse la progettazione di propulsori ad elica intubata destinate ad equipaggiare imbarcazioni quali pescherecci e rimorchiatori, caratterizzati cioè dall'esigenza di prestazioni elevate in termini di spinta disponibile a basse velocità di esercizio.

Le eliche intubate sono largamente utilizzate nei sistemi propulsivi navali per vari motivi. Uno dei primi ad analizzare e sviluppare tale soluzione fu Kort negli anni 30. Il mantello, il quale è primariamente un corpo resistivo, interagisce con il rotore contenuto in esso e girante in modo coassiale; in tal modo il flusso risultante ed incidente all'elica risulta modificato rispetto al caso di un'elica operante in flusso libero. L'energia propria del fluido in ingresso al mantello muta, a seconda della forma di tale condotto, orientandosi verso un'energia di tipo cinetica o di pressione, per poi riportarsi alle condizioni ambiente in corrispondenza della sezione di uscita. A seconda della forma del mantello in esame, tale flusso può quindi accelerare o decelerare e, corrispondentemente, la pressione statica può diminuire o aumentare. I mantelli più comunemente impiegati in campo navale sono i cosiddetti mantelli di tipo accelerante, la cui caratteristica primaria è quella di permettere un guadagno di efficienza propulsiva particolarmente in condizioni

di bassa velocità ed alti carichi richiesti. Sono quindi indicate per equipaggiare imbarcazioni quali rimorchiatori, pescherecci, piattaforme mobili, etc. A fronte di un guadagno di efficienza a basse velocità, le perdite per effetti viscosi sulla superficie del mantello acquisiscono maggiore importanza alle alte velocità degradando le prestazioni offerte dal propulsore. Inoltre, in virtù dei maggiori carichi specifici agenti sulla superficie dell'elica, viene elevato il rischio di cavitazione, con conseguenti effetti deleteri di rumore e vibrazioni indotte, oltre che sulle prestazioni in prima istanza. Nonostante questo, le eliche intubate rappresentano una soluzione preferibile rispetto a quella di un'elica convenzionale isolata per una vasta serie di ragioni:

- **Maggior densità di potenza:** a parità di dimensioni, la spinta prodotta può essere superiore a quella offerta da un'elica isolata; ciò la rende configurazione preferibile se in presenza di limitazioni sulle dimensioni massime.
- **Sicurezza:** il mantello offre naturalmente una protezione per l'elica, rendendo indicato il suo impiego sotto imbarcazioni chiamate ad operare in zone portuali e/o in condizioni di limitata profondità.
- **Semplicità costruttiva:** la direzionalità del flusso prodotta dal mantello rende tale tipologia di propulsori adatti ad essere utilizzati come organi ibridi propulsivi e di manovra operanti senza l'ausilio di timoni.
- **Prevenzione della cavitazione:** i mantelli di tipo decelerante, la cui caratteristica è quella di decelerare il flusso incidente all'elica con conseguente aumento della pressione statica, sono indicati per essere impiegati in applicazioni dove, a fronte di una perdita nelle prestazioni del propulsore, viene ricercata una limitata cavitazione sulle superfici portanti dell'elica.

Infine, nel campo delle soluzioni possibili per lo sfruttamento di energie rinnovabili, la configurazione di rotori intubati risulta essere appetibile allorchè si voglia estrarre energia dalle correnti marine. Per esse valgono le stesse considerazioni fatte finora per descrivere tale configurazione utilizzata come macchina operatrice. In tal caso, la funzione svolta dal mantello è innanzitutto quella di avviare il flusso per poter essere meglio elaborato dal rotore, mentre risulta essere limitata la sua capacità di accelerare il flusso in corrispondenza al piano dove è posizionato il rotore. L'utilizzo dei rotori intubati come macchina operatrice o motrice è responsabile del differente obiettivo con cui viene impostata la fase di design: per le eliche intubate operanti come macchina operatrice l'obiettivo primario è quello di minimizzare la coppia richiesta al motore per essere posta in rotazione ad un dato regime di funzionamento e contemporaneamente massimizzare la spinta prodotta, deputata a vincere la resistenza all'avanzamento dell'imbarcazione. Viceversa, per le eliche operanti come macchina motrice si cerca di massimizzare la coppia, ora raccolta all'albero e destinata a porre in rotazione un alternatore, e minimizzare la spinta, ovvero la resistenza offerta dall'apparato immerso nella vena fluida. Sebbene tale lavoro sia concentrato sulla progettazione di eliche marine intubate, operanti come macchine operatrici, le analisi condotte e le considerazioni svolte per esse possono essere facilmente estese al caso delle turbine intubate.

1.4 Sommario della tesi

Nell'ambito aeronautico ed ancora più in quello navale, la progettazione preliminare dei propulsori rappresenta una fase suscettibile di miglioramenti in virtù delle maggiori capacità di calcolo dei moderni calcolatori. Lo sviluppo di propulsori sempre più efficienti e/o prestazionali, nell'ottica di una razionalizzazione dell'utilizzo delle risorse impiegate, ha indirizzato la ricerca verso l'uso sempre maggiore di strumenti informatici.

A fronte di un decrescente ricorso all'uso di tecniche progettuali basate sull'elaborazione di dati sperimentali afferenti a specifiche famiglie di propulsori, tecniche basate sull'uso sinergico di strumenti basati su modelli teorici per l'analisi e l'ottimizzazione aero/idrodinamica degli stessi hanno suscitato un sempre maggiore interesse dei progettisti. I modelli teorici attualmente in uso sono semplificati onde ridurre l'onere computazionale e sono volti alla progettazione di propulsori in cui le parti rotanti sono considerate come isolate.

Nell'ottica di contenere l'aggravio di risorse di calcolo senza perdere in accuratezza, il presente lavoro prevede lo sviluppo e l'integrazione di modelli teorici per l'analisi aero/idrodinamica di configurazioni in cui un rotore o un propulsore ad ala rotante interagisce con le parti fisse del veicolo (par. 4.2).

Il modello teorico integrato sarà quindi impiegato per la realizzazione di un ambiente di simulazione a rete neurale (par.3.2) finalizzato al progetto preliminare ed all'ottimizzazione dei suddetti dispositivi ad ala rotante.

Detto ambiente di simulazione sarà quindi applicato allo studio di configurazioni di interesse in campo aeronautico e navale, ed i risultati saranno validati mediante confronti con dati numerici e sperimentali relativi a casi test rappresentativi delle configurazioni studiate (cap.5).

In tale lavoro, la tecnica di design sviluppata si compone in due fasi distinte successive, rappresentate dal design di base e dal design di finitura (cap.2). La motivazione di tale strategia risiede nell'esigenza di minimizzare i tempi di calcolo senza perdere di generalità.

Mentre alla fase di design di base (par.2.2.1) compete la determinazione di parametri geometrico/operativi globali, alla fase di design di finitura (par.2.2.2) spetta il compito di determinare le migliori distribuzioni radiali geometriche, stante il loro valore nominale e le condizioni operative del propulsore in esame.

Alla base di tale scelta c'è la considerazione secondo la quale le prestazioni globali del propulsore sono influenzate dal valore nominale dei parametri geometrici più che alle loro distribuzioni radiali; queste, piuttosto, influenzano fenomeni locali quali la distribuzione di pressione o la risposta all'incipienza di cavitazione sulle sezioni.

Tale strumento è stato sviluppato nell'ottica di estenderlo nel futuro alla progettazione di propulsori investiti da correnti incidenti spazialmente non uniformi, con inclusione di vincoli legati a grandezze fluidodinamiche locali (quali appunto la pressione e/o l'estensione della bolla cavitante), variabili nell'arco di una rivoluzione del propulsore.

In particolare, si intende in questa sede, dimostrare le potenziali capacità dello strumento di ottenere una soluzione coerente con i vincoli e funzione obiettivo scelti, oltre che validare i componenti singolarmente. Lo metodologia considerata per il design rappresenta la logica conseguenza dell'attività svolta negli anni passati per lo sviluppo di modelli teorico numerici per l'analisi aero/idrodinamica di propulsori ad ala rotante e di strumenti utili all'integrazione

di tali modelli per un uso automatizzato; lo strumento utile per il design automatizzato di propulsori ad ala rotante basato su detta metodologia viene applicato per dimostrarne la validità (cap.5).

Più propriamente, lo strumento di design sviluppato svolge le sue funzioni nel seguente ordine:

- Generazione delle griglie di calcolo (par.5.4)
- Generazione dataset della superficie di risposta del sistema per un'elica (5.5) in configurazione:
 - isolata
 - intubata

basato su dati sperimentali e/o numerici applicando un modello matematico di fissata accuratezza

- Addestramento di una rete neurale per la simulazione della risposta del sistema
- Ricerca della soluzione sulla superficie di risposta surrogata ad opera di un ottimizzatore basato su:
 - un modello di ricerca parametrico
 - una tecnica basata sull'uso di algoritmi genetici

Capitolo 2

Procedura di design e tecniche di ottimizzazione

Il presente capitolo è dedicato alla trattazione delle tecniche adoperate per la risoluzione di problemi di progettazione, con particolare riferimento a quelle di tipo a progettazione ottimizzata; per essi, la ricerca della soluzione avviene nell'intorno di una configurazione presa a riferimento base, variando i parametri di design entro limiti di variabilità prestabiliti.

La prima parte del capitolo è rivolta alla esposizione delle diverse strategie di progettazione; vengono esaminate le differenze dal punto di vista degli obiettivi e dei modelli utilizzati dalle tecniche per la risoluzione del problema in esame descritte in lavori disponibili in letteratura: da tecniche standard basate su dati sistematici sperimentali alle tecniche più avanzate che fanno uso di modelli e tecniche CFD per la caratterizzazione del flusso intorno al propulsore. Le differenze vengono inoltre attestate anche dal tipo di algoritmo/modello decisionale utilizzato per la gestione del processo progettuale.

Nella seconda parte del capitolo viene esposta nel dettaglio la tecnica di progettazione attuata nel presente lavoro, basata sulla determinazione, in fasi sequenziali, di parametri globali geometrico/operativi (design di base) e geometriche locali (design di finitura): vengono definite le variabili di progetto, i vincoli del problema e la funzione obiettivo scelta per la determinazione della soluzione al problema.

Nella terza parte del presente capitolo vengono prese in esame le due diverse tecniche di progettazione utilizzate nel presente lavoro, basate sull'uso di algoritmi genetici e su un modello a variazione sistematica dei parametri di progetto (modello parametrico). Il presente modello di progettazione ottimizzata è applicato usando dati riferiti ad una serie sistematica di propulsori virtuale, ovvero basati su simulazioni numeriche; nel par. 4.2 è possibile trovare l'esposizione del modello alla base del solutore aero/idrodinamico utilizzato per le suddette simulazioni. Nel par. 3.2 è invece possibile trovare la descrizione del modello utilizzato per la sintesi della superficie di risposta relativa alla serie sistematica.

Nella parte finale del presente capitolo vengono esposti gli schemi risolutivi relativi ai due ottimizzatori considerati ad uso della tecnica progettuale per la ricerca della soluzione al problema indagando sulla superficie di risposta sintetizzata precedentemente.

2.1 Tecniche di progettazione

Le tecniche standard di progettazione di propulsori in campo navale fanno uso di diagrammi costruiti sulla base di campagne sperimentali su eliche appartenenti ad una serie sistematica. Si definisce serie sistematica una famiglia di eliche differenti tra loro per il valore assunto da particolari parametri geometrici. Un tipico esempio è dato in [29], in cui vengono esposte le eliche navali di una serie sistematica convenzionale i cui parametri variabili sono il numero di pale, il rapporto di area espansa, il valore del passo lineare (o collettivo) adimensionale al 70% del raggio. Tali eliche hanno in comune la forma delle distribuzioni radiali ed il profilo della sezione base. Benchè una progettazione basata sulla scelta di tali parametri sia non esaustiva per definire la soluzione trovata come la migliore in assoluto, il ricorso a tali serie è quantomeno utile per definire una stima della sensibilità delle prestazioni rispetto a tali grandezze.

Nell'ambito delle procedure basate sull'uso di modelli computazionali per l'analisi delle soluzioni proposte, Coney [10] sviluppa un modello di design di un'elica a distribuzione ottima di circolazione. Mediante l'ausilio di un solutore idrodinamico, l'elica è rappresentata mediante linee portanti (*lifting lines*) discretizzate per mezzo di vortici a staffa; le prestazioni di spinta e coppia sono note in funzione dell'intensità di tali vortici. Il problema di ottimizzazione si risolve in tre stadi: inizialmente si determina la distribuzione di passo corrispondente ad una distribuzione ottima di circolazione, nel rispetto dei vincoli del problema (spinta esercitata, coppia richiesta ad una data velocità di avanzamento). A tale livello una prima stima della cavitazione può essere ottenuta mediante l'ausilio di diagrammi di Burrill, che mostrano la percentuale di area cavitabile in funzione del carico specifico e delle condizioni locali di pressione. Al secondo stadio compete la determinazione delle distribuzioni radiali di corda, camber e spessore mediante l'utilizzo di un modello di *lifting surface*; iterativamente, si cercano tali distribuzioni compatibili con le forze sopra determinate e responsabili della circolazione impostata. L'elica si suppone investita da una corrente fluida uniforme; il rischio di cavitazione è valutato mediante diagrammi di Bucket, con cui, in funzione dell'angolo di incidenza della vena fluida sul profilo, viene mostrato il limite dell'indice di cavitazione locale oltre il quale si incorre in tale fenomeno. In particolare, la distribuzione di corda è strettamente legato al vincolo sulla cavitazione.

Tale modello è stato ripreso e sviluppato successivamente da vari Autori per estendere la progettazione a casi di inflow non uniformi (Kinnas [18]), a configurazioni multi-corpo quali eliche intubate (Stubblefield [39]). Mishima [27] sviluppa tale modello per determinare la geometria più efficiente sotto vincoli sulla cavitazione massima ammissibile e spinta minima richiesta. La geometria è discretizzata mediante l'utilizzo di B-splines, mentre le prestazioni dell'elica analizzata al generico passo del ciclo di ottimizzazione, vengono associate alle variabili di design. A partire da un numero limitato di punti descrittivi di differenti combinazioni geometriche, viene approssimata la superficie di risposta del sistema mediante un modello lineare (per la fase iniziale, mentre per la fase di design di finitura esso è sostituito da un modello quadratico); viene quindi stimata la configurazione ottima ricercandola su questa superficie. Ad ogni con-

figurazione ottima stimata compete una corrispondente analisi con il modello numerico e l'inclusione delle prestazioni nel dataset interpolato per la costruzione della superficie di risposta del sistema.

Deng [11] applica tale modello per l'ottimizzazione di eliche in condizioni cavitanti, in regime di flusso incidente non uniforme in configurazione multi-corpo. Viene generata una serie virtuale di eliche, differenti tra loro per il valore assunto da passo, corda, camber, la cui distribuzione è direttamente proporzionale a quelle di un'elica presa a riferimento base. La configurazione ottima è ricercata minimizzando la coppia richiesta dal propulsore, fissata la spinta richiesta e sotto il vincolo della massima area cavabile ammessa.

In analogia con quanto esposto da Mishima [27], Geisbert [16] utilizza un doppio modello di lifting line / lifting surface per la progettazione di un propulsore di tipo CRP-POD. Sotto vincoli di cavitazione, di spinta, resistenza, viene ricercata la soluzione ottima avendo fissate come variabili di design il numero di pale, il diametro, la potenza ed il numero di giri di rotazione dell'elica. Fissati tali parametri e le prestazioni globali richieste, si trova dapprima la distribuzione ottimale di circolazione e di corda con l'utilizzo del modello di lifting line, mentre con l'ausilio del modello di lifting surface si determina la distribuzione radiale di passo, camber congruenti con la circolazione trovata. Poiché la configurazione considerata è quella di due eliche controrotanti, si considera la progettazione di ognuna separatamente, portando in conto l'effetto dell'altra mediante le velocità indotte dell'una sull'altra, mediate circolarmente.

La medesima configurazione è stata progettata da Stanway [37], mentre per una configurazione di elica convenzionale destinata ad equipaggiare un veicolo sottomarino si rimanda al lavoro di D'Epagnier [12] e per una configurazione di tipo *ring-propeller* al lavoro di Deucker [13]: a partire dalla determinazione di un punto di lavoro compatibile con i vincoli da accoppiamento del propulsore al motore modificandone il diametro, il numero di giri di rotazione, il numero di pale ed i carichi esercitati all'asse, viene performata un'ottimizzazione mediante l'utilizzo del modello ibrido vortex lattice (precedentemente descritto) / RANSE, rispettivamente dedicati allo studio delle eliche e del mantello. Per ogni combinazione dei parametri descritti viene calcolata la circolazione ottima dell'elica e, successivamente, mediante l'ausilio del modello di lifting surface su-enunciato, viene determinata la distribuzione di camber e di pitch (passo) compatibile con la circolazione ed i carichi desiderati.

In analogia del modello esposto finora si cita quello sviluppato ed applicato da Mertes [26] per la progettazione di un propulsore ad elica intubata.

Un tipo di progettazione basata sull'analisi di sensibilità di dati sperimentali e numerici applicata ad un propulsore ad elica intubata con obiettivo di massimizzare la spinta per velocità nulle di avanzamento si può trovare nel lavoro di Taketani [40], in cui viene considerato il caso realistico di un rimorchiatore. Per esso, lo studio del mantello è demandato ad un modello CFD in configurazione 2D-stazionario, con inclusione degli effetti dell'elica a mezzo di un modello di body-force; l'analisi delle prestazioni offerte dal propulsore avviene ad opera di un modello di lifting line: gli effetti del mantello vengono portati in conto per mezzo delle velocità che esso induce. Una tecnica risolutiva iterativa permette l'ottenimento della soluzione. Diverse distribuzioni di camber e thickness per il mantello, di skew e di pitch per l'elica sono state analizzate nei confronti delle prestazioni offerte. Definita la geometria ottimizzata l'effetto del posizionamento assiale dell'elica all'interno del mantello e la verifica delle prestazioni predette in fase di design sono avvenute mediante l'uso di simulazioni CFD di tipo 3D in condizioni stazionarie.

L'ottimizzazione di un'elica convenzionale e di un propulsore multi-componenti con obiettivo focalizzato su efficienza e comportamento cavitante, sotto il vincolo di resistenza propria di un'imbarcazione marciante a velocità fissata viene trattato da Druckenbrod [15] e Steden [38]. L'ottimizzazione è estesa per includere la minimizzazione dell'ampiezza dei carichi non stazionari del propulsore legati al funzionamento dell'elica in una scia prefissata, che sono causa di vibrazione e rumore nel campo circostante e, in particolare, sulla volta di poppa. Qui il mantello che circonda il gruppo rotore/statore del propulsore multi-componente è ottimizzato per ridurre l'incipit della cavitazione, ovvero per avere una forma tale da indurre un incremento della pressione statica al disco dell'elica a fronte di una parziale perdita di efficienza idrodinamica. Seguendo l'approccio descritto da Kinnas [18] per lo studio del flusso proprio di propulsori multi-corpo, vengono accoppiati un solutore potenziale con un codice basato su metodo di Eulero. Le forze del rotore e dello statore, analizzati mediante modello potenziale, sono trasferite al codice di Eulero usato per l'analisi idrodinamica del mantello, per simulare l'effetto del flusso accelerato da essi. La soluzione è ottenuta in maniera iterativa. Nel lavoro presentato da Druckenbrod il solutore di Eulero è sostituito da un modello basato sulla risoluzione delle equazioni di Navier Stokes (RANSE), mentre il solutore potenziale è basato su un modello agli elementi di contorno del primo ordine. L'ottimizzazione, basato sull'uso di algoritmi genetici, viene affrontata generando un set di valori delle variabili di design, con cui vengono costruite un set di griglie geometriche di calcolo. I risultati dei modelli matematici per l'analisi idrodinamica di tali configurazioni sono utilizzati in modo automatico dall'ottimizzatore per la ricerca della soluzione del problema. La soluzione è cercata variando le distribuzioni di passo e corda, con fissate le restanti grandezze geometriche.

2.2 Tecnica di design

Il design applicato in tale lavoro è del tipo a progettazione ottimizzata, che si articola nelle seguenti sottofasi:

- definizione di una configurazione di base
- generazione di una famiglia di propulsori intorno alla configurazione di base
- simulazione della superficie di risposta del sistema rappresentato dalla famiglia dei propulsori
- sintetizzazione della superficie di risposta del sistema mediante modelli surrogati
- ricerca della soluzione ottima mediante applicazione di un ottimizzatore basato sull'uso dei suddetti modelli surrogati per la rappresentazione del sistema fisico in esame

In particolare, il problema della progettazione è stato suddiviso in due sottoproblemi definiti di ottimizzazione di base e di finitura; il primo destinata alla definizione del miglior set di parametri globali geometrici/operativi, avendo definito la forma delle distribuzioni radiali delle grandezze geometriche.

Viene costruita, intorno al punto identificato dall'ottimo di base, la superficie di risposta del sistema creando una famiglia di propulsori differenti nella forma delle distribuzioni radiali delle grandezze geometriche: su tale superficie viene ricercato l'ottimo di finitura.

2.2.1 Design di base

In tale lavoro è stato considerato dapprima un problema didattico per l'identificazione dei parametri di massima geometrici/operativi relativi ad un'elica destinata ad essere montata su un'imbarcazione tipo, per la quale sono state ipotizzate fissate le caratteristiche operative.

In particolare, è stato considerato il caso di un peschereccio operante in condizione detta di 'marcia libera' o 'free running', la cui coppia motrice propulsiva erogata dal motore è stata supposta nota in relazione alla potenza ed al numero di giri fissati alla base del progetto.

In tal senso, le variabili di progetto considerate, caratterizzanti l'elica, sono le seguenti:

- Diametro D
- Numero di pale Z
- Area espansa EAR ¹
- Passo geometrico nominale P/D ²

A questi dati geometrici si aggiunge la determinazione del valore assunto da una variabile caratterizzante la condizione operativa dell'elica: il coefficiente di avanzo $J = V_a/(nD)$, con $V_a = (1 - W)V_{Ship}$.

Il problema si traduce nella ricerca del set di variabili di progetto che massimizzano l'efficienza propulsiva dell'elica e che soddisfano vincoli sulla coppia erogata dal motore ad un determinato numero di giri e sulla resistenza offerta all'avanzamento della carena ad una fissata velocità di navigazione.

Per ulteriori informazioni sulla determinazione delle prestazioni relative ad una carena si rimanda all'appendice (vedi D).

2.2.2 Design di finitura

A valle dell'ottimizzazione di base viene costruita la superficie di risposta del sistema i cui punti sono rappresentativi di propulsori simili nei parametri geometrico/operativi globali (e definiti appunto durante la prima fase dell'ottimizzazione), ma differenti per la forma delle distribuzioni radiali delle varie grandezze geometriche.

In particolare il problema è strutturato per cercare la soluzione ottima modificando le seguenti grandezze:

- passo lineare adimensionale $P(r)/D$
- corda adimensionale $C(r)/D$

¹ pari al rapporto tra l'area del rotore proiettata su un piano ortogonale all'asse di rotazione e l'area del disco avente raggio pari a quello del rotore in esame

² detto in gergo navale, che equivale alla distribuzione nascente dalla sovrapposizione di collettivo e svergolamento se si adotta una notazione aeronautica

- skew adimensionale $Sk(r)/D$
- camber massimo adimensionale $f_{max}(r)/C(r)$
- rake adimensionale $Rk(r)/D$

Nella pratica, le varie distribuzioni relative alla configurazione di base della famiglia della serie sistematica virtuale vengono modificate mediante l'utilizzo di funzioni radiali appositamente scelte.

In analogia con quanto esposto nel paragrafo precedente, l'ottimo viene ricercato massimizzando la funzione obiettivo qui data dall'efficienza propulsiva dell'elica, nel rispetto dei vincoli imposti sulla coppia erogata dal motore ad un determinato numero di giri e sulla resistenza offerta all'avanzamento della carena ad una fissata velocità di navigazione.

2.3 Progettazione ottimizzata

Tipicamente, la fase di progettazione si compone delle seguenti tre sottofasi: *Concettuale*, *Preliminare* e *di Dettaglio*, ognuna delle quali caratterizzate da differenti attività ed obiettivi.

La fase di progettazione concettuale si propone di esplorare il più ampio possibile spazio delle soluzioni arrivando a definire valori di massima per le principali variabili.

Passando alla progettazione preliminare e poi a quella di dettaglio, come è prevedibile immaginare, si incrementa il livello di dettaglio, cui corrisponde una minore libertà di scelta; gli strumenti utilizzati in tali fasi devono perciò essere rapportati alla loro funzione.

Mentre per la prima fase della progettazione, l'esperienza del progettista risulta essere lo strumento più efficace, per le altre due l'uso di codici di calcolo e/o di esperimenti diventa necessario.

La fase di progettazione può essere inquadrata in generale come un'ottimizzazione a più strati, in cui si cerca di ottenere la combinazione dei parametri di progetto tali che, soddisfatti tutti i vincoli imposti, massimizzino una o più funzioni obiettivo.

In particolare, l'ottimizzazione si suddivide in: ottimizzazione *parametrica* ed ottimizzazione *classica*.

Nell'ottimizzazione *parametrica*, i parametri di progetto vengono variati in modo sistematico e metodico sull'intero spazio delle variabili, valutando la sensibilità delle funzioni obiettivo e scegliendo tra i possibili punti quelli che soddisfanno i requisiti del problema.

La soluzione viene quindi aggiornata ad una nuova configurazione ed il processo viene riavviato in un ciclo che termina con la definizione dell'ottimo cercato.

L'ottimizzazione *classica*, invece, usa tipicamente una o più superfici di risposta del sistema costruite sui punti che assumono i parametri di design, per visualizzare l'andamento delle funzioni obiettivo e per ricercare l'ottimo del problema. Su tali superfici è possibile visualizzare anche le regioni ove sono soddisfatti i vincoli del problema. Solitamente, vengono utilizzate delle tecniche interpolatrici per costruire tale superficie sulla base di pochi punti, in modo da ottimizzare i costi in termini computazionali del processo di design.

In generale, l'ottimizzazione di un oggetto è tipicamente un problema multidisciplinare, in cui il processo ha come obiettivo la massimizzazione di più funzioni obiettivo [33].

Esistono varie tecniche per affrontare tale problema ed, in particolare, per cercare la soluzione sulla superficie di risposta.

Tra i principali metodi si annoverano i seguenti:

- alle differenze finite
- Monte Carlo
- basati su algoritmi evolutivi
- basati su algoritmi genetici

Nel metodo alle differenze finite vengono compiuti piccoli cambiamenti parametrici ottenuti variando un solo parametro per volta e valutando la pendenza che assume la funzione obiettivo (ovvero valutando in modo discreto la sensibilità del sistema rispetto a quel parametro).

I valori che assumono le derivate prime sono quindi usate per predire la localizzazione della soluzione ottima; tale fase viene inserita in un ciclo che comprende tutti i parametri di design.

Sebbene sia un metodo semplice, risulta essere computazionalmente costoso e può facilmente portare ad errate valutazioni della funzione gradiente, oltre che il fatto di essere un metodo basato sulla linearizzazione delle funzioni lo rende poco accurato.

Il metodo Monte Carlo è di tipo stocastico e una funzione di probabilità random è usata per generare un elevato numero di potenziali soluzioni; dal confronto di tali punti viene determinato il migliore. Non esiste certezza matematica che l'ottimo trovato sia effettivamente l'ottimo ricercato o che esso sia posizionato nelle sue vicinanze. Nella pratica, però, dal momento che lo spazio delle variabili viene esplorato in modo random è difficile che l'ottimo trovato rappresenti un punto di minimo locale del sistema.

Nei metodi basati sull'uso di algoritmi evolutivi vengono applicati processi di sopravvivenza degli individui che più si avvicinano per caratteristiche alle famiglie delle soluzioni giudicate come migliori. Le variabili di progetto sono codificate in stringhe binarie in modo tale che sia un unico numero ad identificare il posizionamento della soluzione sullo spazio delle variabili.

Tali metodi, anziché partire da una soluzione e cercare di ottimizzarla, usano come punti di partenza un set di punti generati casualmente e che rappresentano la prima famiglia; dalla valutazione delle funzioni obiettivo viene estratta la soluzione migliore per generare una successiva famiglia e così via fino a trovare l'ottimo del problema.

I metodi basati sull'uso di algoritmi genetici utilizzano anch'essi per la definizione dei punti dello spazio delle variabili una notazione detta 'bit-string' che rappresentano i cromosomi degli individui creati.

Essi partono da popolazioni generate casualmente e, successivamente alla valutazione delle funzioni obiettivo, le migliori popolazioni sono elette a 'riprodursi' mediante processi di *crossing* dei cromosomi degli individui che le com-

pongono. Tale processo viene ripetuto fintanto che la percentuale di variazione della popolazione non scende al di sotto di una determinata soglia.

Uno dei punti di forza dei metodi evolutivi e genetici risiede nella possibilità di lavorare su variabili discrete per la codifica del set di parametri in una sequenza di numeri che ne definisce univocamente la posizione; come è ovvio, difficilmente, metodi basati sul calcolo di gradienti possono lavorare con variabili di tale natura.

Concetti chiave alla base dei metodi genetici sono *selezione*, *crossover* e *mutazione*.

La *selezione*, sebbene possa essere operata in differenti modi, si fonda sempre sulla valutazione delle funzioni obiettivo e loro codifica in un numero unico e sulla valutazione del soddisfacimento dei vincoli del problema per l'individuo in esame.

Uno dei possibili criteri applicabili è quello di scegliere, per la riproduzione, l'individuo che presenta la migliore codifica di funzioni obiettivo a fronte del soddisfacimento della totalità dei vincoli. Tale tecnica può, però, essere troppo restrittiva perché esclude anche gli individui con potenziali buoni set genetici.

In alternativa, si può pensare di modificare il valore della funzione associata alle funzioni obiettivo con una funzione di penalità dipendente dal grado di soddisfacimento dei vincoli del problema. I migliori individui vengono quindi confrontati per la valutazione del miglior parente per la generazione successiva.

Una tecnica largamente usata, detta della 'ruota che gira', assegna un valore casuale alla funzione associata alle funzioni obiettivo; in tal modo, sebbene gli individui migliori (con più alto valore di base) hanno maggiori probabilità di essere selezionati, anche altri individui 'peggiori' acquistano possibilità di essere scelti, permettendo al metodo di garantire la ricerca entro uno spazio non troppo limitato.

Il termine *crossover* è legato con il concetto di creazione di un nuovo individuo a partire da due individui denominati d'ora in poi come genitori.

Può attuarsi in modi diversi: il crossover a punto singolo è attuato dividendo in modo casuale i due cromosomi genitori e poi combinandoli per generare il figlio. Spesso vengono creati due figli combinando le restanti parti dei cromosomi.

Il crossover uniforme, invece, combina i geni dei cromosomi genitori bit per bit, scegliendo, per il figlio, lo stesso valore se collimano ed un valore casuale se sono discordi.

La *mutazione*, infine, opera sulla stringa di geni del figlio, moltiplicando ciascun gene per una funzione di numeri casuali; se il risultato è un numero basso il bit in questione viene variato; viceversa, viene lasciato invariato se tale valore risulta elevato. Tale procedura viene attuata per cercare di evitare i punti di minimo locale, sebbene sia dannosa quando si è nelle vicinanze del minimo globale.

Il metodo utilizzato nel presente lavoro appartiene alla classe degli algoritmi genetici: la sua adozione permette la localizzazione del punto di ottimo in tempi ragionevolmente ridotti e, in virtù delle caratteristiche del modello, tale ottimo è lecito pensarlo un ottimo globale.

Il modello è qui utilizzato facendo riferimento a dati ottenuti da un modello surrogato rappresentativo del sistema in esame; questo, come si vedrà in seguito è ottenuto per mezzo di una rete neurale, che, a seconda dei casi, viene

addestrata su dati numerici e/o sperimentali, fornendo implicitamente il legame funzionale tra le variabili di progetto e le prestazioni del propulsore nella relativa configurazione.

2.3.1 Ottimizzazione basata su ricerca parametrica

Nell'ottimizzazione parametrica è utilizzata una tecnica sviluppata per la particolare applicazione.

Come si può vedere dalla fig. 2.3, il modello parametrico si compone in più fasi, in cui, separatamente vengono valutati i diversi vincoli e determinati i parametri di design ad essi associati.

Per l'applicazione in esame (par. 5.1), il modello teorico si traduce innanzitutto nella risoluzione del vincolo sulla coppia, che influisce sulla determinazione del valore del diametro congruente con esso.

A valle della determinazione di tale valore d'equilibrio, un secondo ciclo viene effettuato per individuare il valore della velocità tale che la condizione sulla spinta, senza che venga meno il soddisfacimento del primo vincolo, in virtù di esistenti legami funzionali tra tali parametri.

Altri due vincoli, invece, sono valutati successivamente come condizioni di ammissibilità o meno della soluzione trovata.

Analogamente a quanto avviene per i vincoli, i restanti parametri di progetto vengono variati in modo sistematico, indipendentemente l'uno dall'altro, e l'ottimo, appartenente al luogo dei punti ammissibili, viene determinato confrontando semplicemente il valore della funzione obiettivo ad essi associati.

Tale modello usa, per la determinazione delle grandezze utili ai fini del processo di ottimizzazione, una rete neurale, addestrata opportunamente su base dati numerica e/o sperimentale: tramite essa è possibile definire un modello surrogato per la rappresentazione della superficie di risposta del sistema.

Il modello surrogato del sistema permette di esplorare in modo sistematico la risposta del sistema nello spazio delle variabili di progetto in tempi estremamente ridotti.

Il risultato ottenuto dall'applicazione del modello parametrico è rappresentato da una superficie di punti ammissibili che è parte della superficie di risposta del sistema e da uno o più punti eletti come ottimo e che appartengono a detta superficie (nel caso in esame risulta essere un solo punto in virtù della unica funzione obiettivo scelta).

Dalla fig. 2.1 è possibile visualizzare un esempio della superficie di risposta del sistema costruita su una porzione di spazio limitata del piano delle variabili di progetto. Alla totalità dei punti indicati, si sovrappone una regione di punti ammissibili, ovvero punti per i quali, i suddetti vincoli sono soddisfatti; tra essi, il punto per il quale la funzione obiettivo assume valore più elevato viene eletto a soluzione ottima del problema.

In tale lavoro, al modello sono state applicate delle modifiche per rendere più veloce la ricerca dell'ottimo. Considerato il problema del design di base (par. 2.2.1) è stato possibile identificare uno schema per la determinazione automatica dei punti ammissibili.

In fig. 2.2 viene mostrato il diagramma di flusso relativo a detto schema risolutivo; in particolare, il diametro del propulsore e la velocità di avanzamento della nave vengono modificate in modo vincolato nota la loro influenza sul-

Numerical predicted O. W. data Z=4

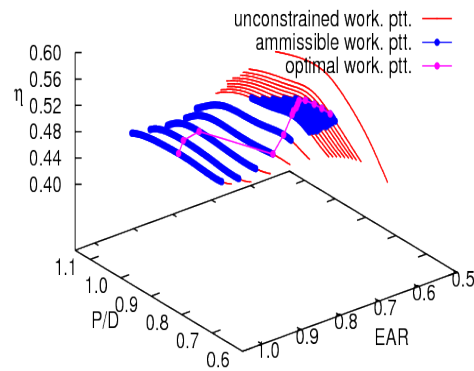


Figura 2.1: Esempio di superficie di risposta del sistema, sulla quale viene identificata una regione di punti rappresentativi di configurazioni compatibili con i vincoli del problema ed una spezzata, luogo dei punti di massimo locale.

l'andamento dei coefficienti di avanzo, spinta e momento. Mediante tale accorgimento è possibile determinare il punto di intersezione delle curve di "spinta elica - resistenza nave" e delle curve "coppia resistente elica - coppia disponibile motore".

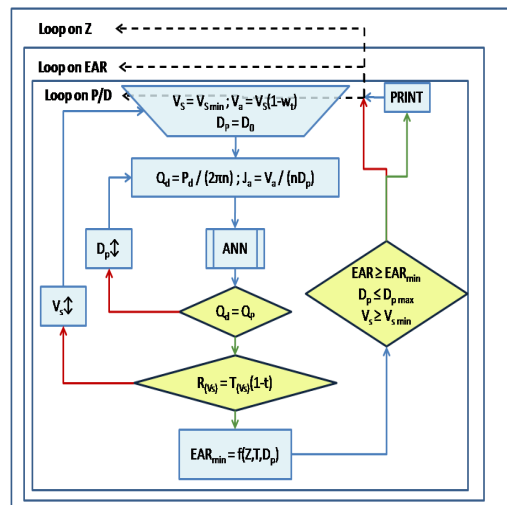


Figura 2.2: Schema risolutivo della ricerca della soluzione ottima mediante una tecnica mista di variazione sistematica/vincolata delle variabili di design.

2.3.2 Ottimizzazione basata su algoritmi genetici

In tale lavoro, è stato utilizzato un modello di ottimizzazione basato sull'uso di algoritmi genetici.

Per esso, il set di valori assunti dalle variabili di design vengono codificate in una sequenza numerica ordinata di 0 ed 1, denominata cromosoma; esiste quindi una corrispondenza biunivoca tra le configurazioni di design ed il numero ad esse associato.

In base binaria, alla dimensione della stringa associata ad ogni singolo gene (posto N , ovvero ad ogni singolo parametro, corrisponde il numero massimo di combinazioni possibili per esso, pari a 2^N .

Ogni cromosoma risulta essere una sequenza di geni. Tale schema converte le variabili continue in discrete; per esse, la risoluzione associata è: $Res. = \frac{X_{max} - X_{min}}{2^N - 1}$, dove X_{max} ed X_{min} rappresentano rispettivamente i limiti superiore ed inferiore per la variabile X .

Il modello in esame è stato qui usato in modalità ottimizzazione semplice, ovvero a singola funzione obiettivo; laddove esista la necessità di definire più funzioni obiettivo, esse vengono 'pesate' in una funzione obiettivo globale.

Il modello fa uso, per la risoluzione del problema, di funzioni di penalità applicate alla funzione obiettivo, che rendono implicita la presenza dei vincoli.

In termini matematici, tale approccio si traduce nella seguente espressione:

$$f = f_a + \sum_{j=1}^{\#divincoli} c_j max[0, g_j] \quad (2.1)$$

dove i vincoli sono rappresentati per mezzo delle funzioni g_j , le quali assumono valori positivi se i vincoli non sono soddisfatti, viceversa se lo sono.

Tale funzione di penalità può essere pesata per forzare la soluzione trovata a soddisfare tutti i vincoli imposti nel problema.

Il modello in esame, appartenendo alla categoria degli algoritmi genetici, da un lato gode dei vantaggi ad essi associati, ma risulta altresì affetto dai peculiari aspetti negativi: tra questi vi è la possibilità di ottenere una generazione successiva non migliore della generazione parente, in virtù della natura stocastica del modello stesso. Per cercare di ovviare a tale inconveniente, ad ogni passo del ciclo di ottimizzazione un numero definito di individui, selezionati come migliori, vengono preservati da cambiamenti, in modo da ottenere per il passo successivo una soluzione che sia almeno pari, se non migliore, rispetto alla precedente (tecnica di "elite").

Per la generazione dei figli, il modello fa uso di una tecnica di "crossover uniforme", per il quale ogni singolo bit dei genitori viene confrontato: il bit del figlio assumerà valore pari a quello dei genitori se quelli di questi coincidono, casuale se sono discordi.

Una funzione di "mutazione" è applicata per evitare convergenze premature verso minimi locali e per cercare di investigare la regione dello spazio delle variabili di progetto più ampia possibile. Numericamente, ciò si traduce nel moltiplicare ogni bit degli individui per una funzione di probabilità a valore fissato moltiplicata per un numero casuale $[0,1]$; laddove, tale prodotto assume valore inferiore all'unità il bit in questione cambia il valore.

Per la misura della convergenza del problema verso l'ottimo può essere usata la stessa funzione obiettivo in relazione al passo del ciclo iterativo; in tale metodo, come in quelli basati su algoritmi evolutivi o Monte Carlo, non si può associare alcun ordine alla velocità di convergenza. Spesso si hanno andamenti altalenanti o apparentemente non convergenti prima di giungere alla soluzione.

All'inizio del processo la componente casuale per la generazione dei cromosomi degli individui risulta massima e va decrescendo proporzionalmente al passo, man mano che il ciclo procede verso la soluzione, fino a che gli individui della popolazione non hanno tutti lo stesso bagaglio cromosomico; il processo è destinato a terminare se non interviene una mutazione a causare la ripartenza del processo.

In tale metodo, per valutare il grado di convergenza viene usato un termine denominato "Affinità della stringa di bit", che assume valore nullo se la generazione degli individui ha componente completamente casuale, pari a 100 se tale componente è nulla (ovvero tutti gli individui sono identici tra loro).

Tale numero risulta essere un valore medio, bit per bit, di tutti gli individui; assume quindi valore intermedio tra 0 e 1; a seconda che assuma valore maggiore o minore di 0.5 viene misurata la distanza rispetto a 1 o 0. Ad un valore pari a 0.5 corrisponde quindi solo componente casuale; pari a 0 se gli individui sono tutti identici.

Per la fase di selezione, infine, tale metodo fa uso della tecnica detta "Tournament", mediante la quale quattro individui vengono scelti in modo casuale nella popolazione e vengono confrontati due a due, consentendo ai migliori di riprodursi in altri due nuovi individui mediante la tecnica di crossover.

Il modello facente uso di algoritmi genetici applica uno schema risolutivo che si articola nelle seguenti fasi che si ripetono in modo ciclico fino all'ottenimento della soluzione:

- generazione mista randomica/metodica di una popolazioni di individui
- stima della funzione obiettivo e dei vincoli associati agli individui generati
- selezione/elezione dei migliori individui a genitori per una nuova popolazione

In fig. 2.3 viene mostrato il tipico diagramma di flusso relativo a modelli di ottimizzazione basati sull'uso di algoritmi genetici per la ricerca della soluzione.

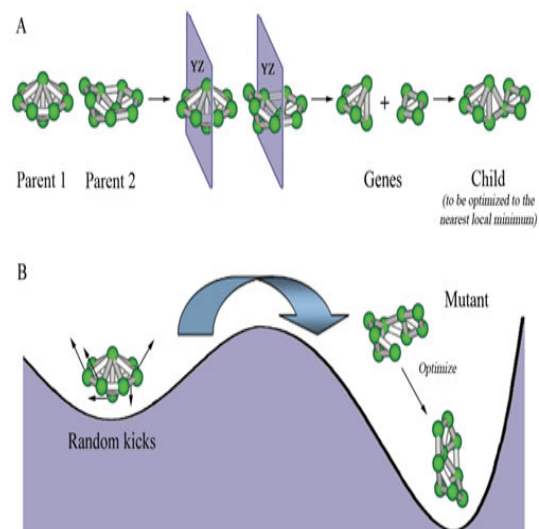


Figura 2.3: Esempio di diagramma di flusso di un modello di ottimizzazione basato sull'uso di algoritmi genetici per la ricerca della soluzione del problema.

Capitolo 3

Modello di sintesi di sistemi complessi

In tale capitolo vengono discussi i modelli utilizzati per la sintesi di sistemi complessi caratterizzati da legami funzionali non lineari. In particolare, vengono presi in esame i modelli basati sull'uso di reti neurali.

In funzione dell'applicazione e delle loro caratteristiche vengono descritti brevemente i modelli usati nei lavori disponibili in letteratura per la risoluzione di un'ampia gamma di problemi, soffermandosi su quelli di interesse nel presente lavoro.

Successivamente viene identificato il modello teorico usato nel presente lavoro: una rete neurale; viene quindi descritta la tipologia e l'architettura scelta per essa.

Vengono presentate le equazioni costitutive del modello, comprensivo di quello destinato all'addestramento della rete, che avviene mediante una tecnica "ad esempi".

Il modello numerico derivante viene verificato e validato in corrispondenza a varie configurazioni e per diversi casi test.

La validazione avviene: in modo diretto, identificando all'interno del dataset completo di addestramento una quota parte di dati da destinare non più alla determinazione dei pesi sinaptici, bensì unicamente alla verifica della capacità predittiva della rete in tali punti; in modo indiretto mediante confronto con i risultati ottenuti con un solutore commerciale basato sull'uso di una rete neurale in condizioni equivalenti a quella del presente modello.

3.1 Cenno ai modelli esistenti per la sintesi di sistemi complessi

Una delle esigenze di tale lavoro consiste nel sintetizzare i dati relativi alla superficie di risposta del sistema in modo accurato, in modo tale da poter esplorare detta superficie in modo rapido ed efficace in un successivo momento. In particolare il sistema in esame risulta essere definito dall'insieme delle prestazioni offerte dal propulsore al variare della sua configurazione geometrico/operativa. La relazione che intercorre tra le variabili di input e di output è complessa, così come dimostra il modello matematico, basato su una tecnica agli elementi di contorno, scelto qui per determinare

le prestazioni di un generico propulsore. La risoluzione del sistema di equazioni del problema aero/idrodinamico richiede del tempo per poter essere elaborata, in relazione anche alla accuratezza desiderata ed, in prima istanza, alle dimensioni del sistema. D'altra parte, l'algoritmo deputato all'esplorazione della superficie di risposta del sistema ha l'esigenza di poter esplorare detta superficie in modo veloce ed accurato.

La strada intrapresa in tale lavoro è quella di sintetizzare il sistema mediante l'utilizzo di una rete neurale addestrata sui dati ottenuti dal modello matematico (o, laddove disponibili, su dati sperimentali).

L'efficacia di tale scelta si può misurare comparando il tempo di esecuzione del modello matematico per la costruzione del set di dati della superficie di risposta del sistema e sintetizzato con un modello opportuno, con quello che si impiegherebbe se tale modello fosse direttamente interfacciato con l'algoritmo di esplorazione della superficie di risposta.

La rete neurale appartiene alla classe di tecniche di regressione non lineare utilizzate per sintetizzare sistemi caratterizzati da legami funzionali altamente non lineari. Modelli di sintesi basati su tecniche di regressione lineare possono trovarsi in Myers [28]. Tali modelli, basati su espressioni polinomiali per rappresentare il legame funzionale, sebbene siano caratterizzati da un tempo quasi nullo per la determinazione dei coefficienti propri del polinomio, mostrano una limitata capacità di rappresentare legami non lineari. Inoltre, a fronte di un'accuratezza maggiore mostrata nei punti di addestramento all'aumentare del grado del polinomio, tale effetto viene compensato, se non addirittura vanificato, da possibili errori della funzione commessi nell'intervallo tra due punti adiacenti.

Le reti neurali (Artificial Neural Networks), sviluppate a partire degli anni 30, basano la loro modellizzazione sul tentativo di simulare ciò che avviene in natura nel cervello. In esso, le informazioni vengono elaborate ed immagazzinate per mezzo di una fitta rete di neuroni strettamente interconnessi. A partire da un set di dati di input/output di un sistema, la rete neurale è capace di apprendere il legame funzionale che intercorre le variabili implicitamente, mediante la modifica dei pesi sinaptici.

I campi di utilizzo delle reti neurali sono molteplici. In campo finanziario, sono utilizzate per simulare il legame esistente tra variabili di mercato e l'andamento dei titoli finanziari con l'obiettivo di fornire proiezioni accurate il più possibile a lungo termine; in campo medico vengono utilizzate per il controllo e la gestione di protesi cardiovascolari; nei processi industriali sono impiegate per l'analisi e la gestione dei processi produttivi, mentre nel campo della robotica sono d'ausilio per i programmi di riconoscimento vocale, nella classificazione delle immagini, nella gestione dei movimenti degli arti artificiali.

Esempi di applicazione di reti neurali possono trovarsi in Doshi [14], in cui viene considerato un problema di gestione ottimale del traffico aereo, legando i dati di decollo ed atterraggio dei velivoli con misure di sicurezza; in tal modo si cerca di predire la posizione dei velivoli intorno all'area aeroportuale e garantire la corretta esecuzione delle azioni della torre di controllo in piena sicurezza ed in modo efficiente.

Nel lavoro presentato da Ramsey [32] una rete neurale è utilizzata nell'ambito della gestione dei processi produttivi. Le variabili funzionali tipiche del processo vengono messe in relazione tra loro in modo tale da poter analizzare la sensibilità della produzione rispetto alle stesse variabili.

Risultati provenienti dall'utilizzo di una rete di tipo *feed-forward*, addestrata mediante una tecnica di *back-propagation*, vengono confrontati con quelli ottenuti con modelli di regressione lineare e con modelli basati su splines adattive di regressione multivarianti, rispetto alla sensibilità al rumore dei dati sperimentali ed alla loro capacità di simulare relazioni altamente non lineari. In conclusione, l'efficacia della rete risulta comparabile con quella del modello multivariante e superiore a quello dei modelli di regressione lineare.

Trani [41] presenta una rete neurale per la simulazione dell'attività di volo di aerei commerciali, per predire il consumo di carburante, nell'ottica di una migliore gestione delle fasi di decollo, salita/discesa ed atterraggio del velivolo.

Bradley [5] confronta risultati ottenuti con una rete neurale basata su un'architettura di tipo *feed-forward* addestrata con tecnica di tipo *back-propagation* con quelli ottenuti mediante una tecnica di regressione logistica binomiale (statistica). I casi test relativi alla gestione delle risorse umane fanno riferimento a configurazioni del tipo a 17 variabili di input ed 1 variabile di output, arrivando a concludere una buona capacità della rete di simulare le relazioni input/output ed una deficienza nella possibilità di generalizzare i risultati al di fuori del dominio di addestramento.

Kee [21] utilizza una rete neurale per la sintesi del campo di velocità prodotto da un jet in condizioni di bollard pull, confrontando valori sperimentali con valori determinati per mezzo di modelli semi empirici, mentre Karunanithi [20] impiega una rete neurale per l'analisi dell'andamento del livello del fiume nella baia di Amburgo, con la funzione di poter gestire in maniera più efficiente la navigazione commerciale in quest'area.

Kim [23] applica una rete neurale per classificare in maniera metodica le differenti forme di carena di navi collocandole all'interno di famiglie prestabilite (carena piatta, con andamento di primo, secondo, terzo ordine), in modo tale da avere una stima accurata dei costi di realizzazione dello scafo durante la fase preliminare di progetto. Le forme di carena sono sintetizzate da punti di Gauss collocati sulla loro superficie.

Entrando nel merito del problema esaminato da tale lavoro, considerando la sintesi di prestazioni esercitate da eliche navali, tale attività è stata condotta in tempi differenti ed in modalità differenti da Oosterveld [29], Bernitsas [3] e Roddy [34]. Questi hanno esaminato il caso delle eliche convenzionali isolate della famiglia Wageningen, le cui prestazioni sono state testate sperimentalmente nei bacini olandesi del MARIN. Le prestazioni (spinta, coppia, efficienza) sono state sintetizzate in funzione dei parametri geometrico/operativi propri della configurazione testata (numero di pale, rapporto di area espansa, valore al 70% dell'apertura del passo lineare adimensionale, coefficiente di avanzo). Mentre Oosterveld e Bernitsas hanno applicato modelli di regressione lineare per il calcolo dei coefficienti polinomiali, Roddy ha utilizzato tali dati per l'addestramento di reti neurali. L'obiettivo comune è stato quello di sviluppare uno strumento rapido ed accurato per la determinazione delle prestazioni di eliche in una fase di design preliminare.

3.2 Modello Teorico Rete Neurale

Obiettivo della rete neurale è simulare relazioni funzionali (in genere non lineari) tra variabili di ingresso e di uscita, previo opportuno addestramento della stessa mediante "esempi" [36]. Il modello della rete neurale in oggetto è del tipo feedforward, ovvero il segnale viene trasmesso direttamente dallo strato di ingresso a quello di uscita attraverso la rete di neuroni. Il neurone di base è composto da un sommatore che riceve i segnali dai neuroni dello strato precedente

(compreso quello detto di soglia che è preposto ad “attivare” il neurone stesso) ed, in serie, un elaboratore di segnale che trasforma il valore di attivazione del neurone nel segnale di uscita dello stesso. I neuroni di base formano una maglia mediante le connessioni, cui sono associate dei pesi, ovvero coefficienti preposti ad amplificare o smorzare il segnale che vi scorre.

Formalmente, il legame funzionale che lega l’output di ogni neurone (j), appartenente allo strato (l), al suo input è descritto dall’equazione 3.1.

$$y_j^l(\mathbf{x}) = \mathbf{g}(a_j^l) = \mathbf{g}\left(\sum_{i=1}^N w_i^l x_i^{l-1} - \theta^{l-1}\right) = \mathbf{g}\left(\sum_{i=1}^{N+1} w_i^l z_i^{l-1}\right) \quad (3.1)$$

dove la sommatoria è estesa a tutti i neuroni (i) dello strato precedente ($l - 1$); a sua volta, l’output di ogni neurone costituirà l’input per i neuroni dello strato successivo. Da notarsi che, per comodità notazionale, il valore di soglia θ^{l-1} viene incluso nella sommatoria come il segnale proveniente da un neurone non collegato con altri ed il cui segnale di uscita è stato posto pari a $z_{N+1}^{l-1} = -1$.

Nella fig. 3.1, è mostrato lo schema di una tipica rete neurale feedforward ed il particolare costitutivo di un singolo neurone.

La funzione \mathbf{g} è una funzione continua, differenziabile e sigmoidale. Le funzioni più comuni sono la funzione logistica e la tangente iperbolica:

$$\begin{aligned} g(t) &= \frac{1}{1+e^{-ct}} & c \geq 0 & \quad 0 \leq g(t) \leq 1 \\ g(t) &= \frac{1+e^{-t}}{1-e^{-t}} & & \quad -1 \leq g(t) \leq 1 \end{aligned} \quad (3.2)$$

La rete neurale è caratterizzata da strati (di input, nascosti e di output) di neuroni connessi, ognuno, con tutti e soli i neuroni dello strato successivo.

Le proprietà di approssimazione delle reti neurali sono state oggetto di numerosi studi. In particolare è stato dimostrato che le reti a due strati, con uno strato nascosto sono approssimatori universali per le funzioni continue su insiemi compatti di \mathbf{R}^n , per un’ampia classe di funzioni di attivazione [36].

Inoltre, per le reti a tre strati, è stato dimostrato [25] che non esistono limiti inferiori sull’errore di approssimazione.

Ogni rete neurale, per poter essere impiegata, deve essere opportunamente addestrata, nel senso che deve essere determinato il vettore dei pesi e soglie \mathbf{w} , associati alle connessioni neurali, tramite i quali la rete è capace di ricostruire il segnale di output senza aver prima determinato esplicitamente il legame funzionale con il segnale di input.

Il problema dell’addestramento avviene presentando alla rete un set di valori di input/output, detto training set e, successivamente, risolvendo un problema di ottimizzazione dell’errore quadratico medio E_p , del tipo:

$$\min_{w \in R^m} E(w) = \sum_{p=1}^P E_p(w) = \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^{N_{out}} \frac{1}{2} e_{ip}(w) = \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^{N_{out}} \frac{1}{2} [y_i(X^p; w) - y_i^p]^2 \quad (3.3)$$

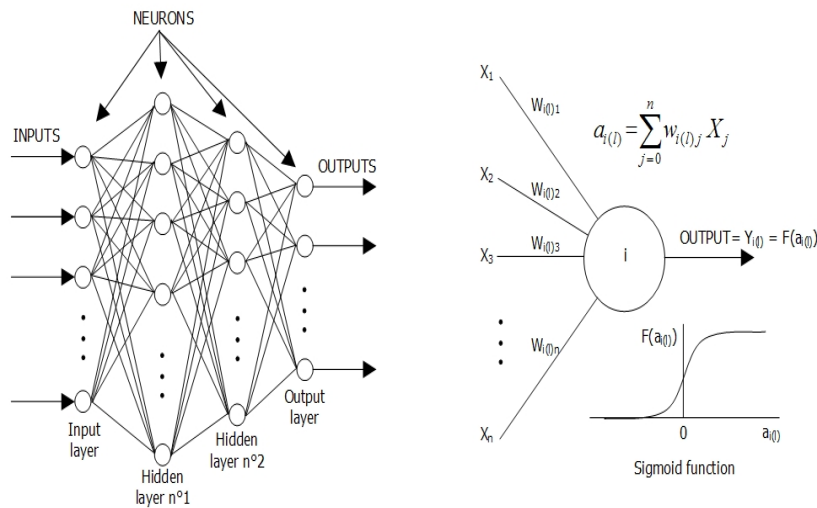


Figura 3.1: Schema tipico di una rete neurale (NN o ANN) multistrato di tipo *feed-forward*. Sinistra: architettura generale della rete. Destra: particolare della struttura dei singoli neuroni

in cui e_{ip} rappresenta l'errore sul p -mo campione e misura la distanza tra l'uscita desiderata y_i^p e l'uscita $y_i(X^p; w)$ fornita dalla rete, funzione del vettore di parametri di input e dei pesi delle connessioni sinaptiche.

Si suppone che la grandezza E sia una funzione continuamente differenziabile.

Scopo dell'addestramento è la modellizzazione dei legami funzionali tra variabili di input e di output; la capacità della rete di interpolare i dati è diretta conseguenza.

Per valutare la capacità della rete di sintetizzare sistemi complessi, viene utilizzata una tecnica di stabilizzazione strutturale, mediante la quale, parte dei dati del training set vengono destinati a valutare le prestazioni della rete, ovvero a creare il gruppo di validation set.

Per la risoluzione del problema di ottimizzazione di minimizzazione dell'errore è stato scelto il metodo di backpropagation in versione batch (vedi B.1), tale che ad ogni passo tutti i dati del training set vengono utilizzati per la determinazione dei nuovi valori dei pesi.

Il termine backpropagation deriva dal fatto che le derivate della funzione d'errore avvengono a ritroso, ovvero a partire dall'output della rete fino all'input.

In particolare, gli algoritmi di addestramento implementati nel presente modello, metodo del gradiente e di Gauss-Newton, sono basati sul calcolo della derivata dell'errore rispetto ai pesi delle connessioni.

La tecnica di aggiornamento dei pesi all'istante del ciclo di addestramento $k + 1$ è la seguente:

$$w(k + 1) = w(k) - \eta * \Delta[w(k)]$$

dove il termine $\Delta[w(k)]$ assume un'espressione diversa a seconda dell'algoritmo di addestramento considerato e rappresenta la direzione di discesa, mentre il termine η rappresenta il passo di discesa.

Nel metodo del gradiente il termine Δ è pari al gradiente dell'errore quadratico medio rispetto ai singoli pesi sinaptici, $\Delta[w_{ji}(k)] = \frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}}$, che dipende dalla connessione in virtù del legame esistente tra w_{ji} e il valore di attivazione del neurone j , a_j .

Si può scrivere allora:

$$\frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial E_p}{\partial a_j} \frac{\partial a_j}{\partial w_{ji}} \quad (3.4)$$

Posta la grandezza $\delta_j = \frac{\partial E_p}{\partial a_j}$, propria del neurone j , e denominata errore del neurone stesso e ricordando la definizione della funzione di attivazione $a_k = \sum_h w_{hj} z_h$, si ha:

$$\frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}} = \delta_j \frac{\sum_h w_{jh} z_h}{w_{ji}} = \delta_j z_i \quad (3.5)$$

Il problema risulta quindi risolto una volta determinate le grandezze z_i e δ_j , dove il primo lo si ottiene a partire dai neuroni dello strato di input per finire con quelli di output (rete feedforward), mentre il secondo termine presuppone il suo calcolo a ritroso, dall'output verso l'input (addestramento in backpropagation). Per dettagli sul calcolo del termine δ vedasi il par. B.1.

Nel metodo di Gauss Newton, invece, l'espressione del $\Delta[w(k)]$, deriva dalla soluzione di un problema ai minimi quadrati, ovvero:

$\min_{(w \in R^m)} E(w) = 1/2 \|e(w)\|^2$ con m pari in numero alle connessioni sinaptiche ed $e(w)$ è definito come il vettore dei residui $e_i(w)$, $i = 1, P$.

Definita la matrice Jacobiana $J(P \times m) = (\nabla(e_{ij})^T)$, $i = 1, P$; $j = 1, m$, ovvero,

$$\mathbf{J}(\mathbf{w}) = \begin{pmatrix} \nabla e_1(w)^T \\ \nabla e_2(w)^T \\ \vdots \\ \nabla e_P(w)^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial w_1} & \frac{\partial e_1}{\partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e_1}{\partial w_m} \\ \frac{\partial e_2}{\partial w_1} & \frac{\partial e_2}{\partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e_2}{\partial w_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial e_P}{\partial w_1} & \frac{\partial e_P}{\partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e_P}{\partial w_m} \end{pmatrix}$$

si ha $\nabla E(w) = \sum_{p=1}^P e_p \nabla e_p = J^T e = (m \times 1)$

Si ricava quindi: $\nabla^2 E(w) = \sum_{p=1}^P \nabla e_p \nabla^T e_p + \sum_{p=1}^P e_p \nabla^2 e_p = J^T J + Q(w) = (m \times m)$.

Il metodo di Gauss-Newton si basa sulla relazione $\nabla^2 E(w^k) d = -\nabla E(w^k)$, mediante la quale è possibile scrivere $-J^T e = [J^T J + Q(w)] d$.

Sotto l'ipotesi per cui la matrice $J^T J$ è dominante, si può scrivere $d = -\frac{J^T e}{J^T J} = -(J^T J)^{-1} J^T e$, che definisce la direzione di discesa, ovvero la soluzione del problema ai minimi quadrati suenunciato.

L'equazione che regola l'aggiornamento dei pesi è la seguente: $w^{k+1} = w^k - \eta (J^T J)^{-1} J^T e$, in cui la matrice $J^T J$ è resa uniformemente definita positiva mediante sovrapposizione di una matrice diagonale D ; il metodo di Gauss-Newton, nella versione Levenberg-Marquardt, assume la forma di $D = \mu^k I$, con μ scalare opportunamente scelto.

Il suo uso serve a forzare l'inversione della matrice $J^T J$, altrimenti singolare; gli elementi sulla sua diagonale assumono valori piccoli onde avere piccole perturbazioni sulla soluzione e, nel contempo, garantire la convergenza del ciclo di addestramento.

La costruzione della matrice J Jacobiana, presuppone il calcolo dei termini $\frac{\partial e_i}{\partial w_j}$. Per tale termine è possibile dimostrare con semplici passaggi: $\frac{\partial e_i}{\partial w_j} = \frac{\partial E_i}{\partial w_j} / \sum_{N_{out}} e_i$.

Per il termine $\frac{\partial E_i}{\partial w_j}$ vale quanto scritto in precedenza per il metodo di addestramento mediante gradiente.

3.3 Specifiche rete neurale: architettura ed algoritmo di addestramento

Il modello di rete neurale sviluppato in questo lavoro appartiene alla classe delle reti di tipo *feed-forward*, in cui segnale di input viene elaborato progressivamente dai neuroni degli strati iniziali verso quelli finali.

L'addestramento della rete avviene mediante determinazione del set ottimale di pesi sinaptici con un algoritmo di tipo *Levenberg-Marquardt*: tale algoritmo è basato sul calcolo del gradiente dell'errore rispetto ai pesi sinaptici, che avviene mediante una tecnica di tipo *back-propagation*, ovvero a partire dalle connessioni dello strato di uscita, a ritroso verso quelle dello strato di ingresso.

3.4 Verifica del modello di rete neurale: definizione del Test-Case

Un test-case, denominato 'Wageningen', è stato usato per verificare e validare i modelli numerici a vario livello, secondo varie modalità.

Nei laboratori sperimentali del Marin sono state sviluppate [24], realizzate e testate, nel corso dei decenni passati, eliche appartenenti a serie sistematiche, afferenti alla tipologia di:

- eliche convenzionali per l'equipaggiamento di imbarcazioni, secondo un classico schema di linea d'assi, in condizioni di flusso libero (*B - Series*);
- eliche destinate ad esercitare la loro funzione in combinazione a specifici condotti chiusi, detti mantelli, secondo uno schema noto come propulsore ad eliche intubate (*K_a - Series*);
- eliche a passo variabile, non oggetto di tale lavoro (*C_p - Series*).

Tali eliche presentano analogie costruttive tali per cui gli andamenti delle distribuzioni radiali delle varie grandezze geometriche sono gli stessi e le differenze risiedono sinteticamente nei seguenti parametri geometrici:

- numero delle pale Z (variabile da 2 a 7)
- rapporto di area espansa $EAR = A_e/A_0$, ovvero rapporto tra la superficie espansa dell'elica e l'area del disco elica (variabile complessivamente tra 0.30 e 1.05)

- passo lineare adimensionale rispetto al diametro elica, P/D (variabile complessivamente tra 0.5 e 1.4).

Più in particolare, la matrice delle eliche esistenti afferenti alla categoria delle B-Series è la seguente:

EAR	Z					
	2	3	4	5	6	7
0.30	X					
0.35		X				
0.40	X (0.38)		X			
0.45				X		
0.50		X			X	
0.55			X			X
0.60				X		
0.65		X			X	
0.70			X			X
0.75				X		
0.80		X			X	
0.85			X			X
0.90				X		
0.95					X	
1.00			X			
1.05				X		
P/D range	<i>B2</i> – 30 0.5-1.4 <i>B2</i> – 38 0.6-1.4	<i>B3</i> – 35 0.5-1.4 <i>Others</i> 0.5-1.4	0.5-1.4	0.5-1.4	0.5-1.4	0.5-1.4

Tabella 3.1: Tabella riassuntiva della serie sistematica Wageningen “B-Series”.

Il passo geometrico varia all’interno del range di riferimento con passo pari a $\Delta_{P/D} = 0.1$.

Una volta fissati i valori delle suddette grandezze geometriche è definita nota univocamente la geometria della corrispondente elica della serie ‘B’; viene quindi nominata mediante l’inclusione di due numeri che rendono conto rispettivamente del numero di pale e del rapporto di area espansa (alla sigla ‘B $A_1 - A_2$ corrisponderà un’elica di A_1 pale e con rapporto di area espansa pari a A_2).

Tutte le eliche sono state testate secondo prove di elica isolata, misurando le grandezze principali di prestazione al variare del coefficiente di avanzo $J = V/(nD)$; in particolare, le grandezze misurate sono: coefficiente di spinta $K_T = T/(\rho n^2 D^4)$, coppia $K_Q = Q/(\rho n^2 D^5)$ ed efficienza $\eta = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q}$.

3.4.1 Verifica dei risultati mediante uso del validation set

La prima azione condotta a valle dello sviluppo e la codifica numerica del modello teorico è stata la verifica delle potenzialità della rete per i seguenti casi (descritti seguendo un ordinamento a complessità crescente):

- fissati Z ed A_e/A_0 , verificata la capacità della rete di simulare l'effetto di P/D e J sulle grandezze di uscita; l'intero dataset è stato utilizzato per la fase di addestramento (par. B.2.1)
- fissato Z , verificata la capacità della rete di simulare l'effetto di A_e/A_0 , P/D e J sulle grandezze di uscita; l'intero dataset è stato utilizzato per la fase di addestramento (par. B.2.2)
- caso $Z = 4$ con, rispetto alla grandezza J , metà punti usati per l'addestramento e metà per la validazione e viceversa; i risultati sono stati confrontati con quelli precedentemente ottenuti con tutto il set di dati usati per l'addestramento (par. B.2.3)
- caso completo rispetto alle variabili Z , A_e/A_0 , P/D e J con, rispetto alla grandezza J , metà punti usati per l'addestramento e metà per la validazione: performati due casi a seconda della destinazione d'uso dei due dataset (presente paragrafo, mostrato di seguito)
- verifica dell'influenza del numero di punti disponibili per l'addestramento sulla capacità della rete di essere addestrata e di simulare le grandezze di output: per il caso $Z = 4$, viene valutata l'influenza del parametro A_e/A_0 , che presenta 5 punti: 0.40, 0.55, 0.70, 0.85, 1.00. Sono stati considerati tre sottocasi, togliendo, dal set completo di addestramento i dati relativi a:
 - 0.70 ottenuto dal dataset completo togliendo i dati relativi al punto centrale, creando una finestra la cui estensione è pari al 50% del dominio; verifica della capacità interpolativa della rete (par. B.2.4)
 - 0.55 e 0.85 ottenuto in analogia al precedente punto togliendo tali due punti e creando altrettante finestre la cui estensione è pari al 50% del dominio; verifica della capacità interpolativa della rete (par. B.2.4)
 - 1.00 ottenuto togliendo un punto distante il 33% dell'ampiezza del dominio restante dal punto più vicino, verificando la capacità estrapolativa della rete (par. B.2.4)
- verifica dell'influenza dei parametri caratteristici dell'architettura della rete: numero di strati nascosti e numero di neuroni per singolo strato; test ottenuto per il caso $Z = 4$; analisi dell'influenza del numero di neuroni per strato e del numero di strati minimi da usare per ottenere un dato errore (par. B.2.5)
- verifica della capacità della rete di ottenere soluzione aggiungendo punti al set di addestramento e contemporanea comparazione rispetto al caso completo, in termini di tempo impiegato ad ottenere la soluzione; caso $Z = 4$ con metà punti di addestramento su J (par. B.2.6): confronto tra:
 - caso completo: pesi connessioni inizializzati random
 - caso incompleto dei dati relativi ad $A_e/A_0 = 0.7$ e $P/D = 1.00$ con pesi inizializzati random; restart del caso completato dei dati mancanti con pesi inizializzati al valore a convergenza del precedente caso

- verifica della convergenza su un caso particolare come il B_6 , per il quale sono presenti errori localizzati e non distribuiti relativi a $A_e/A_0 = 0.95$ e $P/D = 1.2, 1.3$ (par. B.2.7). Risultati ottenuti con:
 - restart.
 - incrementando il numero di neuroni per singolo strato nascosto

Più in dettaglio, i risultati dei suddetti punti vengono mostrati: di questi, solo i risultati relativi a due dei tre segnali di uscita della rete, K_T ed η , poichè il K_Q risulta essere dello stesso tipo del K_T , sia in termini di segnale da riprodurre che in termini di risposta della rete.

Di tutti i risultati prodotti vengono mostrati solo i più significativi mentre i restanti sono riportati, per chiarezza espositiva, nel par. B.2.

influenza del numero di dati utili per l'addestramento

Di seguito vengono mostrati i risultati relativi alla verifica dell'influenza del numero di punti utilizzati per l'addestramento sulla capacità predittiva della rete.

L'analisi è stata condotta considerando l'addestramento su tutti i valori possibili di Z , A_e/A_0 , P/D e J come mostrati nella matrice iniziale (3.1), con metà punti dedicati all'addestramento e metà alla validazione della rete neurale. Essa riflette il caso esposto nel par. B.2.3, relativo ad un dataset di addestramento di minore estensione.

Nella fattispecie, le figure seguenti mostrano il totale dei punti obiettivo ($Train_{TOT}$), la ricostruzione del segnale nei punti di addestramento (rispettivamente $Train_{Part_1}$ e $Train_{Part_2}$) e la validazione della rete nei restanti punti ($Valid_{Part_1}$ e $Valid_{Part_2}$).

A titolo di esempio vengono mostrati i risultati fissati i parametri $Z = 5$ ed $A_e/A_0 = 0.60$ (gli altri sottocasi sono del tutto analoghi in termini di risultati) (figg. 3.2, 3.3).

Mentre per il caso esposto nel par. B.2.3 è stata addestrata una rete con dati relativi a $Z = 4$, la rete esaminata in questo paragrafo è stata addestrata considerando per Z tutti i possibili valori (da 2 a 7); l'addestramento su un set di dati più esteso si ripercuote in un errore medio maggiore, in tempi maggiori di calcolo e, contemporaneamente, in una maggiore capacità della rete stessa di replicazione dei segnali di uscita in termini di estensione del dominio dell'iperspazio.

3.4.2 Verifica dei risultati mediante comparazione con altri modelli di rete neurale

Il presente modello di rete neurale è stato oggetto di ulteriore verifica mediante confronto dei risultati con quelli ottenuti mediante l'uso di un codice commerciale, Neurosolutions. Il test-case considerato è il medesimo descritto nel precedente paragrafo 3.4, riguardante il dataset sperimentale completo di prestazioni offerte da eliche convenzionali Wageningen di serie B operanti in condizione di elica isolata; sono state valutate le capacità dei modelli di andare

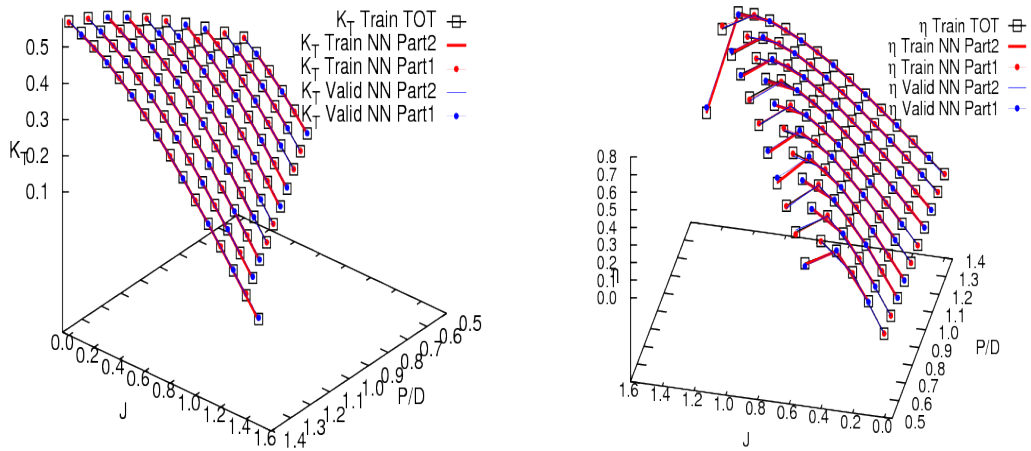


Figura 3.2: Caso completo. Verifica risultati NN per $Z = 5$ ed $A_e/A_0 = 0.60$: vista 3D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.

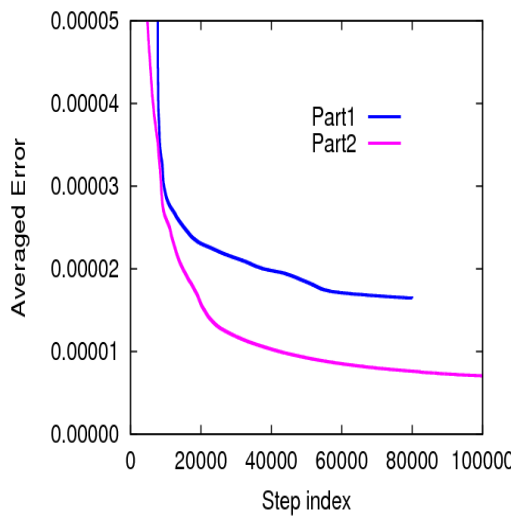


Figura 3.3: Caso completo. Verifica risultati NN per $Z = 5$ ed $A_e/A_0 = 0.70$ e sottocasi: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.

a convergenza durante la fase di addestramento, mediante l'analisi dell'andamento dell'errore quadratico medio in funzione del passo iterativo. I modelli sono stati confrontati secondo l'analisi dell'errore locale commesso sui dati di validazione, oltre che mediante confronto diretto dei segnali ricostruiti in tali punti.

Le reti neurali "ANN CNR-INSEAN" e "Neurosolutions" considerate nel primo confronto presentano le seguenti caratteristiche (vedi fig. 3.4):

- 3 strati nascosti

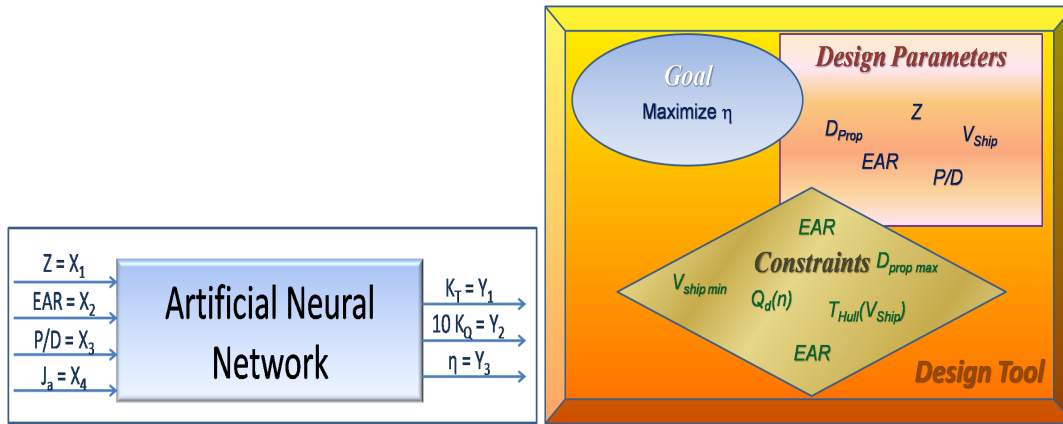


Figura 3.4: Confronto tra il solutore ANN CNR-INSEAN e Neurosolution. Sinistra: schema della rete neurale considerata. Destra: schema del dataset di test.

- 13 neuroni per strato nascosto
- 4 segnali di input
- 3 segnali di output
- dati di input/output normalizzati all'intervallo $[0, 1]$
- funzione di trasferimento dei neuroni: tangente iperbolica con pendenza unitaria nell'origine
- algoritmo di addestramento di tipo batch basato su tecnica di risoluzione del tipo: Levenberg-Marquardt per ANN CNR-INSEAN; gradiente coniugato per Neurosolutions
- pesi delle connessioni sinaptiche inizializzati random nell'intervallo $[0, 1]$

Un secondo confronto è avvenuto tra tali reti con le seguenti caratteristiche:

- 2 strati nascosti
- 15 neuroni per strato nascosto per ANN CNR-INSEAN; 12 per primo strato, 15 per il secondo strato nella rete Neurosolutions
- 4 segnali di input
- 3 segnali di output
- dati di input/output normalizzati all'intervallo $[-1, 1]$
- funzione di trasferimento dei neuroni uguale a tangente iperbolica con pendenza unitaria nell'origine
- algoritmo di addestramento di tipo batch basato su tecnica di risoluzione del tipo Levenberg-Marquardt

- pesi delle connessioni sinaptiche inizializzati random nell'intervallo $[0, 1]$

Di seguito vengono mostrati gli andamenti 3D degli errori commessi da entrambi i modelli di rete neurale per il coefficiente di spinta ed efficienza per il sottocaso relativo a $Z = 4$, $A_e/A_0 = 0.85$. In particolare, per $P/D = [0.6; 1.0; 1.4]$, vengono messi a confronto i risultati relativi al solo coefficiente di spinta.

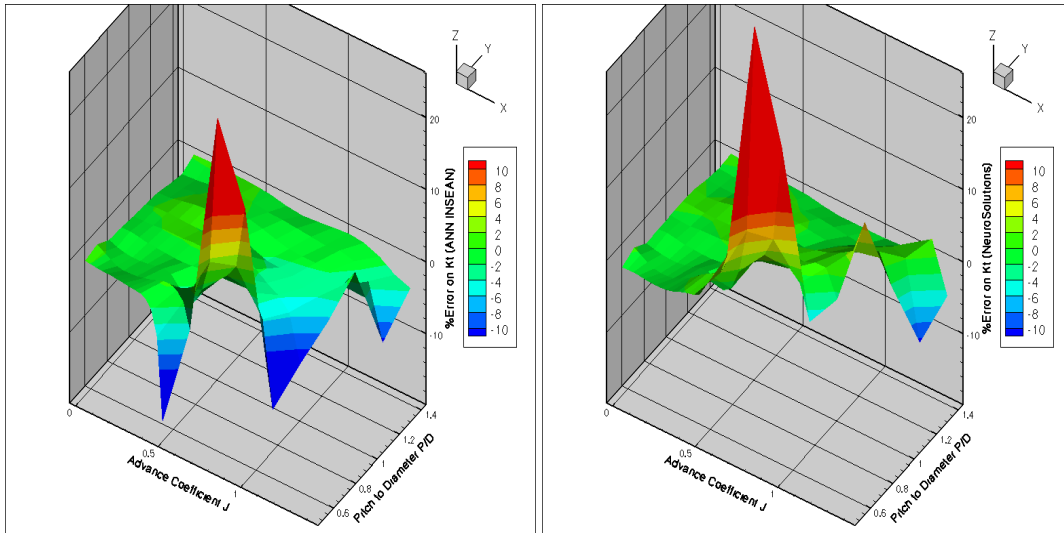


Figura 3.5: Caso completo. Mappa 3D dell'errore commesso da diversi solutori ANN per il sottocaso relativo ad $Z = 4$ ed $A_e/A_0 = 0.85$: coefficiente di spinta. Sinistra: ANN CNR-INSEAN. Destra: Neurosolution.

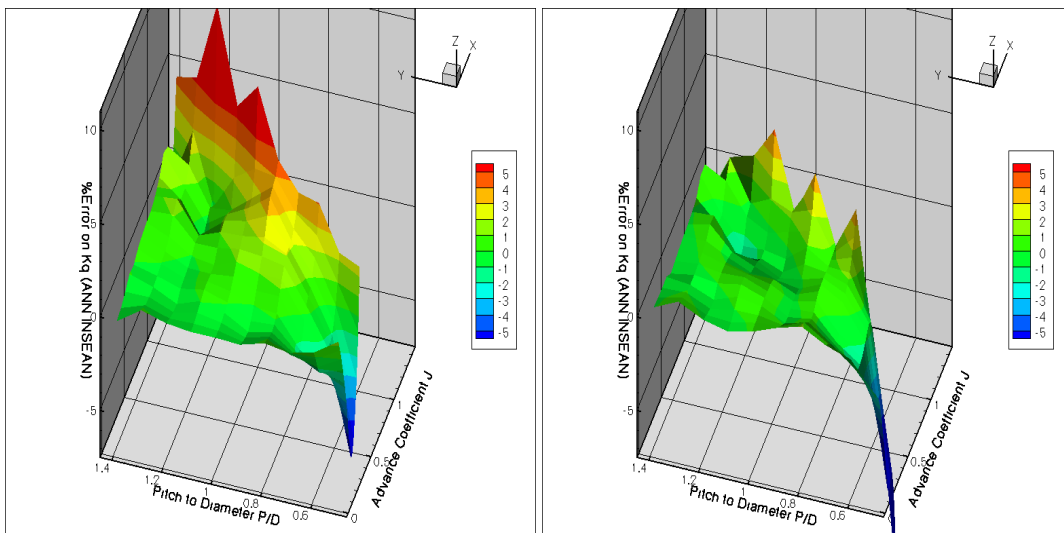


Figura 3.6: Caso completo. Mappa 3D dell'errore commesso da diversi solutori ANN per il sottocaso relativo ad $Z = 4$ ed $A_e/A_0 = 0.85$: coefficiente di coppia. Sinistra: ANN CNR-INSEAN. Destra: Neurosolution.

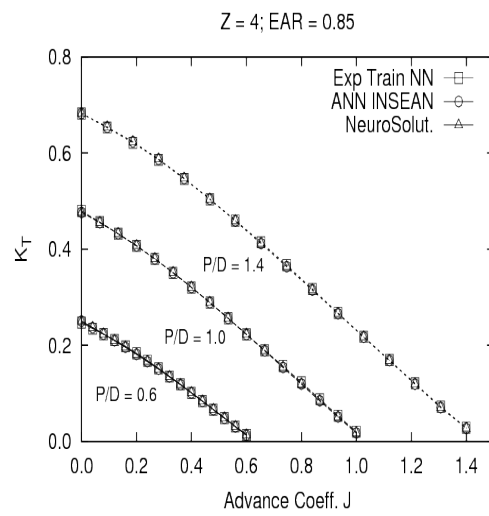


Figura 3.7: Caso completo. Andamento coefficiente di spinta il sottocaso relativo ad $Z = 4$ ed $A_e/A_0 = 0.85$ $P/D = [0.6; 1.0; 1.4]$ per diversi solutori ANN. Sinistra: ANN CNR-INSEAN. Destra: Neurosolution.

Capitolo 4

Solutore Aero/Idrodinamico

In tale capitolo vengono presentati i modelli numerici utilizzati per l'analisi di propulsori e velivoli ad ala rotante, utili ad essere impiegati nella fase di design preliminare.

Una breve descrizione dei modelli descritti nei lavori disponibili in letteratura introduce l'argomento.

Successivamente viene definito il modello teorico alla base del solutore aero/idrodinamico usato in questo lavoro per l'analisi di propulsori in configurazione multi-corpo. Una descrizione delle ipotesi di base e della formulazione teorica, comprensiva delle equazioni costitutive e delle condizioni al contorno del problema viene presentata mediante una formulazione differenziale.

Il problema, nella sua forma discretizzata, viene affrontato e la sua risoluzione viene descritta per mezzo di una formulazione integrale.

Il modello viene applicato ad un caso di interesse per la validazione dei risultati mediante confronti numerico-sperimentali.

4.1 Modelli per l'analisi aero/idrodinamica

Il modello di disco attuatore è uno dei primi e semplici modelli per l'analisi aero/idrodinamica di rotori [22]. L'elica si suppone lavori in una corrente fluida uniforme e viene approssimata con un disco attuatore capace di un salto discreto di pressione attraverso il suo piano. Applicando l'equilibrio di massa, momento e di conservazione dell'energia si perviene alla soluzione. Al disco attuatore compete la massima efficienza ottenibile al limite da un'elica reale in assenza di mozzo, con un numero infinito di pale, di infinitesima estensione di corda e traslante a velocità infinitesima.

Sempre per condizioni di flusso a monte uniforme, Betz assicura l'efficienza massima ottenibile da un'elica, in corrispondenza ad una distribuzione radiale costante di passo, ovvero di distribuzione ottima di circolazione. Lerbs nel suo lavoro estende i risultati di Betz per condizioni di inflow assialsimmetrico: per esso il passo della direzione indicata dalle linee vorticali del flusso risultante è proporzionale alla radice quadrata del flusso incidente allo stesso raggio. Una volta nota la distribuzione di velocità tali condizioni assicurano la conoscenza della circolazione ottima corrispondente.

Con l'avvento dei calcolatori, modelli più sofisticati e realistici hanno cominciato ad essere usati.

Kerwin [22] propone la risoluzione di una superficie portante mediante un metodo detto di *vortex lattice*; la superficie del corpo viene rappresentata per mezzo di una serie di vortici posizionate sulla superficie media della pala. L'intensità dei vortici viene risolta sotto il soddisfacimento di opportune condizioni al contorno cinematiche e dinamiche. La formulazione proposta è stata estesa per lo studio del flusso attorno ad una generica pala rappresentata per mezzo di una distribuzione radiale di passo, corda, rake, skew e spessore. Sulla superficie della scia rilasciata al bordo d'uscita della pala viene posizionato una superficie di vortici congruenti con i carichi agenti sulle pale e con il campo di vorticità generata dalle stesse. Mediante inclusione di sorgenti sulla superficie media palare viene portato in conto l'effetto di spessore delle sezioni e quindi una stima degli effetti tridimensionali sul flusso risultante.

Tale modello è stato sviluppato in seguito da Kinnas, Fine, Coney [10] per lo studio di eliche cavitanti e per portare in conto la presenza del mozzo e di un eventuale mantello coassiale all'elica.

Mishima [27] estende il modello all'uso in una procedura di ottimizzazione, mentre Kinnas e Pyo [31] sviluppano un modello per l'adattamento della superficie della scia rilasciata dall'elica al campo di velocità vigenti nel dominio fluido.

Kinnas [18] sviluppa il modello accoppiando il modello di vortex lattice (VLM) con un modello ai volumi finiti (FVM) basato su un modello di flusso Euleriano per lo studio di configurazioni multi-corpo tipo eliche controrotanti ed eliche intubate. Mediante il VLM viene risolto il flusso intorno a ciascuno dei corpi in esame, mentre il FVM viene applicato al campo fluidodinamico che li contiene, portando in conto la loro presenza per tramite di dischi attuatori. L'interazione tra i due modelli avviene secondo una tecnica di body force e la tecnica risolutiva è di tipo iterativa. Vengono calcolate mediante VLM le forze generate da ciascuno dei corpi, sotto l'azione del campo di velocità predetto dal FVM; queste vengono distribuite sul contorno del disco attuatore e la soluzione FVM viene ricalcolata con il campo di velocità da assegnare nel modello VLM.

Nell'ambito dei modelli validi per lo studio di flussi non viscosi, che ammettono potenziale di velocità, i modelli agli elementi di contorno rappresentano un buon compromesso tra accuratezza dei risultati e velocità di esecuzione. Per essi i corpi sono rappresentati per mezzo di una sovrapposizione di sorgenti e doppiette sulla superficie tridimensionale del corpo e la soluzione è solitamente ottenuta in forma integrale nei termini di potenziale di velocità della superficie di contorno del volume fluidodinamico. Baltazar [1] utilizza tale modello per lo studio di configurazioni di eliche intubate; egli si sofferma sull'analisi dell'interazione pala-mantello in corrispondenza della regione di gap fra il tip palare e la superficie interna del mantello, in cui i fenomeni viscosi rivestono un ruolo primario nella definizione del campo di velocità risultante. Tale modello prescrive il punto di distacco della scia di un corpo portante; la scelta della posizione di questo punto risulta immediata per bordi di uscita aguzzi, non altrettanto per profili tozzi come quelli comunemente adottati per le sezioni base dei mantelli in uso in campo navale. L'influenza della posizione del punto di distacco sulle prestazioni predette viene analizzata dall'autore; inoltre il modello viene arricchito con l'inclusione di una scia vorticoso che si stacca dal tip palare, migliorandone l'accuratezza dei risultati rispetto ai dati sperimentali disponibili.

Per poter catturare fenomeni legati alla viscosità del flusso, sono stati sviluppati modelli basati sulla risoluzione diretta

delle equazioni di Navier Stokes (RANSE). La formulazione prevede la soluzione delle incognite in tutto il volume fluidodinamico; per tale motivo questi modelli sono anche detti modelli di campo. Tra questi, in riferimento alla configurazione studiata in tale lavoro, si cita il modello proposto da Hoekstra [19]; in esso eliche in configurazione intubata vengono studiate risolvendo le equazioni del flusso intorno alla geometria definita dal mantello, mentre la presenza dell'elica viene portata in conto per mezzo di un modello semplificato di disco attuatore, secondo una tecnica di body-force; le prestazioni dell'elica vengono stimate mediante un modello semplificato e distribuite sul contorno del disco mediante una legge prefissata radiale. Mediante tale modello, oneroso dal punto di vista computazionale nonostante la semplificazione sulla rappresentazione dell'elica, è possibile catturare un fenomeno ricorrente per tali applicazioni: il distacco di vena fluida sul bordo esterno del mantello che influisce sulla conseguente forma della scia rilasciata dal bordo di uscita dello stesso, differenziandola rispetto a quella in caso di flusso attaccato, predicibile con un modello valido per lo studio di flussi a potenziale.

Sanchez-Caja [35] utilizza lo stesso modello per lo studio del flusso viscoso intorno a configurazioni di tipo eliche intubate con inclusione di timone a valle del propulsore. Mediante la semplificazione di campi di velocità mediate nell'arco di una rivoluzione dell'elica, le equazioni di Navier-Stokes vengono risolte intorno al propulsore in toto, senza sostituire la presenza dell'elica con un disco attuatore equivalente da un punto di vista delle forze indotte nel campo circostante. Viene analizzato il distacco della vena fluida sul bordo esterno del mantello, analizzato l'effetto di bloccaggio del timone sulle prestazioni ed i risultati ottenuti sono confrontati con risultati sperimentali disponibili.

Benchè lo sviluppo della tecnologia informatica permetta calcoli sempre più veloci e quindi lo studio idrodinamico mediante modelli numerici sempre più complessi, la tendenza attuale è quella di sviluppare modelli teorici ibridi, accoppiando modelli accurati ed onerosi e modelli semplificati e veloci. Prendendo spunto dal modello esposto da Hoekstra [19], forze di base da distribuire sulla superficie di contorno del disco attuatore possono essere predette da un qualsiasi modello. In particolare, come mostrato da ZSU [30], viene utilizzato un modello potenziale a pannelli per il calcolo delle prestazioni dell'elica immersa in un campo di velocità predetto dal modello viscoso. La tecnica prevede una risoluzione di tipo iterativa.

Il presente lavoro si limita a considerare un modello basato sugli elementi di contorno. La ragione di ciò è legata alla scelta di sviluppare un approccio caratterizzato da un ridotto onere computazionale e, in particolare, da ridotti tempi di calcolo per l'analisi di fenomeni complessi, quali il flusso non stazionario in presenza di più corpi e nell'ottica di un suo utilizzo come strumento di design. Questo tipo di problemi risulta tuttora di difficile studio mediante modelli di campo, caratterizzati da tempi di calcolo proibitivi; il loro utilizzo è, piuttosto, limitato in fase di verifica delle soluzioni ottenute con modelli semplificati e rapidi.

Il modello per lo studio di eliche in configurazione intubata sfrutta per la sua risoluzione la caratteristica di coassialità di tali corpi. In virtù di ciò il mantello può essere trattato al pari di quanto viene fatto per il mozzo, il quale risulta fisso in un sistema di riferimento solidale con la pala. L'unico accorgimento da usare riguarda la soluzione calcolata sul mantello: poichè il mantello è nella realtà un corpo fisso, la soluzione su esso dovrà essere necessariamente periodica in virtù della rotazione dell'elica. In tal modo la scia rilasciata dal mantello assume un andamento elicoidale di passo pari alla direzione indicata dalla composizione della velocità di avanzamento e la velocità di rotazione dell'elica.

Mediante tale artificio è possibile una notevole riduzione dei tempi di calcolo a parità di accuratezza rispetto ad un classico approccio “time-marching” in cui il mantello è fisso nel sistema di riferimento aerea.

4.2 Metodo delle equazioni integrali per lo studio di flussi potenziali incompressibili non stazionari

In questo paragrafo è esposta la trattazione teorica, nel dominio continuo dello spazio e del tempo, del problema preso in esame: in particolare verrà presa in esame un’elica navale operante all’interno di un condotto assialsimmetrico, nominato mantello o duct.

Viene mostrata la formulazione classica del problema differenziale, dei flussi potenziali in presenza di scia potenziale, studiato nel dominio infinito dello spazio.

Il modello valido per lo studio di propulsori ad ala rotante in configurazione isolata viene esteso, introducendo dei termini rappresentativi del mantello, posto a distanza finita dal corpo.

Definisce il problema la definizione di opportune condizioni al contorno sul potenziale e sulla sua derivata normale, ovunque nel campo di interesse.

Il problema differenziale è risolto mediante una formulazione integrale; la sua applicazione al problema preso in esame prevede, per la scia rilasciata dai corpi portanti, una discretizzazione mediante superfici elicoidali di forma prescritta. Risolto il problema in termini di potenziale di velocità tutte le grandezze di interesse, sono derivabili.

4.2.1 Formulazione differenziale; condizioni al contorno sul corpo

Viene considerato, come oggetto dello studio, un flusso che, per ipotesi, risulta non compressibile e non viscoso. Fissato un generico istante di tempo t_0 , viene imposta l’ulteriore condizione di irrotazionalità del campo.

Sotto tali ipotesi, sfruttando il teorema di Kelvin sulla omogeneità della derivata materiale della circolazione del vettore velocità, si deduce l’irrotazionalità della velocità per ogni istante di tempo.

Ciò è condizione necessaria e sufficiente per l’esistenza di un potenziale scalare, il cui gradiente risulta essere proprio il vettore velocità.

Il flusso è cosiddetto potenziale nella regione di volume fluido in cui vale la precedente condizione di irrotazionalità. Ma, poichè, in tali condizioni, la risultante delle forze di pressione agenti sulla superficie del corpo è nulla (come denuncia il paradosso di d’Alambert), occorre introdurre una regione per cui non valga la condizione di irrotazionalità del flusso: la scia, luogo dei punti, sotto l’ipotesi di flusso attaccato, per cui non si può dire che valga il teorema di Kelvin, ovvero a vorticità non nulla.

Tale artificio matematico si può intuitivamente comprendere immaginando che le particelle che lambiscono la zona superiore ed inferiore del corpo si riuniscono al bordo d’uscita con velocità, in generale, differenti, seppure con mede-

sima componente normale alla superficie della scia (entro cui vengono convette a valle); ciò provoca l'insorgere di un moto rotazionale, detto vortice.

In assenza di viscosità, la superficie di contatto delle due masse fluide individua, quindi, una zona a vorticità non nulla e concentrata, che viene convetta a valle con velocità costante, pari a quella con cui le particelle fluide si sono staccate dal corpo.

Si può, così, disaccoppiare il problema cinematico da quello del calcolo delle pressioni indotte sul corpo, risolvendo il problema non più in termini di velocità, bensì di potenziale accoppiato alle opportune condizioni al contorno.

L'utilità dell'introduzione del potenziale ϕ emerge dalla formulazione differenziale del problema. L'equazione di continuità, scritta in termini di potenziale diventa

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (4.1)$$

L'equazione di Eulero, integrata, fornisce l'espressione del teorema di Bernoulli per flussi incompressibili (in un sistema di riferimento inerziale, solidale al fluido in quiete):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \|\nabla \phi\|^2 + \frac{p}{\rho} = \text{cost.} \quad (4.2)$$

La (4.1) è un'equazione lineare nella sola incognita ϕ . Risolta questa il campo di velocità si ottiene calcolando in ogni punto il gradiente della ϕ ; note ϕ e \mathbf{v} , la (4.2) consente infine di ricavare la pressione.

In questo modo il problema cinematico risulta disaccoppiato da quello della determinazione della pressione e quindi dei carichi idrodinamici agenti sul corpo.

Le equazioni (4.1) e (4.2) vanno completate con le opportune condizioni al contorno; queste dipendono dal sistema di riferimento adottato: nel seguito verrà considerato il caso di un riferimento solidale al corpo, rappresentato da un'elica navale, la quale, quindi, nel codice numerico, presenta velocità nulla.

Pertanto, il sistema di riferimento è di tipo rototraslante.

In tale sistema di riferimento, la corrente incidente sull'elica ha una componente traslatoria, \mathbf{v}_{adv} , che risulta uguale in modulo, e di verso contrario, alla composizione tra la velocità di avanzamento del rotore e quella imperturbata della particella fluida, mentre il contributo rotante, $\mathbf{v}_{rot} = -\omega \times \mathbf{r}$, è uguale e contrario alla velocità periferica che avrebbe un punto dell'elica posto a distanza \mathbf{r} dall'asse.

Si definisce, allora, una velocità incidente al corpo non perturbativa data da:

$$\mathbf{v}_I = \mathbf{v}_{adv} + \mathbf{v}_{rot}$$

La formulazione seguente considera, allora, per una particella fluida presente nel dominio, una velocità totale, \mathbf{q} , composizione di una velocità imperturbata e di quella di perturbazione, che viene espressa in funzione del potenziale ϕ :

$$\mathbf{q} = \mathbf{v}_I + \nabla \phi \quad (4.3)$$

Si indica con S_B la superficie delle pale e del mozzo ad esso associato e con S_D quella del mantello.

Sulla superficie dell'elica $S_B \cup S_D$ si impone la condizione di non penetrazione del flusso alla parete (condizione di

impermeabilità); indicando con \mathbf{n} la normale alla superficie:

$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = 0$$

Per il potenziale la stessa condizione si scrive (essendo per definizione di derivata direzionale, $\frac{\partial \phi}{\partial n} = \nabla \phi \cdot \mathbf{n}$):

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\mathbf{v}_I \cdot \mathbf{n} \quad \forall \mathbf{x} \in S_B, S_H, S_D$$

4.2.2 Condizioni al contorno sulla scia

La scia costituisce per il campo potenziale una superficie di discontinuità.

Ad essa è associata la vorticità generata dai corpi portanti (pala e mantello) e staccatasi dal loro trailing edge.

Applicando la conservazione della massa e della quantità di moto attraverso la superficie della scia, si trova la seguente condizione per il potenziale:

$$\Delta \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} \right) = 0$$

Per la pressione invece risulta:

$$\Delta p = 0 \quad (4.4)$$

In altre parole, le particelle che si staccano dal corpo viaggiano sulla superficie superiore ed inferiore, con velocità la cui componente normale alla superficie stessa, si ammette che si conservi. Analogamente risulta nulla la differenza di pressione attraversando la suddetta discontinuità.

Vale la relazione seguente in termini di derivata materiale:

$$\frac{D_w}{Dt} \Delta \phi = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \overline{\mathbf{v}_w} \cdot \nabla \right) \Delta \phi = 0 \quad (4.5)$$

Il pedice w indica che la derivata viene fatta seguendo il moto dei punti della scia, che viaggiano a velocità $\overline{\mathbf{v}_w}$.

La condizione al contorno da utilizzare sulla scia nella formulazione differenziale per il potenziale stabilisce quindi che la discontinuità del potenziale relativa ad un punto materiale della scia resta invariata durante il moto.

4.2.3 Legame tra la discontinuità del potenziale sulla scia e la distribuzione del potenziale sul corpo

La discontinuità del potenziale attraverso la scia deve soddisfare la condizione (4.5). Inoltre essa è legata alla distribuzione del potenziale sulla superficie del corpo; indicando con \mathbf{x}_w un punto appartenente alla scia, deve risultare:

$$\lim_{\mathbf{x}_w \rightarrow \mathbf{x}_{t.e.}} \Delta \phi(\mathbf{x}_w) = \Delta \phi_{t.e.} \quad (4.6)$$

dove $\mathbf{x}_{t.e.}$ è il punto sul bordo d'uscita (in inglese "trailing edge") che si trova sulla stessa linea materiale del punto \mathbf{x}_w , mentre $\Delta \phi_{t.e.}$ rappresenta la differenza tra i valori assunti dal potenziale in due punti posti al bordo d'uscita sulla

parte superiore e su quella inferiore della superficie del corpo. In virtù della equivalenza esistente tra una distribuzione su una superficie di doppiette ed uno strato vorticoso (Batchelor [2]), la (4.6) esprime la condizione che al bordo di uscita non ci sia vorticità concentrata (ipotesi di Joukowski) allo scopo di ottenere dal modello di flusso potenziale adottato una soluzione capace di descrivere la fenomenologia di un flusso viscoso al tendere a zero della viscosità del fluido.

Se $\tau(\mathbf{x}, t)$ è il tempo di convezione relativo al punto \mathbf{x} , ovvero il tempo impiegato da un punto materiale per essere convetto dal bordo d'uscita al punto \mathbf{x} , per la discontinuità del potenziale in \mathbf{x} all'istante di tempo t , $\Delta\phi(\mathbf{x}, t)$, si ha, in base alla condizione al contorno sulla scia (4.5) e alla (4.6):

$$\Delta\phi(\mathbf{x}, t) = \Delta\phi_{t.e.} [t - \tau(\mathbf{x}, t)] \quad (4.7)$$

dove τ indica il tempo di convezione delle particelle fluide dal bordo d'uscita della pala al generico punto di scia \mathbf{x} .

Di conseguenza, esplicitando la dipendenza del potenziale dalla variabile tempo, la (C.3) va scritta:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \phi(\mathbf{x}_*, t) &= \oint_{S_B \cup S_D} \left[G \frac{\partial\phi(t)}{\partial n} - \phi(t) \frac{\partial G}{\partial n} \right] dS \\ &- \int_{S_{WB} \cup S_{WD}} \left[\Delta\phi_{t.e.}(t - \tau) \frac{\partial G}{\partial n} \right] dS \end{aligned} \quad (4.8)$$

4.3 Discretizzazione del problema

La soluzione numerica del problema integrale impostato nei paragrafi precedenti viene ottenuta mediante una tecnica agli elementi di contorno. Le superfici del corpo e della scia vengono suddivise in pannelli quadrilateri; affinché la geometria discretizzata sia *vicina* a quella continua¹, e per permettere il calcolo analitico degli integrali superficiali di sorgente e doppietta che caratterizzano la formulazione, una scelta possibile è quella di adottare elementi di paraboloidi iperbolici.

Nel seguito indicheremo con M_B il numero di pannelli in direzione della corda e N_B quello in direzione dell'apertura sulle pale; con M_H il numero di pannelli in direzione circonferenziale ed N_H quello in direzione assiale sul mozzo (*hub*, in inglese); con M_{WB} il numero di pannelli in direzione della corrente ed $N_{WB} = N_B$ il numero di pannelli in direzione radiale sulla scia potenziale; sulla superficie del mantello (*duct*, in inglese) valgono le stesse convenzioni della pala, in virtù della sua costruzione mediante una rivoluzione completa intorno all'asse di rotazione del propulsore di una sezione base: con M_D si indica il numero di pannelli in direzione della corda della sezione base e N_D quello in direzione circonferenziale; parimenti si indicherà con M_{WD} il numero di pannelli in direzione della corrente ed $N_{WD} = N_D$ il numero di pannelli in direzione circonferenziale sulla scia potenziale. Nel presente lavoro si adotta la *formulazione all'ordine zero* ovvero le grandezze ϕ , $\partial\phi/\partial n$ e $\Delta\phi$ sono assunte costanti su ciascun pannello e di valore pari al valore assunto dalla grandezza nel centroide. Da quanto visto finora, ponendo $Z_B = M_B \times N_B$, $Z_H = M_H \times N_H$,

¹Si tenga presente che solo le coordinate dei nodi dei pannelli coincidono con i punti del corpo

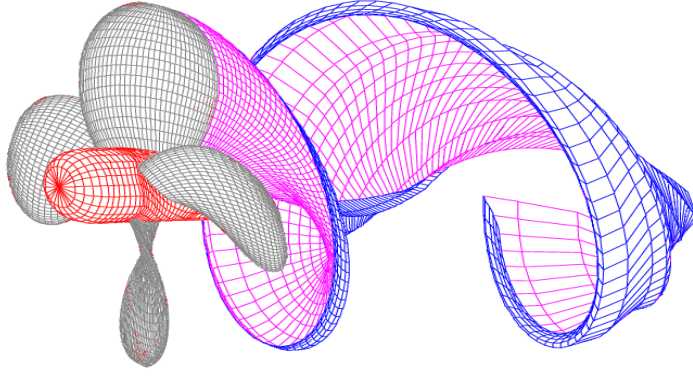


Figura 4.1: Esempio di discretizzazione a pannelli di una elica e della sua scia.

$Z_D = M_D \times N_D$, $Z_{WB} = M_{WB} \times N_{WB}$ e $Z_{WD} = M_{WD} \times N_{WD}$ si ha che il numero totale di incognite del problema è dato da:

- $Z_B + Z_H + Z_D$ valori del potenziale sui pannelli giacenti sulla superficie $\mathcal{S}_B \cup \mathcal{S}_H \cup \mathcal{S}_D$
- $N_B + N_D$ valori del $\Delta\phi$ per i pannelli di trailing edge²

Discretizzando le equazioni integrali relative a punti di controllo posti sulla superficie della pala, del mozzo o del mantello, ed imponendo che tali equazioni siano soddisfatte al centroide di ciascun pannello, si ricava un sistema algebrico non omogeneo che permette di ottenere la soluzione; entrando in dettaglio la discretizzazione dell'equazione fornisce:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{2} \phi_{ij} &= \sum_{n=1}^{N_B} \sum_{m=1}^{M_B} (S_{ij,mn} \chi_{mn} + D_{ij,mn} \phi_{mn}) + \sum_{n=1}^{N_H} \sum_{m=1}^{M_H} (S_{ij,mn} \chi_{mn} + D_{ij,mn} \phi_{mn}) \\
&+ \sum_{n=1}^{N_D} \sum_{m=1}^{M_D} (S_{ij,mn} \chi_{mn} + D_{ij,mn} \phi_{mn}) \\
&+ \sum_{n=1}^{N_{WB}} \sum_{m=1}^{M_{WB}} D_{ij,mn} \Delta\phi_{mn} + \sum_{n=1}^{N_{WD}} \sum_{m=1}^{M_{WD}} D_{ij,mn} \Delta\phi_{mn} \quad \forall \mathbf{x}_{ij} \in \mathcal{S}_B \cup \mathcal{S}_H \cup \mathcal{S}_D \quad (4.9)
\end{aligned}$$

in cui mn identifica il centroide del pannello influente su corpo o scia, e nella quale:

$$\begin{aligned}
\phi_{ij} &= \phi(\mathbf{x}_{ij}) \\
\chi_{ij} &= \frac{\partial \phi}{\partial n}(\mathbf{x}_{ij})
\end{aligned}$$

²Anche se questi salti di potenziale sono riconducibili alla conoscenza del potenziale sul corpo, e quindi possono essere espressi in funzione di esso, nel presente modello si includono nel novero delle incognite

essendo \mathbf{x}_{ij} il centroide del generico pannello contrassegnato dalla coppia di indici (i, j) e giacente sulla superficie delle pale, del mozzo o del mantello, e

$$\Delta\phi_{mn} = \Delta\phi(\mathbf{x}_{mn})$$

essendo \mathbf{x}_{mn} il centroide del generico pannello contrassegnato dalla coppia di indici (mn) e giacente sulla superficie della scia. Inoltre:

$$S_{ij, kh} = \int_{\mathcal{S}_{kh}} G(\mathbf{x}_{ij}, \mathbf{y}) d\mathcal{S}(\mathbf{y}) = - \int_{\mathcal{S}_{kh}} \frac{1}{4\pi\|\mathbf{x}_{ij} - \mathbf{y}\|} d\mathcal{S}(\mathbf{y})$$

$$D_{ij, kh} = - \int_{\mathcal{S}_{kh}} \frac{\partial G}{\partial n}(\mathbf{x}_{ij}, \mathbf{y}) d\mathcal{S}(\mathbf{y}) = \int_{\mathcal{S}_{kh}} \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{4\pi\|\mathbf{x}_{ij} - \mathbf{y}\|} \right) d\mathcal{S}(\mathbf{y})$$

indicano i coefficienti di influenza nel punto \mathbf{x}_{ij} delle sorgenti e delle doppiette di intensità unitaria distribuite sul generico pannello (k, h) di area $\mathcal{S}_{k, h}$.

Per ultimare il set di equazioni risolventi consideriamo il salto di potenziale al trailing edge; dalla condizione di Kutta-Morino si ha:

$$\Delta\phi^{TE}(t) - \phi^u(t) + \phi^l(t) = 0 \quad (4.10)$$

ovvero in forma discreta³

$$\Delta\phi_j^{TE} - \phi_{1j} + \phi_{M_B j} = 0 \quad j = 1, \dots, N_{WB} \quad \Delta\phi_j^{TE} - \phi_{1j} + \phi_{M_D j} = 0 \quad j = 1, \dots, N_{WD}$$

Occorre notare che i punti di controllo in uno schema di ordine zero sono posti sui centroidi e non si trovano esattamente al bordo di uscita; in prima approssimazione si trascura questo effetto.

Prima di mostrare la struttura a blocchi della matrice risolvente \mathbf{A} , vediamo come si esplicita il salto di potenziale sulla scia; dalla equazione di evoluzione del $\Delta\phi$ si ha:

$$\Delta\phi(\mathbf{x}_w, t) = \Delta\phi(\mathbf{x}_{TE}, t - \tau) \quad (4.11)$$

con \mathbf{x}_{TE} posto sulla stessa linea di corrente del punto \mathbf{x}_w e con τ ritardo di convezione.

Una volta operata la discretizzazione temporale di passo ΔT^4 , si pone il problema di conoscere il salto di potenziale al centroide dei pannelli di scia per i quali, in un certo istante t^* , in genere il ritardo non è multiplo di ΔT .

Questo problema si supera definendo per ciascun (centroide di) pannello di scia un ritardo di convezione pari a:

$$\tau_{mn} = (m_{mn} + \alpha_{mn}) \Delta T \quad (4.12)$$

³Si assume che i pannelli in direzione della corda siano ordinati partendo dal trailing-edge sul dorso ($m = 1$) procedendo verso il trailing-edge sul ventre (faccia) ($i = M_B; M_D$), e che sulla scia siano ordinati dal trailing-edge ($i = 1$) verso valle.

⁴Si ha $t_k^* = k\Delta T$ con k intero positivo

con m_{mn} parte intera e α_{mn} parte reale del ritardo.

In questo modo, considerato un generico centroide di scia si può conoscere il salto di potenziale al corrispondente tempo τ_{mn} facendo una interpolazione lineare con i valori del $\Delta\phi^{TE}$ al tempo $(t^* - m_{mn}\Delta T)$ e $[t^* - (m_{mn} + 1)\Delta T]$:

$$\Delta\phi_{mn} = (1 - \alpha_{mn}) \Delta\phi^{TE}(t^* - m_{mn}\Delta T) + \alpha_{mn} \Delta\phi^{TE}[t^* - (m_{mn} + 1)\Delta T] \quad (4.13)$$

la quale riconduce, ad ogni istante t^* , alla conoscenza di grandezze calcolate agli istanti precedenti.

Le equazioni espresse in forma discreta forniscono un sistema algebrico lineare nelle incognite:

- ϕ sui pannelli giacenti sulla superficie bagnata $\mathcal{S}_B \cup \mathcal{S}_H \cup \mathcal{S}_D$
- $N_B + N_D$ valori del $\Delta\phi$ per i pannelli di trailing edge

per un numero totale pari a: $Z_B + Z_H + Z_D + N_B + N_D$

Nel seguito le incognite verranno listate in un vettore colonna:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \phi \\ \Delta\phi^{TE} \end{bmatrix}$$

Di conseguenza la matrice \mathbf{A} del sistema avrà una struttura a blocchi del tipo:

$D - D$	$D - BH$	$D - TE_B$	$D - TE_D$
$BH - D$	$BH - BH$	$BH - TE_B$	$BH - TE_D$
$TE_B - T$	$TE_B - BH$	$TE_B - TE_B$	$TE_B - TE_D$
$TE_D - T$	$TE_D - BH$	$TE_D - TE_B$	$TE_D - TE_D$

in cui le prime due righe fanno riferimento alle equazioni (4.9), mentre le seconde due alle (4.11).

4.4 Verifica e validazione del solutore aero/idrodinamico: Eliche in mantello

Il modello aero/idrodinamico è stato validato mediante confronti numerico-sperimentali delle prestazioni predette per eliche in configurazioni intubata e non, al variare del coefficiente di avanzo, sotto ipotesi di flusso incidente non uniforme.

La tecnica risolutiva del sistema prevede per il mantello che sia considerato come una parte rotante, a patto di modellare opportunamente la forma della scia rilasciata dal suo bordo di uscita e di considerare congruentemente la soluzione calcolata sulla sua superficie. Mediante siffatta tecnica i tempi di risoluzione del sistema vengono notevolmente diminuiti.

Nel seguito verranno mostrati in figg. 4.2 e 4.4 i risultati relativi ad un'elica della famiglia Wageningen Ka ($K_a 4 - 70$ in mantello tipo 19A; vedasi [24]) e per un'elica di stock CNR-INSEAN, denominata E1622, inserita in un mantello analogo al precedente 19A.

Per quest'ultima sono mostrati anche i risultati in fig. 4.3 di simulazioni in condizioni cavitanti dell'elica.

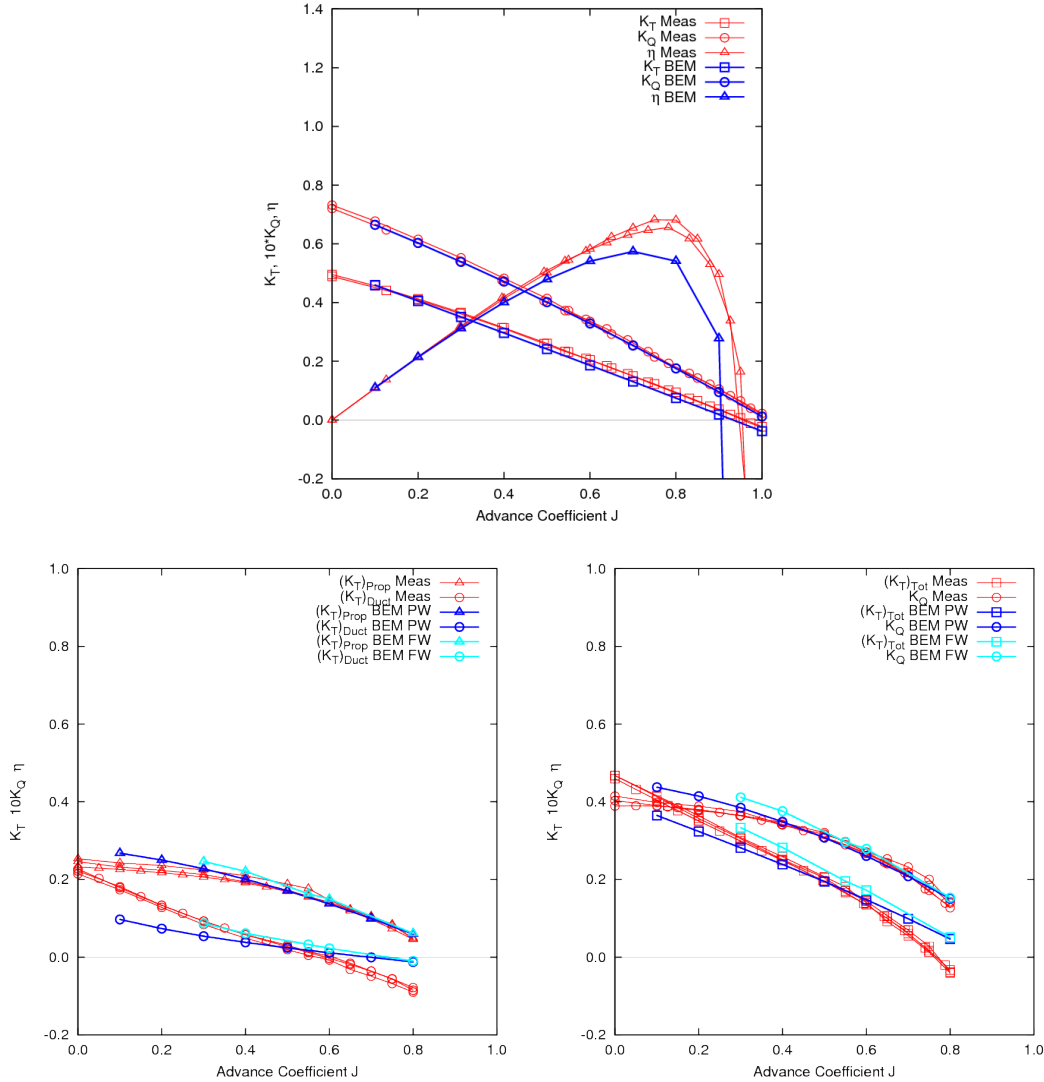


Figura 4.2: Elica CNR-INSEAN E1622: caratteristiche al variare del coefficiente di avanzo in condizioni di flusso uniforme non cavitante. In alto: curva di elica isolata. In basso a sinistra: contributo elica/mantello alla spinta del propulsore. In basso a destra: prestazioni propulsore in condizione di flusso confinato da mantello

Le differenze possono spiegarsi andando ad analizzare la distribuzione di pressione agente sulla superficie delle pale. In particolare, per bassi coefficienti di avanzo, il modello in esame sovrastima il C_p al bordo di attacco, lato dorso in maniera non fisica (confermando le conclusioni di Campos [1]). Inoltre, per valori medio-alti del coefficiente di avanzo, il flusso nella realtà si distacca in tale zona (come da lavori di Caja [35]): tale fenomenologia esula dal campo di validità del presente modello teorico.

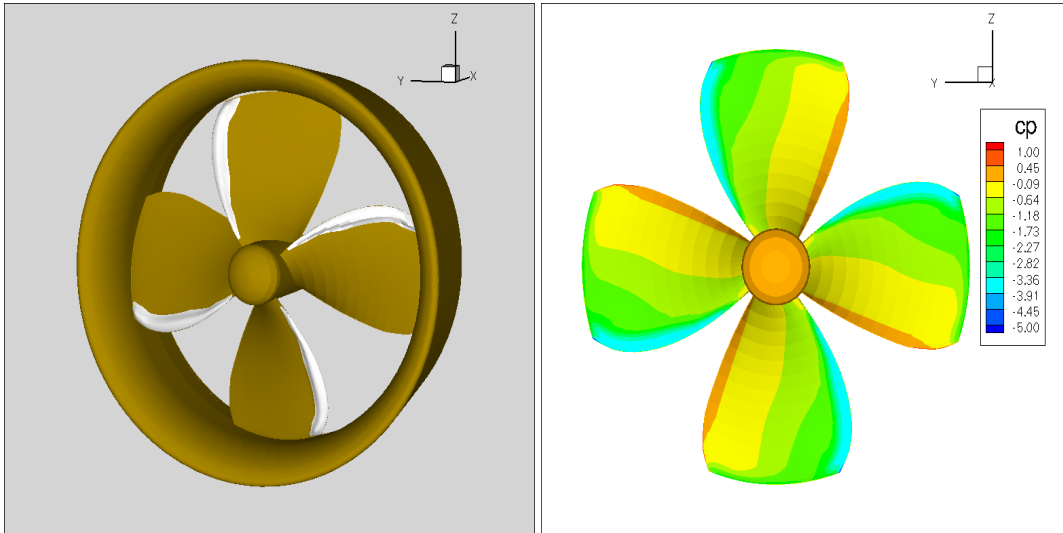


Figura 4.3: Elica CNR-INSEAN E1622: simulazione idrodinamica delle propulsore in condizioni di flusso uniforme cavitante; $J = 0.20$, $\sigma_N = 0.35$. Sinistra: vista 3D magnificata dell'elica cavitante. Destra: mappa del coefficiente di pressione C_p sulla superficie del ventre elica.

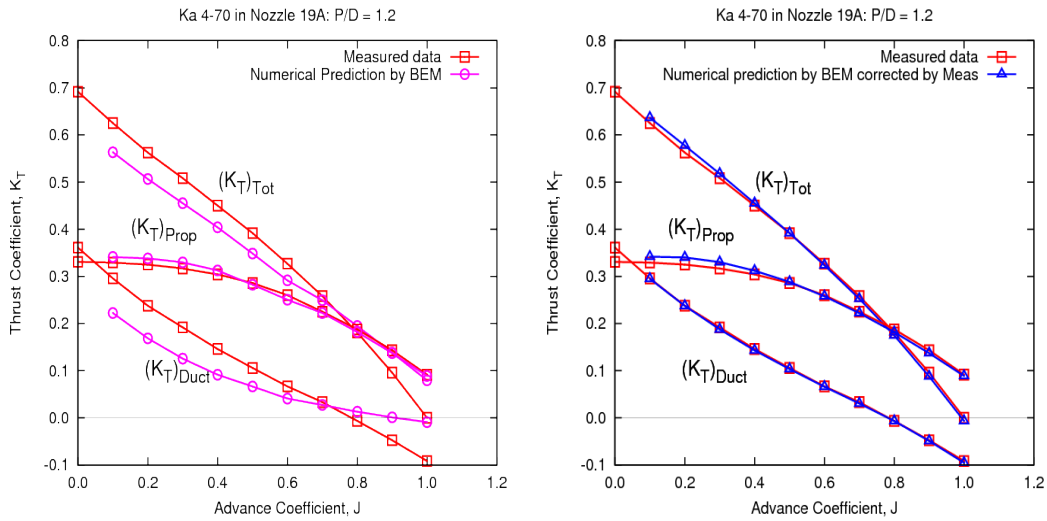


Figura 4.4: Elica Wageningen $K_a4 - 70$ di passo pari a $P/D = 1.2$ in duct 19A: caratteristiche al variare del coefficiente di avanzo in condizioni di flusso uniforme non cavitante, confinato da mantello; confronto numerico-sperimentale. Sinistra: risultati numerici mediante codice di analisi idrodinamica. Destra: risultati numerici con correzione da dati sperimentali.

Infine, nella pratica costruttiva, il trailing edge del mantello è solitamente non aguzzo ma di forma smussata: qui è plausibile avere una zona di distacco di vena che si traduce in un trasporto della vorticità rilasciata dal bordo di uscita del mantello entro una regione a spessore non nullo come prevede la teoria che sottende tale modello. Tutti questi aspetti si traducono in una cattiva predizione dei contributi alla spinta dell'elica e del mantello, in parte attenuati per

avere discrepanze di segno opposto, limitando l'errore sulla spinta totale.

Capitolo 5

Applicazione e Risultati

In tale capitolo vengono presentati i casi di ottimizzazione dei propulsori affrontati con gli strumenti considerati nel corso di tale attività dottorale.

L'obiettivo primario è stato quello di verificare la capacità degli strumenti stessi di ottenere una soluzione, senza tenere propriamente in conto tutti i vincoli ed i parametri che in un reale esercizio di design assumono rilevanza non trascurabile.

Pertanto, verranno mostrate le caratteristiche del problema in esame, sia in termini di definizione delle funzioni obiettivo, sia in termini di vincoli da soddisfare, sia in termini di definizione del dominio di variabilità dei parametri di design.

Vengono quindi presentati i risultati di analisi di sensibilità condotte per valutare l'influenza dei parametri di design sulla funzione obiettivo scelta.

Successivamente verranno mostrati i risultati ottenuti mediante lo strumento rivolto alla progettazione di massima di un propulsore navale destinato ad equipaggiare un'imbarcazione di media stazza, marciante in condizione di *marcia libera*.

L'obiettivo generale si traduce nella ricerca del punto di massima elevazione di una superficie di risposta del sistema in esame, costruita sulla base di dati sperimentali e/o ottenuti mediante l'uso del solutore idrodinamico e successivamente sintetizzati per una successiva rapida esplorazione senza perdere in accuratezza. Tale sintesi si attua per mezzo dell'uso di una o più reti neurali addestrate sulla base dei dati succitati. La tecnica di design sebbene si differenzi per l'attuatore (modello basato su algoritmi genetici o modello parametrico), utilizza un modello surrogato, basato su rete neurale, per l'esplorazione della soluzione sulla superficie di risposta del sistema.

Nella parte finale del capitolo vengono presentati i risultati della progettazione ottimizzata di base e di finitura per il caso descritto nel par. 5.1, cercando la soluzione tra le eliche convenzionali isolate e le quelle appartenenti alla famiglia delle eliche intubate.

Le soluzioni ottimizzate vengono messe a confronto con l'elica di riferimento del progetto, analizzando le differenze

sulle prestazioni globali e locali esercitate a parità di punto di lavoro; vengono inoltre evidenziate i differenti punti di lavoro determinati per le singole configurazioni.

5.1 Imbarcazione di media stazza marciante in corsa libera

Il banco di prova su cui sono stati testati gli strumenti sviluppati nel corso di tale attività è rappresentativo di un classico problema di design che viene riscontrato nei cantieri navali.

I dati che vengono ora mostrati sono dati rapportati al vero e relativi ad un modello di carena testata sperimentalmente presso gli impianti del CNR-INSEAN.

L'imbarcazione e le condizioni entro le quali tale modello è stato testato, fanno riferimento ad un peschereccio, o più in generale un'imbarcazione di piccola-media stazza, mediamente veloce e disegnata per lavorare ad alti carichi per bassi regimi di funzionamento del motore.

Le caratteristiche dell'imbarcazione, la cui denominazione CNR-INSEAN è *C2503*, sono le seguenti:

- Lunghezza totale $L_T = 77m$
- Lunghezza tra perpendicolari $L_{PP} = 67m$
- Larghezza $L_B = 12m$
- Pescaggio $L_D = 7.5m$
- Stazza $G_T = 1400GT$
- Potenza Massima Motore $P_{MCR} = 2930HP$
- Giri di funzionamento motore alla potenza massima $n_{max} = 375rpm$
- Tipo di propulsore montato: 1 elica intubata a pale fisse

mentre le caratteristiche dell'elica che equipaggia il modello sono le seguenti:

- Diametro elica $D_p = 2.6m$
- Numero di pale elica $Z = 4$
- Rapporto area espansa elica $A_e/A_0 = 0.69$
- Passo al 70% del raggio $P_{0.7R} = 2.5229m$
- Rapporto adimensionale passo al 70% del raggio $P/D_{0.7R} = 0.97$

Per tale modello di carena sono state condotte le prove di resistenza e di autopropulsione, in cui è stata misurata, rispettivamente, la resistenza offerta all'avanzamento in assenza di elica e la forza necessaria a spingere il modello

in presenza di elica spingente. Il modello di elica, la cui denominazione CNR-INSEAN è *E1622*, originariamente montato su tale carena, è stato oggetto di prove di elica isolata, in cui sono state misurate le prestazioni offerte in assenza di carena, al variare delle condizioni di flusso uniforme in cui opera l'elica.

Per i dettagli relativi alla campagna sperimentale eseguita sulla carena *C2503* accoppiata all'elica *E1622* vedasi (E).

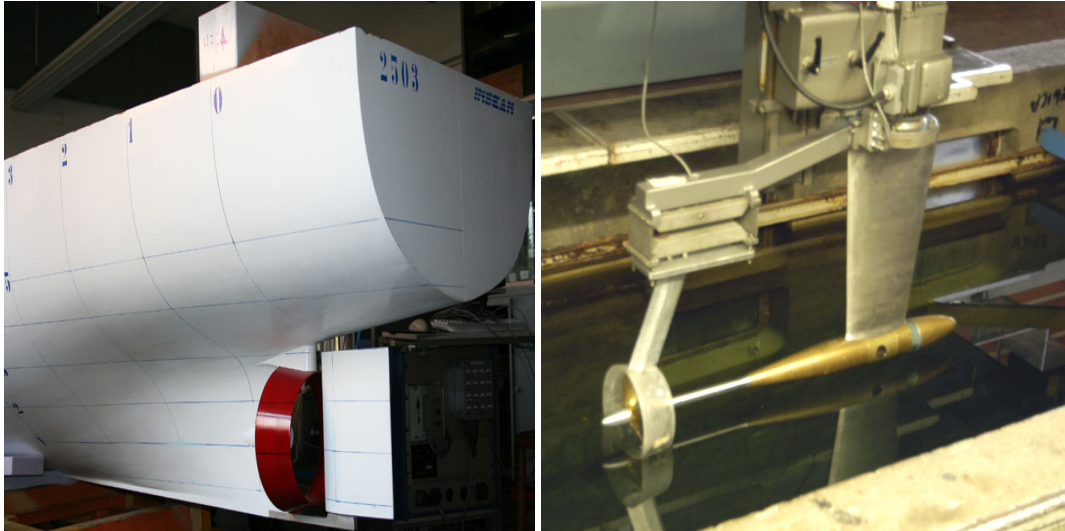


Figura 5.1: Modello di carena CNR-INSEAN *C2503* equipaggiata con elica intubata CNR-INSEAN *E1622*. Sinistra: particolare del modello preparato per la prova di autopropulsione. Destra: particolare del propulsore durante la prova di elica isolata.



Figura 5.2: Immagini al vero dell'imbarcazione e del propulsore presenti presso il CNR-INSEAN come modelli di carena *C2503* (sinistra) ed di elica *E1622* (destra).

5.2 Specifiche del progetto: Design di base

Lo strumento sviluppato, basato sull'uso interattivo del solutore aero/idrodinamico, della rete neurale è stato utilizzato per mezzo di una opportuna tecnica di ottimizzazione alla risoluzione di un tipico esercizio di design preliminare di un'elica.

Il problema in esame fa riferimento all'ottimizzazione del propulsore destinato a spingere la carena descritta nel precedente paragrafo.

Il problema dell'ottimizzazione di base si traduce innanzitutto nella definizione delle opportune variabili di design; in tal caso si è scelto di cercare la soluzione su uno spazio descritto dalle seguenti variabili geometriche riferite all'elica:

- Diametro, D_P
- Numero di pale, Z
- Rapporto di area espansa, A_e/A_0
- Rapporto passo-diametro, P/D_P

In aggiunta a queste variabili, va considerata quella operativa, data dalla velocità di avanzamento della nave, V_{Ship} .

L'obiettivo del problema è quello di massimizzare la funzione obiettivo, qui rappresentata dall'efficienza idrodinamica del propulsore in condizione di elica isolata, η_0 .

La soluzione del problema deve soddisfare particolari condizioni che traducono specifiche richieste dal committente del progetto e vincoli legati col problema in esame.

Qui, posto fissato il motore, si suppone fissata la potenza erogata dal motore, pari all'85% della potenza massima, ad un regime di funzionamento scelto pari a $n = 250rpm$. La velocità di avanzamento dell'imbarcazione è stata limitata inferiormente dal valore $V_{Shipmin} = 7.31m/s$, mentre il diametro è costruttivamente limitato superiormente al valore $D_{Pmax} = 2.7m$.

Altri vincoli derivano dall'esigenza di accoppiare l'elica con il motore e contemporaneamente con la carena.

Da qui, si hanno i seguenti vincoli sulla coppia richiesta dall'elica e dalla spinta da essa generata (per i dettagli sulle variabili usate e sulle perdite vedasi D):

- la coppia assorbita dall'elica Q ad un determinato numero di giri deve essere uguale a quella trasmessa dal motore Q_d , decurtata delle opportune perdite, ovvero $(|Q - Q_d|/Q_d) \leq 2.5\%$.
- la spinta esercitata dall'elica, T , quando questa equipaggia la carena, deve essere uguale alla resistenza offerta dalla carena stessa, R , ad una determinata velocità di avanzamento V_{Ship} , ovvero $(|T - R|/R) \leq 2.5\%$.

Infine, onde poter scongiurare l'insorgere di fenomeni cavitanti dannosi in ottica operativa strutturale del propulsore, è stata imposta una condizione conservativa sul rapporto di area espansa; l'esigenza di ottenere una stima ragionevole di tale fenomeno senza l'uso di strumenti computazionali onerosi ha orientato la scelta verso l'uso della formula

semiempirica di Keller [24], che lega l'area espansa minima per non incorrere in cavitazione con il diametro, il numero di pale, l'immersione dell'elica e la spinta generata dal propulsore.

La condizione da soddisfare risulta quindi essere $A_e/A_0 \geq (A_e/A_0)_{min}$, con:

$$A_e/A_0 = \frac{(1.3 + 0.3Z)T}{(p_0 - p_v)D_P^2} + k \quad (5.1)$$

dove $k = 0, 2$ per imbarcazioni a singola linea d'assi ed è rappresentativo della qualità del flusso incidente all'elica; p_0 rappresenta la pressione statica agente alla linea d'assi, pari alla somma della pressione atmosferica e del battente idrostatico ρgh ; p_v , infine, rappresenta la pressione di vapore dell'acqua.

5.3 Specifiche del progetto: Design di finitura

Alla fase di design di finitura è demandata la ricerca della soluzione nell'intorno del punto rappresentativo dell'ottimo della fase di design preliminare. Presa questa come configurazione di riferimento, le distribuzioni radiali delle grandezze geometriche vengono modificate mediante l'uso di funzioni appositamente generate.

Vale, per tali grandezze, la seguente formulazione:

$$g'(r) = g_0(r)(1 + k\Delta g(r)) \quad \text{con } -1 \leq k \leq +1 \quad (5.2)$$

La configurazione di base, nota univocamente dai parametri $Z, D, A_e/A_0, P/D, J$, viene modificata nelle seguenti variabili, rappresentanti le distribuzioni radiali di:

- passo, $P/D(r)$;
- corda, $C/D(r)$;
- skew, $Sk/D(r)$;
- curvatura, o camber, o freccia massima, $f_{max}/C(r)$;
- abbattimento, o rake, Rk/D .

La scelta compiuta in tale lavoro, di dividere il problema di design in due fasi successive, rappresentate dal design di base e, a seguire, dal design di finitura è stata compiuta per minimizzare i tempi di calcolo senza perdere di generalità.

Alla base di tale scelta c'è la considerazione secondo la quale le prestazioni globali del propulsore sono influenzate dal valore nominale dei parametri geometrici più che alle loro distribuzioni radiali; queste, piuttosto, influenzano fenomeni locali quali la distribuzione di pressione o la risposta all'incipienza di cavitazione sulle sezioni.

Tale strumento è stato sviluppato nell'ottica di estenderlo nel futuro alla progettazione di propulsori investiti da correnti incidenti spazialmente non uniformi, con inclusione di vincoli legati a grandezze fluidodinamiche locali (quali appunto la pressione e/o l'estensione della bolla cavitante), variabili nell'arco di una rivoluzione del propulsore.

In particolare, si intende in questa sede, dimostrare le potenziali capacità dello strumento di ottenere una soluzione coerente con i vincoli e funzione obiettivo scelti, oltre che validare i componenti singolarmente. Lo strumento valido per il design qui sviluppato rappresenta la logica conseguenza dell'attività svolta negli anni passati per lo sviluppo di modelli teorico numerici per l'analisi aero/idrodinamica di propulsori ad ala rotante e di strumenti utili all'integrazione di tali modelli per un uso automatizzato.

Più propriamente, lo strumento di design sviluppato svolge le sue funzioni nel seguente ordine:

- Generazione delle griglie di calcolo 5.4
- Generazione dataset numerico della superficie di risposta del sistema per un'elica 5.5 in configurazione:
 - isolata A.1.1
 - intubata A.1.2
- Addestramento di una rete neurale per la simulazione della risposta del sistema
- Ricerca della soluzione sulla superficie di risposta surrogata ad opera di un ottimizzatore basato su:
 - un modello di ricerca parametrico
 - algoritmi genetici

Il diagramma di flusso delle azioni compiute da tale strumento è mostrato sinteticamente nella fig.5.3, in cui vengono schematicamente presentate le fasi svolte durante il processo di design:

- generazione delle distribuzioni radiali di una famiglia di eliche
- generazione delle griglie di calcolo
- simulazioni aero/idrodinamica delle prestazioni offerte dalle eliche considerate
- raccolta dei dati di prestazione nel dataset relativo alla serie sistematica virtuale
- addestramento di una rete neurale sui dati di prestazioni raccolti
- ricerca dell'ottimo sulla superficie di risposta surrogata

In particolare risulta, per le grandezze che vi compaiono:

- $k = 1, N_{input}$, indice della variabile di input della ANN;
- $j = 1, N_{output}$, indice della variabile della ANN;
- $p = 1, N_{Pattern}$, indice di pattern del dataset di training della ANN;
- $L = 1, N_{NN\ connex}$, indice della connessione della ANN;

Nel seguito verranno dettagliatamente descritte le attività svolte dallo strumento in esame.

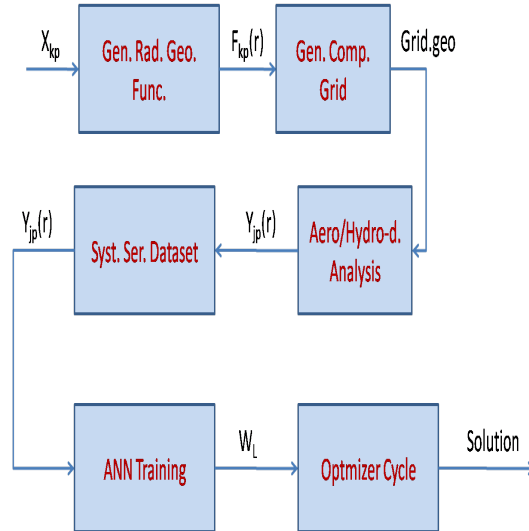


Figura 5.3: Schema di funzionamento dello strumento sviluppato in tale lavoro per la determinazione automatica di un rotore ottimizzato.

5.4 Generazione griglie geometriche di calcolo dell' elica

Oggetto di tale attività è un'elica la cui denominazione CNR-INSEAN è *E1622*. Per essa sono disponibili le curve sperimentali di prestazioni al variare del coefficiente di avanzo. Mediante il succitato tool è stata dapprima ottenuta una famiglia di eliche la cui radice è rappresentata da un'elica simile alla suddetta *E1622*, differente per forma in pianta delle sezioni e per le distribuzioni radiali di passo; risultano invece uguali i valori nominali di Passo, Corda, Skew, Rake. A partire da tale elica, è stata sviluppata la famiglia secondo una tecnica parametrica, mediante la quale tutte le eliche sono definibili simili tra loro. Tale tecnica si fonda sull'uso comune di funzioni variabili radialmente. In particolare, una generica grandezza $F(r)$ si suppone sia esprimibile mediante una funzione polinomiale nelle variabili G_1, \dots, G_N ; i coefficienti α_i , associati a tali funzioni, sono variabili anch'essi in r e comuni a tutte le eliche.

Nel particolare risulta:

- $P(r) = K_P P/D|_{0.7R} D$
- $C(r) = K_C \frac{ZEAR}{D}$
- $Sk(r) = C(r)(K_{Sk}(r) + 0.5)$
- $f_{max}(r) = K_f(r)C(r)$

Per esse, mediante un procedimento inverso, a partire dalle distribuzioni radiali scelte per le eliche della serie *E1622 – ser*, mediante l'uso dei valori delle variabili di progetto relative alla *E1622*¹, sono stati ricavati gli andamenti delle costanti $K_i(r)$; solo per quanto concerne il passo, la curva di riferimento è dissimile da quella della *E1622*, sebbene sia stata scelta in modo tale che si avesse lo stesso valore alla stazione $0.7R$.

¹ $Z = 4, EAR = 0.68, P/D|_{0.7R} = 0.98$

Note le funzioni K_i le eliche della serie sistematica di base sono state ricavate variando le variabili $Z, D, EAR, P/D|_{0.7R}$ entro determinati intervalli, ovvero:

- $3 \leq Z \leq 5, \Delta_Z = 1;$
- $0.6 \leq EAR \leq 0.9, \Delta_{EAR} = 0.1;$
- $0.9 \leq P/D|_{0.7R} \leq 1.2, \Delta_{P/D} = 0.1;$
- $0.5 \leq J \leq P/D'',$ diviso in 4 intervalli (5 punti),

per un totale di 240 punti, utili ai fini dell'addestramento della rete neurale.

5.5 Generazione dataset di base della superficie di risposta del sistema

Una volta ottenute le griglie di calcolo di tali eliche, sono state generate le curve di prestazioni al variare del coefficiente di avanzo J .

Tale collezione di dati sono stati ottenuti sia per la configurazione di elica isolata A.1.1, che in quella intubata A.1.2.

La griglia geometrica di calcolo è stata scelta tale che l'elica fosse discretizzata con $M_B \times N_B = 48 \times 24$ pannelli per ogni pala e con $M_{WB} = 60$ pannelli per giro disposti su superfici elicoidali di passo costante dipendente dal passo idrodinamico e di estensione assiale pari a $L_W = 4D$; che il mozzo avesse pannellizzazione pari a $N_H \times M_H = 37 \times 5$; che il mantello fosse discretizzato con pannelli in numero pari a $M_D \times N_D = 80 \times 24$ su ogni settore (in totale pari al numero di pale) e con pannelli di scia pari a $M_{WD} = 100$ disposti anch'essi su superfici elicoidali di passo costante pari a quello idrodinamico ed estesa per una lunghezza complessiva tale da terminare nello stesso punto delle scie palari.

I calcoli sono stati condotti in condizioni di flusso incidente il propulsore uniforme mediante simulazioni stazionarie, in virtù della assialsimmetria del flusso nel sistema di riferimento solidale con la pala.

A valle della definizione, attuata sulla base dell'esperienza dell'Autore, della configurazione base per la costruzione della serie sistematica virtuale è stata affrontata una analisi di sensibilità delle grandezze prestazionali del propulsore rispetto alle variabili di design per verificarne la scelta.

I risultati sono mostrati nel par. A.1.1 e A.1.2; a valle di queste analisi, l'elica denominata *E1622-ser* è stata giudicata idonea per la costruzione della serie sistematica virtuale entro cui cercare una configurazione ottima rispetto all'elica nella sua configurazione originale di riferimento.

Sono state altresì determinate le fasce di variazione delle variabili di design di finitura entro cui andare a cercare la soluzione ottima.

5.6 Applicazione: ottimizzazione di forma del propulsore

A valle della scelta della configurazione di partenza per l'ottimizzazione A.1, lo strumento sviluppato in tale lavoro è stato applicato ad un caso di interesse pratico: un peschereccio marciante in corsa libera.

Come già descritto in precedenza, la soluzione è stata ricercata in due fasi distinte ed affrontate in sequenza. L'ottimo di base è stato qui ricercato sull'iperpiano delle variabili di progetto caratterizzanti la famiglia base delle eliche *E1622-ser*, ovvero in assenza di perturbazioni sulle distribuzioni radiali delle grandezze geometriche. In particolare, è stato determinato il set di parametri geometrici/operativi che massimizza l'efficienza idrodinamica del propulsore (Z , A_e/A_0 , P/D , V , D).

In particolare risulta per il dataset numerico:

- $3 \leq Z \leq 5$, $\Delta_Z = 1$;
- $0.6 \leq EAR \leq 0.9$, $\Delta_{EAR} = 0.1$;
- $0.9 \leq P/D|_{0.7R} \leq 1.2$, $\Delta_{P/D} = 0.1$;
- $0.5 \leq J \leq P/D''$, diviso in 4 intervalli (5 punti),

per un totale di 240 punti, utili ai fini dell'addestramento della rete neurale.

L'ottimizzazione di base è stata condotta considerando i seguenti vincoli:

- $D \leq 2.7m$
- $V_{Ship} \geq 7.31m/s$

mentre i vincoli sulla spinta, sulla coppia e sul rapporto di area espansa sono quelli descritti nel paragrafo 5.2.

L'ottimizzazione di finitura è stata condotta sulla base dei risultati qui ottenuti; con la medesima definizione dei vincoli suddetti è stata ricercato il set di migliori distribuzioni radiali di passo, corda, skew, camber e rake dal punto di vista dell'efficienza idrodinamica esercitata.

Gli algoritmi di ottimizzazione utilizzano una rete neurale addestrata su un dataset numerico basato sull'uso del solutore BEM per la predizione delle prestazioni del propulsore, ovvero della spinta prodotta dall'elica e dal mantello (K_{TP} , K_{TN}) e della coppia resistente richiesta dal propulsore (K_Q), secondo lo schema di fig. 5.4.

In particolare, le eliche della serie sistematica di base del presente problema sono caratterizzate da valori nulli delle variabili X_i , con $i = 5, 9$, come deriva dal fatto che tali variabili rappresentano sinteticamente una variazione rispetto ad una configurazione di riferimento.

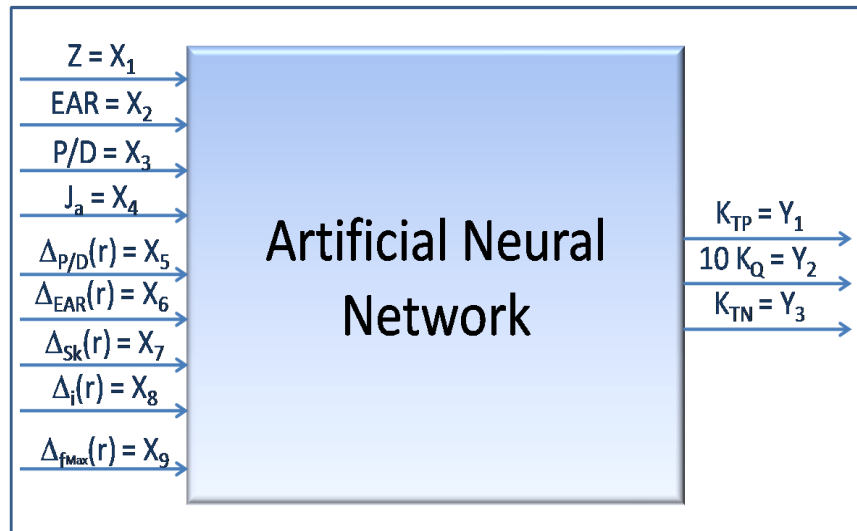


Figura 5.4: Schema di funzionamento della rete neurale utilizzata dall'ottimizzatore per la ricerca della soluzione del problema in esame.

5.7 Risultati Design di base

In tale paragrafo vengono mostrati i risultati ottenuti per il design preliminare del propulsore di un'imbarcazione tipica marciante in condizione di corsa libera, utilizzando a tal fine delle serie sistematiche virtuali per i propulsori in esame.

Sono state ottenute varie soluzioni a seconda de:

- l'origine dei dati usati per costruire la serie sistematica: numerica o sperimentale.
- l'oggetto dell'ottimizzazione: elica in configurazione isolata o intubata.
- l'algoritmo di ottimizzazione usato per la ricerca della soluzione: modello parametrico o basato su algoritmi genetici.

Nella tabella 5.1 sono mostrati sinteticamente i casi svolti:

	El. Is.		El. Dct.		
	El. Wag. B-ser.		El. K_a 4-70	El. <i>E1622-ser</i>	
	EXP	BEM	HYB	HYB	BEM
GA	X	X	X	X	X
PM	X	X	X	X	X

Tabella 5.1: Tabella riassuntiva dei casi test

Di seguito vengono esposti i risultati della progettazione ottimizzata per l'applicazione finale scelta in tale lavoro, ottenuti sulla base dei dati numerici ad opera del solutore BEM, relativi alle eliche della famiglia *E1622-ser*, in

configurazione isolata ed intubata.

I restanti risultati sono mostrati nel par. A.2.

5.7.1 Elica della famiglia *E1622-ser* in configurazione isolata

Come già esposto in precedenza, l'elica di riferimento *E1622* è caratterizzata da un numero di pale pari a $Z = 4$, da un passo/diametro pari a $P/D \approx 1.0$ ed un valore di area espansa pari a $EAR \approx 0.67$.

Le eliche derivate appartenenti alla serie sistematica denominata *E1622-ser* sono derivate da essa modificando univocamente le distribuzioni radiali geometriche; l'elica di partenza di tale serie mostra valori nominali delle grandezze geometriche globali di passo, area espansa e diametro pari a quelli dell'elica di riferimento succitata.

Nell'ambito della serie sistematica descritta, l'esercizio si è composto in tre sottofasi in cui, nell'ordine, sono stati lasciati liberi di variare:

- unicamente il passo/diametro, fissati il numero di pale ed il rapporto di area espansa (fig. 5.5);
- il passo/diametro ed il rapporto di area espansa, fissando il numero di pale (fig. 5.6);
- il passo/diametro, il rapporto di area espansa ed il numero di pale. mentre la velocità, si ricorda, è vincolata ad un valore minimo.

Come si può notare dalle suddette figure, l'andamento dell'ottimo trovato varia in modo regolare all'aumentare dei gradi di libertà del sistema, e, come già visto nell'esercizio di design basato sulle eliche della serie Wageningen, esso si colloca spesso ai bordi dell'iperpiano delle variabili design.

Più in particolare, i risultati globali dell'ottimizzazione, ottenuta lasciando liberi i parametri relativi a numero di pale, diametro, passo geometrico nominale, rapporto di area espansa e velocità, sono mostrati nelle figg. 5.7, 5.8 e 5.9, in cui vengono messi a confronto i risultati ottenuti con i diversi modelli di ottimizzazione considerati in questo lavoro.

I modelli di ottimizzazione mostrano risultati leggermente differenti che l'autore giudica essere imputabili al passo con cui viene variato, nel modello parametrico, il rapporto di area espansa dell'elica, nettamente superiore a quello praticato per mezzo dell'ottimizzatore basato sull'uso di algoritmi genetici.

Al variare del numero di pale l'efficienza idrodinamica della configurazione ottimale non varia in modo sostanziale; esso, infatti incide più su fenomeni non stazionari che qui non sono portati in conto.

Sulla base della discrepanza suddetta e per poter confrontare configurazioni diverse ma congruenti tra loro, si è deciso di considerare la configurazione ottima quella determinata da quest'ultimo modello in corrispondenza alla condizione quadripala.

In tab. 5.2 vengono mostrati sinteticamente i dati delle configurazioni al variare del numero di pale fissate, confrontati con quelli dell'elica di riferimento.

L'elica di riferimento, denominata *E1622OW*, non appartenente alla serie sistematica di eliche virtuali denominata *E1622-ser*, viene confrontata con le soluzioni trovate al variare del numero di pale ed indicate con la sigla *E1622-ser*.

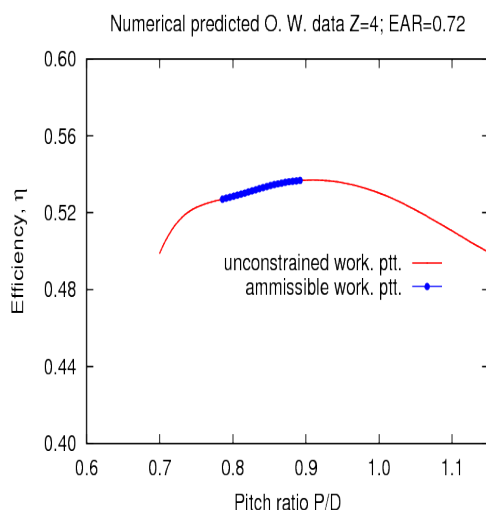


Figura 5.5: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia Wageningen *E1622 – Series*. Risultati ottenuti su base dati numerica. Andamento dell'efficienza ottima al variare del rapporto passo/diametro.

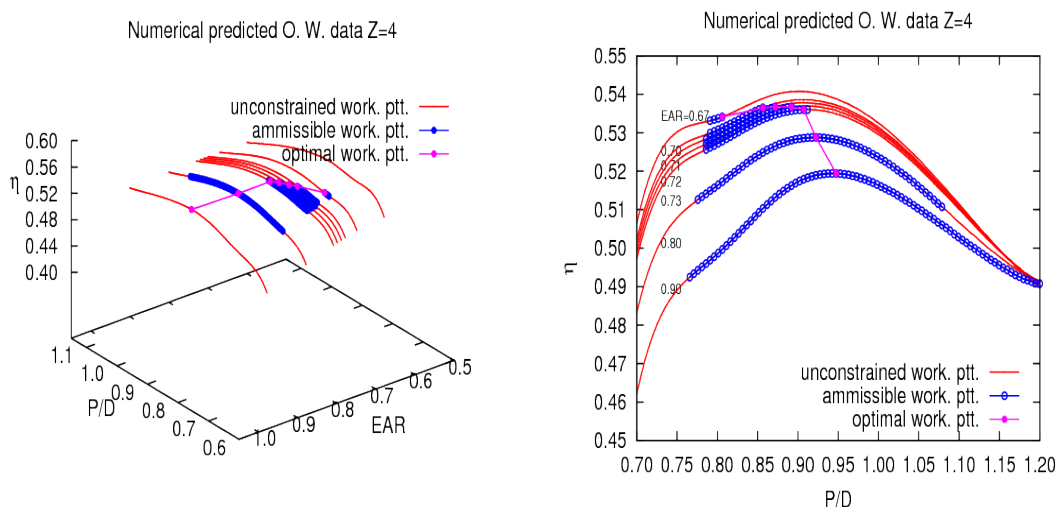


Figura 5.6: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia Wageningen *E1622 – Series*. Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: vista 3D dell'efficienza ottima al variare del rapporto passo/diametro e del rapporto di area espansa. Destra: vista 2D dell'efficienza ottima al variare del rapporto passo/diametro.

*serOpt.OWBase*i** con $i = 3, 4, 5 = Z$. Le differenze nei valori assunti dalle variabili geometriche/operative globali si riflettono nelle differenti prestazioni esercitate, in generale, in corrispondenza a diversi punti di lavoro. In particolare, vengono mostrati confronti numerici tra l'efficienza idrodinamica dei propulsori a parità del punto di lavoro ed ognuna operante al suo punto di lavoro; il confronto avviene sia su base dati ad opera del solutore a pannelli usato, sia ad

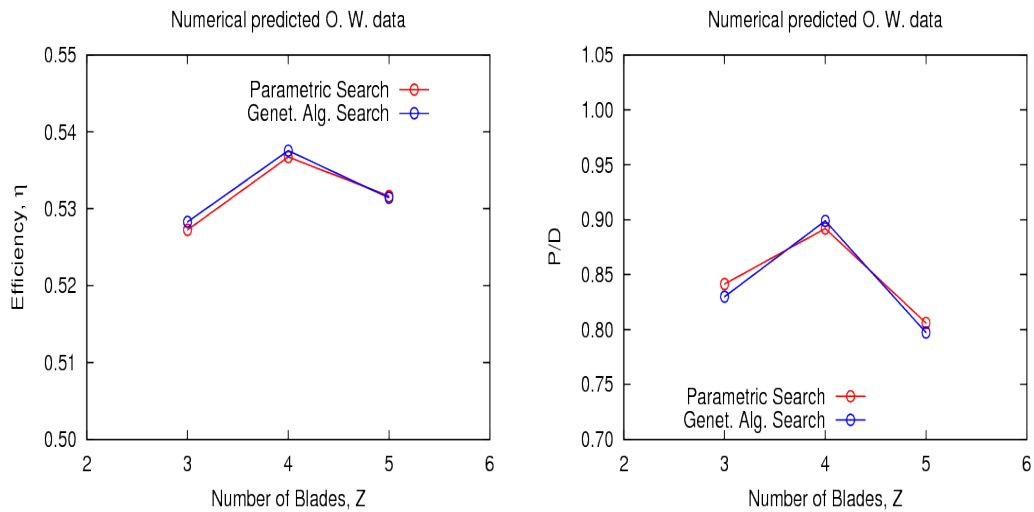


Figura 5.7: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia *E1622 – Series*. Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: andamento dell'efficienza ottima al variare del numero di pale. Destra: andamento del rapporto passo/diametro ottimo al variare del numero di pale.

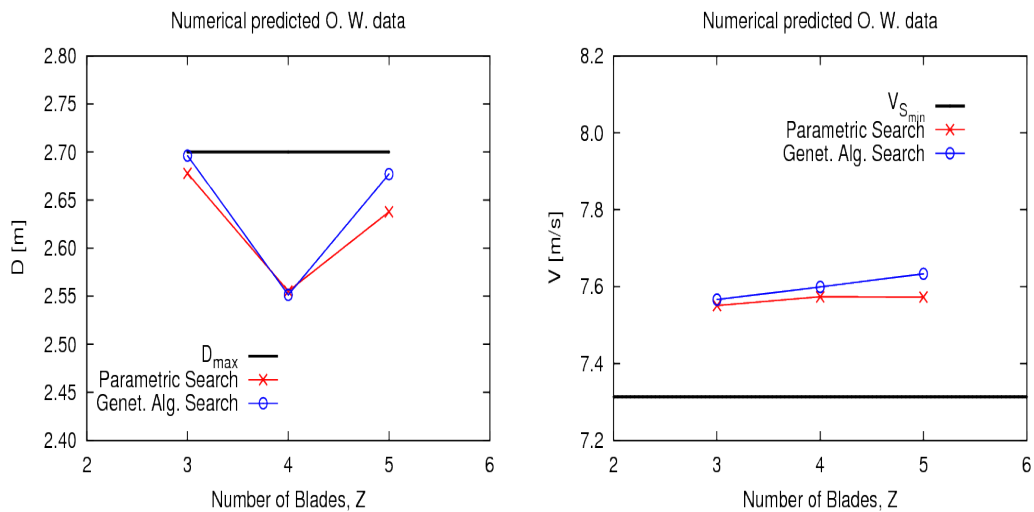


Figura 5.8: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia *E1622 – Series*. Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: andamento del diametro ottimo al variare del numero di pale. Destra: andamento della velocità nave al variare del numero di pale.

opera della rete neurale mediante la quale tali dati sono sintetizzati. Per la configurazione di propulsore ad elica isolata i guadagni di efficienza si attestano nell'ordine del 6.5% considerando anche la variazione del punto di lavoro, che scende all'1.75% se si confrontano le soluzioni originale ed ottimizzata per il punto di lavoro di quest'ultima.

Sebbene con piccola disuniformità con sovrastima dei guadagni, tale tendenza è confermata analizzando i dati predetti

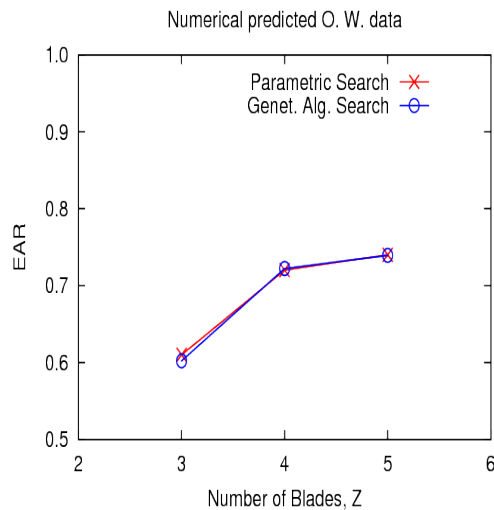


Figura 5.9: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia *E1622-Series*. Risultati ottenuti su base dati numerica. Rapporto di area espansa al variare del numero di pale.

dal modello surrogato, basato sulla rete neurale ed addestrata sui dati di simulazione del modello idrodinamico: per esso, il guadagno medio confrontando i diversi punti di lavoro è dell'ordine del 7.5% e del 3.5% considerando il confronto fatto a parità di punto di lavoro.

Inoltre, nel punto di lavoro definito dalla configurazione ottimizzata, l'elica di riferimento è impossibilitata a lavorare sotto i vincoli imposti dal problema sulla potenza, numero di giri e velocità ed il guadagno ottenuto dalle eliche ottimizzate rendono robusta la fase di ottimizzazione.

Una prima considerazione riguarda l'accuratezza del modello surrogato utilizzato dagli ottimizzatori per la ricerca dell'ottimo: l'errore commesso dalla rete neurale risulta essere dello stesso ordine di grandezza delle differenze tra i vari punti di ottimo trovati, sebbene queste risultino punti accertati di ottimo rispetto alla configurazione di riferimento. Nei limiti propri del modello, i punti di ottimo sono giudicati soddisfacenti, sebbene nasca l'esigenza di migliorare l'accuratezza del modello adottando possibili diverse soluzioni sulla rete neurale:

- aumentando il grado di convergenza durante la fase di addestramento
- introducendo la variabile di output "efficienza" senza calcolarla per tramite delle variabili di spinta e coppia, cosa che introduce un errore composto di ordine non proporzionale a quello sulle singole variabili (la coppia appare al denominatore nell'espressione dell'efficienza)
- aumentando i dati utili per l'addestramento: finora infatti è stata utilizzata una griglia minima omogenea " $5^{N_{IN}}$ "

D'altra parte, queste azioni non risolvono il problema completamente perchè, pur aumentando l'accuratezza del modello surrogato, l'incertezza sui risultati è demandata al modello utilizzato per il solutore aero/idrodinamico; adottare

in vece sua un modello più complesso, come quello ibrido basato sui modelli BEM per il rotore, RANSE per il mantello, richiederebbe innanzitutto un tempo notevolmente maggiore per la costruzione del dataset utile per la successiva sintesi mediante il modello di rete neurale o equivalente, oltre che complicare la fase di generazione delle griglie di calcolo perchè richiederebbe la discretizzazione non più della superficie dei corpi, bensì anche del volume fluido di controllo adottato in cui i corpi stessi sono immersi. Infatti la robustezza dei risultati ottenuti è fortemente influenzata dalla qualità delle griglie adottate e la convergenza non risulta assicurata per ogni caso.

5.7.2 Elica della famiglia *E1622-ser* in configurazione intubata

In questo caso sono stati utilizzati dati puramente numerici per la costruzione delle prestazioni offerte da eliche appartenenti alla famiglia di eliche virtuali esposta in precedenza.

In tale paragrafo vengono mostrati i risultati dell'esercizio di design relativo ad un'elica convenzionale operante in regime di flusso confinato da un mantello.

Come già esposto in precedenza, l'elica di riferimento *E1622* è caratterizzata da un numero di pale pari a $Z = 4$, da un passo/diametro pari a $P/D \approx 1.0$ ed un valore di area espansa pari a $EAR \approx 0.67$, mentre il mantello non risulta essere modificato.

L'esercizio si è composto in tre sottofasi in cui, nell'ordine, sono stati lasciati liberi di variare:

- unicamente il passo/diametro, fissati il numero di pale ed il rapporto di area espansa (così come fatto nei paragrafi A.2.2, A.2.3 e A.2.3);
- il passo/diametro ed il rapporto di area espansa, fissando il numero di pale;
- il passo/diametro, il rapporto di area espansa ed il numero di pale. mentre la velocità, si ricorda, è vincolata ad un valore minimo.

Come si può notare dalla fig. 5.10, l'andamento dell'ottimo trovato varia in modo regolare all'aumentare dei gradi di libertà del sistema, e, come anche confermato nell'esercizio di design basato sulle eliche della serie Wageningen, esso si colloca spesso ai bordi dell'iperpiano delle variabili design.

Più in particolare, i risultati globali dell'ottimizzazione, ottenuta lasciando liberi i parametri relativi a numero di pale, diametro, passo geometrico nominale, rapporto di area espansa e velocità, sono mostrati nelle figg. 5.11, 5.12 e 5.13.

L'elica di riferimento, denominata *E1622DCT*, non appartenente alla serie sistematica di eliche virtuali denominata *E1622-ser*, viene confrontata con le soluzioni trovate al variare del numero di pale ed indicate con la sigla *E1622-serOpt.DCTBasei* con $i = 3, 4, 5 = Z$. Le differenze nei valori assunti dalle variabili geometriche/operative globali si riflettono nelle differenti prestazioni esercitate, in generale, in corrispondenza a diversi punti di lavoro. In particolare, vengono mostrati confronti numerici tra l'efficienza idrodinamica dei propulsori a parità del punto di lavoro ed ognuna operante al suo punto di lavoro; il confronto avviene sia su base dati ad opera del solutore a pannelli usato, sia ad opera della rete neurale mediante la quale tali dati sono sintetizzati. Per la configurazione di propulsore ad elica isolata i

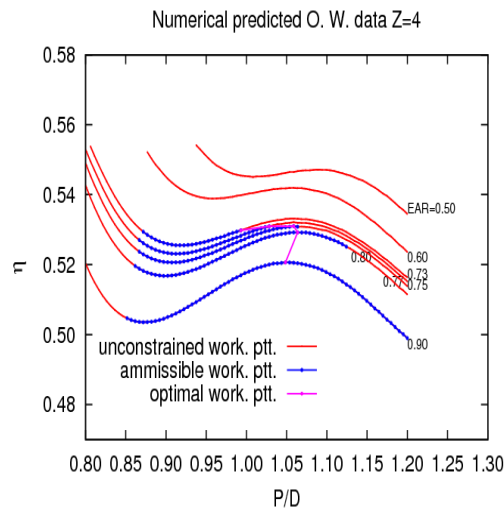


Figura 5.10: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia *E1622 – Series*. Risultati ottenuti su base dati numerica. Andamento dell'efficienza ottima al variare del rapporto passo/diametro, parametrizzata in funzione del rapporto di area espansa.

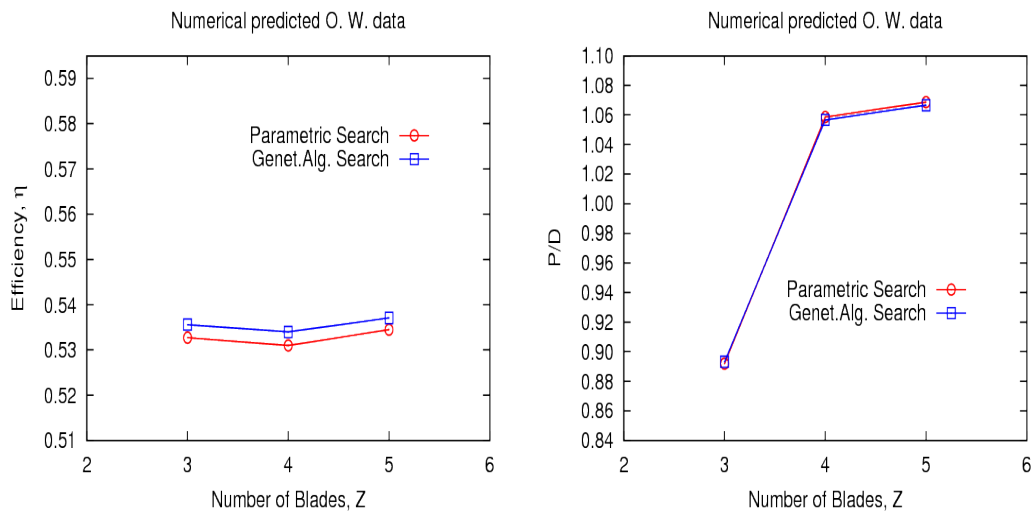


Figura 5.11: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia *E1622 – Series*. Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: andamento dell'efficienza ottima al variare del numero di pale. Destra: andamento del rapporto passo/diametro ottimo al variare del numero di pale.

guadagni di efficienza si attestano nell'ordine del 2.7% considerando anche la variazione del punto di lavoro, che si traduce in apparente perdita dell'1.4% se si confrontano le soluzioni originale ed ottimizzata per il punto di lavoro di quest'ultima.

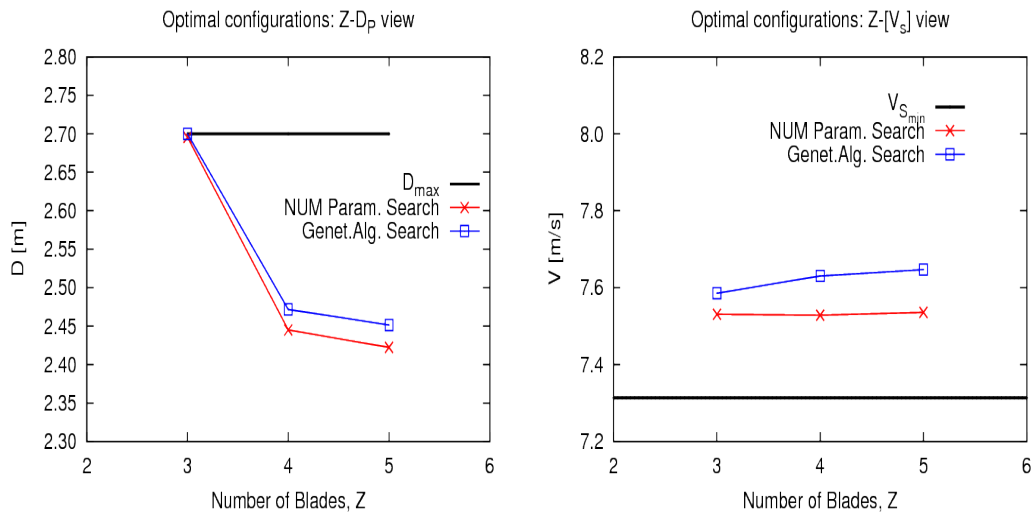


Figura 5.12: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia *E1622 – Series*. Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: andamento del diametro ottimo al variare del numero di pale. Destra: andamento della velocità nave al variare del numero di pale.

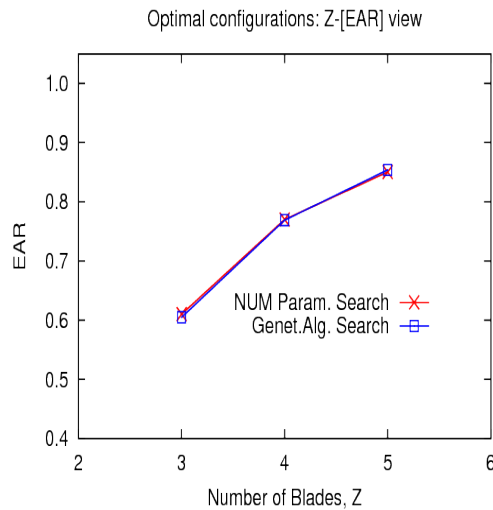


Figura 5.13: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia *E1622 – Series*. Risultati ottenuti su base dati numerica. Rapporto di area espansa al variare del numero di pale.

Sebbene con piccola disuniformità con sovrastima dei guadagni, tale tendenza è confermata analizzando i dati predetti dal modello surrogato, basato sulla rete neurale ed addestrata sui dati di simulazione del modello idrodinamico: per esso, il guadagno medio confrontando i diversi punti di lavoro è dell'ordine del 3.5% e di una perdita dello 0.3% considerando il confronto fatto a parità di punto di lavoro.

L'apparente perdita di efficienza considerando il confronto a parità di coefficiente di avanzo è in parziale contraddizione con i termini del problema in esame; in realtà, in tale punto di lavoro, l'elica di riferimento viola i vincoli sulla spinta e sulla coppia, rendendo tale confronto poco significativo.

Considerando l'elica in configurazione intubata valgono le stesse considerazioni fatte per l'elica isolata; ma, per poter indagare l'influenza del numero di pale sulla efficienza propria della configurazione intubata ed avendo sempre a mente che si tratta di ottimizzazioni basate su simulazioni stazionarie, si considera ora come punto di partenza per la fase di design di finitura la configurazione ottima pentapala.

In questo caso, l'incremento di efficienza è imputabile innanzitutto all'incremento della velocità al punto di lavoro; considerando invece il confronto fatto al punto di lavoro dell'elica in configurazione ottimizzata, sebbene l'elica originale violi in tal punto i vincoli sulla spinta richiesta dalla carena e sulla coppia erogata dal motore, presenta una efficienza idrodinamica maggiore.

5.8 Risultati Design di finitura

A valle della ricerca della soluzione migliore nell'ambito delle variabili di progetto dette di base (5.7.1, 5.7.2), è stata affinata la ricerca andando ad investigare la soluzione in uno spazio delle variabili nell'intorno dei punti ottimi fin qui determinati.

L'ottimo è stato qui ricercato sull'iperpiano delle variabili di progetto caratterizzanti la famiglia base delle eliche *E1622 - ser*, in presenza di perturbazioni sulle distribuzioni delle grandezze geometriche. In particolare, è stato determinato il set di parametri geometrici che massimizza l'efficienza idrodinamica del propulsore ($\Delta P/D$, $\Delta C/D$, $\Delta Sk/D$, $\Delta f_{MAX}/C$, $\Delta Rk/D$).

I risultati sono stati ottenuti con l'uso del modello basato sugli algoritmi genetici e con quello basato sulla variazione sistematica dei parametri di design, detto modello parametrico.

Di seguito sono mostrati gli andamenti delle distribuzioni radiali delle soluzioni al problema, così come determinate dai due modelli in esame. Nell'ordine vengono mostrate le distribuzioni radiali di passo e corda (fig. 5.14) e di skew e rake (fig.5.15) per i problemi di ottimizzazione dell'elica isolata ed intubata.

I risultati fanno riferimento alla fase di design di finitura dell'elica partendo dalle due configurazioni ottimizzate (isolata ed intubata) determinate nella fase di design di base.

5.9 Confronto configurazioni

Le configurazioni ottimizzate sono state messe a confronto con quella di partenza sia in termini di prestazioni globali sia in termini locali.

In fig. 5.16 sono mostrati i risultati globali di spinta coppia ed efficienza relativi al caso di ottimizzazione dell'elica isolata, mentre in fig. 5.21 quelli relativi alla configurazione intubata.

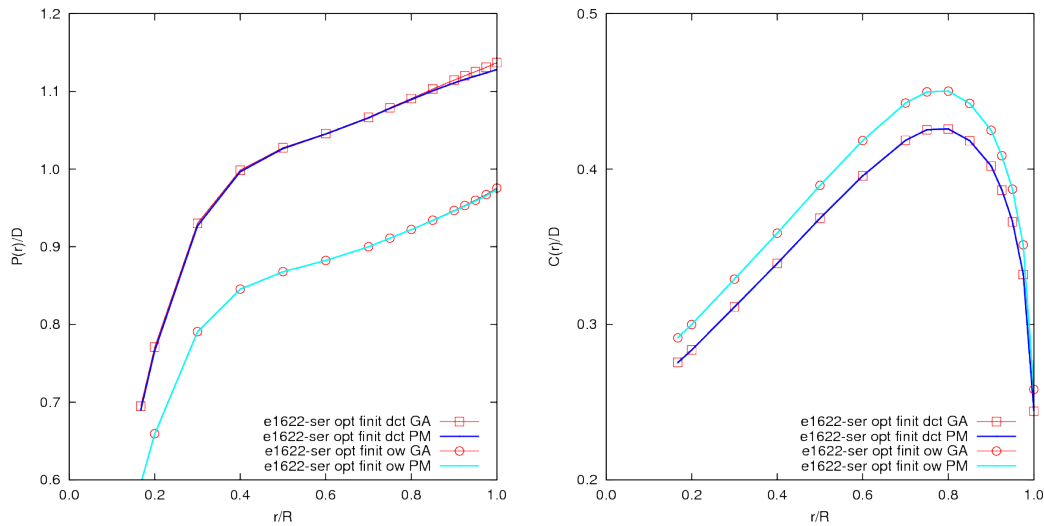


Figura 5.14: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche della famiglia *E1622 – Series*, nell'intorno della configurazione determinata nella fase di ottimizzazione di base. Risultati ottenuti su base dati numerica riguardanti la condizione di flusso libero. Sinistra: distribuzione radiale di passo; Destra: distribuzione radiale di corda.

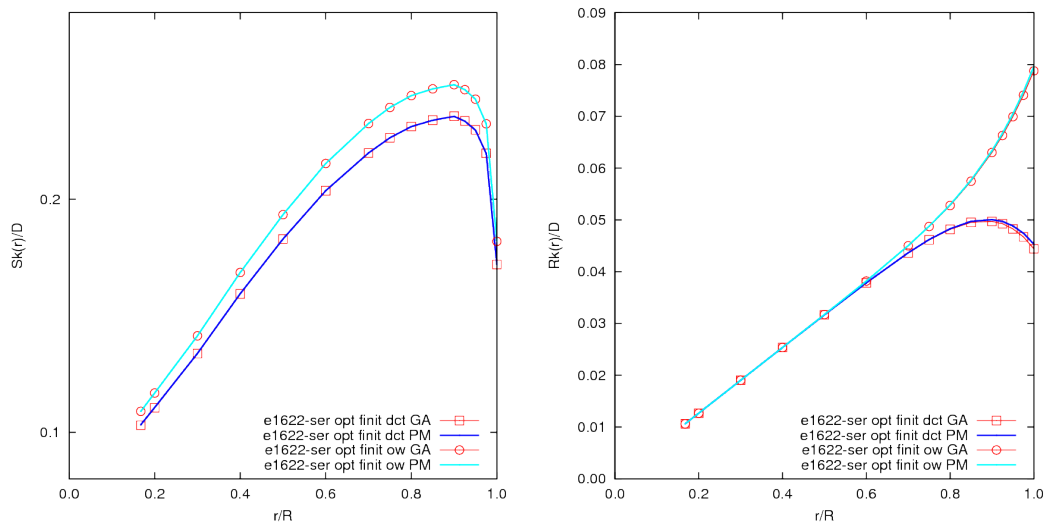


Figura 5.15: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche della famiglia *E1622 – Series*, nell'intorno della configurazione determinata nella fase di ottimizzazione di base. Risultati ottenuti su base dati numerica riguardanti la condizione di flusso libero. Sinistra: distribuzione radiale di skew; Destra: distribuzione radiale di rake.

In entrambi i gruppi di figure sono mostrati i risultati di tutte le configurazioni ottimizzate messe a confronto con l'elica originariamente montata sull'imbarcazione in questione.

Nelle fig. 5.17 e 5.18 viene mostrato il medesimo confronto tra le configurazioni succitate per le eliche in configu-

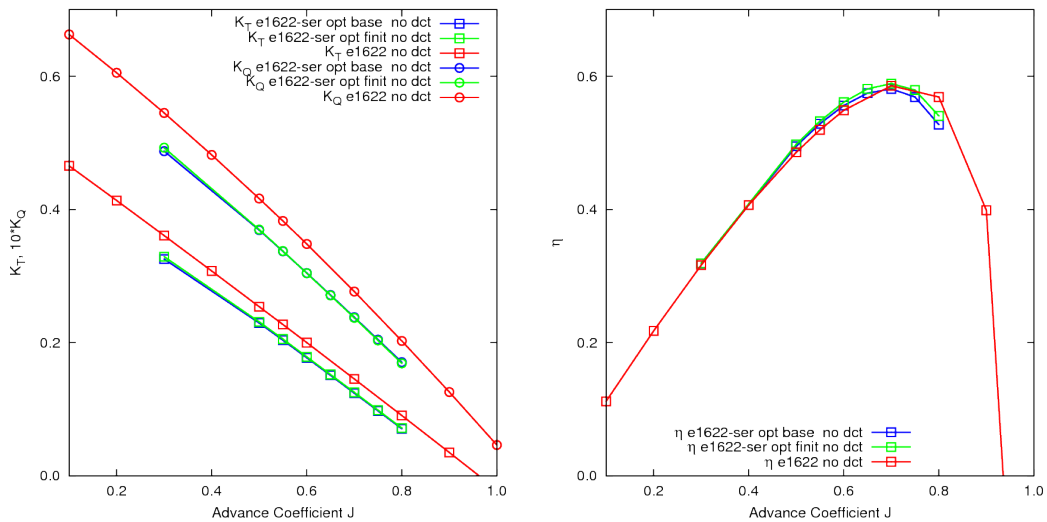


Figura 5.16: Ottimizzazione di base di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche convenzionali isolate della famiglia *E1622 – Series*. Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: coefficiente di spinta e coppia al variare del coefficiente di avanzo; Destra: efficienza al variare del coefficiente di avanzo.

razione isolata (fig. 5.22, 5.23 per le analoghe intubate), in termini di pressione cui la superficie palare è sottoposta durante l'esercizio in condizioni di progetto (vedi tab. 5.4 e 5.5). Per entrambe le configurazioni risultano non evidenti differenze sulla distribuzione di pressione nella scala complessiva, benchè risultino evidenti in scala locale, nella zona del bordo di attacco delle pale e nella zona all'apice della stessa.

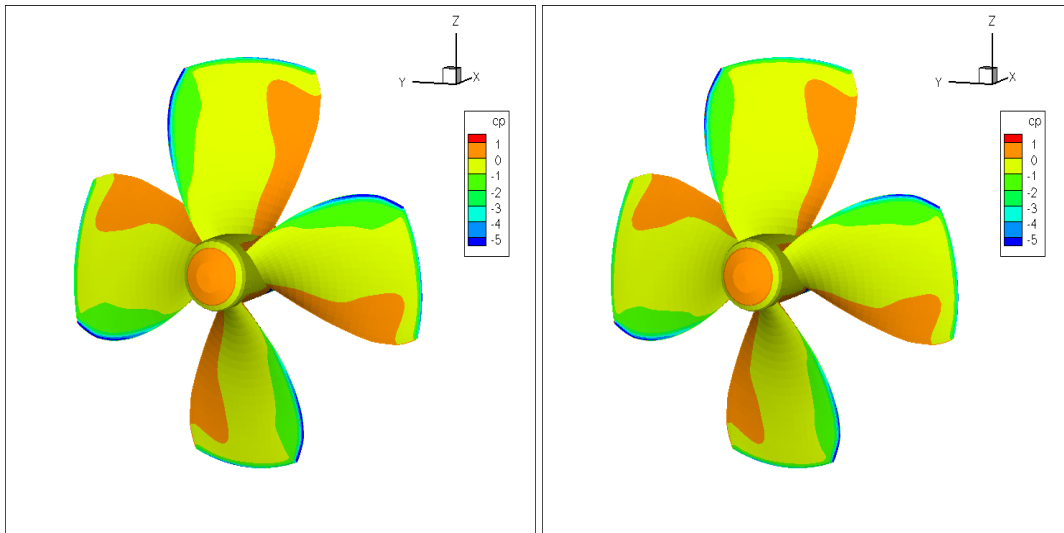


Figura 5.17: Ottimizzazione di base di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia *E1622 – Series*. Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie palare per l'elica *E1622* originale in configurazione isolata. A sinistra $J=0.514$; a destra $J=0.549$.

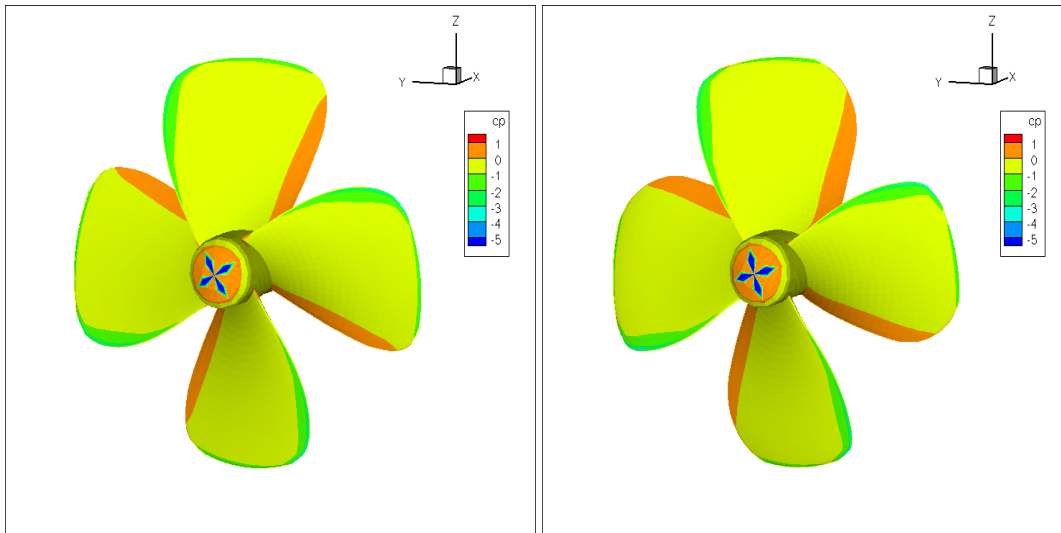


Figura 5.18: Ottimizzazione di base di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia *E1622 – Series*. Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie palare per l'elica ottimizzata in configurazione isolata ($J=0.549$). Sinistra: soluzione del problema di ottimizzazione di base; Destra: soluzione del problema di ottimizzazione di finitura.

Le caratteristiche geometriche globali delle eliche in configurazione isolata, unitamente alle prestazioni esercitate, sono mostrate sinteticamente nella tabella 5.4, mentre nelle fig. 5.19 sono mostrate le curve caratteristiche delle distribuzioni radiali di passo e corda; in analogia la tabella 5.5 e la fig. 5.24 fanno riferimento all'ottimizzazione di un'elica in configurazione intubata.

Infine nelle fig. 5.20 sono mostrate le geometrie risultanti delle eliche sovrapposte a quella dell'elica di riferimento per il problema dell'elica in configurazione isolata (in fig. 5.25 quelle per la configurazione intubata).

L'elica di riferimento, denominata *E1622OW*, non appartenente alla serie sistematica di eliche virtuali denominata *E1622 – ser*, viene confrontata con le soluzioni trovate durante la fase di design di base, denominata con la sigla *E1622 – serOpt.OWBase4* e con quella ricercata nel suo intorno durante la fase di design di finitura ed indicata con la sigla *E1622 – serOpt.OWFin4*. Le differenze nei valori assunti dalle variabili geometriche/operative globali si riflettono nelle differenti prestazioni esercitate, in generale, in corrispondenza a diversi punti di lavoro. In particolare, vengono mostrati confronti numerici tra l'efficienza idrodinamica dei propulsori a parità del punto di lavoro ed ognuna operante al suo punto di lavoro; il confronto avviene sia su base dati ad opera del solutore a pannelli usato, sia ad opera della rete neurale mediante la quale tali dati sono sintetizzati. Per la configurazione di propulsore ad elica isolata i guadagni di efficienza si attestano nell'ordine del 7% considerando anche la variazione del punto di lavoro, tale guadagno scende al 2% se si confrontano le soluzioni originale ed ottimizzata per il punto di lavoro di quest'ultima.

Sebbene con piccola disuniformità con sovrastima dei guadagni, tale tendenza è confermata analizzando i dati predetti dal modello surrogato, basato sulla rete neurale ed addestrata sui dati di simulazione del modello idrodinamico: per esso, il guadagno medio confrontando i diversi punti di lavoro è dell'ordine del 8% che scende al 3% considerando il

confronto fatto a parità di punto di lavoro.

Anche in questo caso, l'elica di riferimento è impossibilitata a lavorare sotto i vincoli imposti dal problema sulla potenza, numero di giri nel punto di lavoro proprio dell'elica ottimizzata. Il guadagno comunque ottenuto dalle eliche ottimizzate rendono robusta la fase di ottimizzazione.

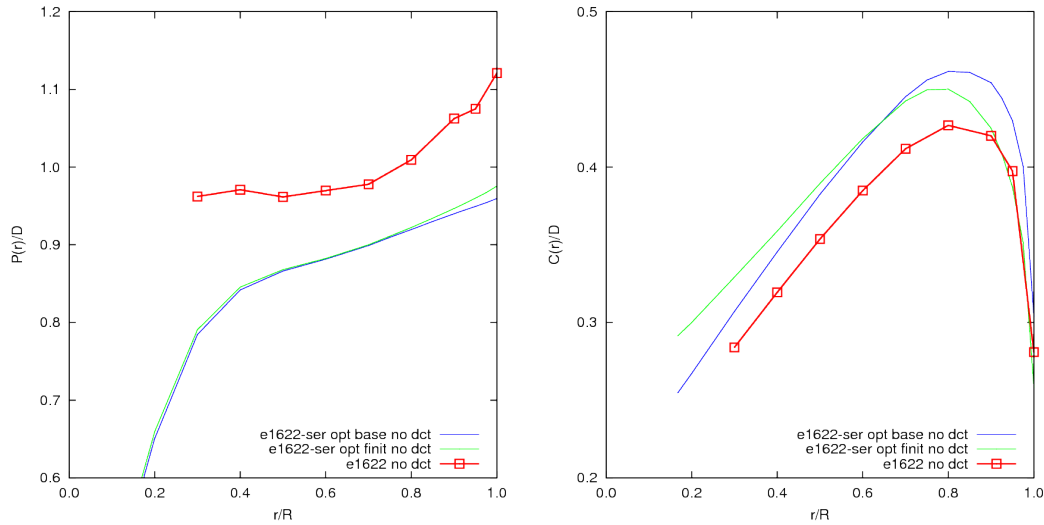


Figura 5.19: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia *E1622 – Series*. Distribuzioni radiali di passo (sinistra) e corda (destra) Confronto tra elica originale ed eliche da ottimizzazione.

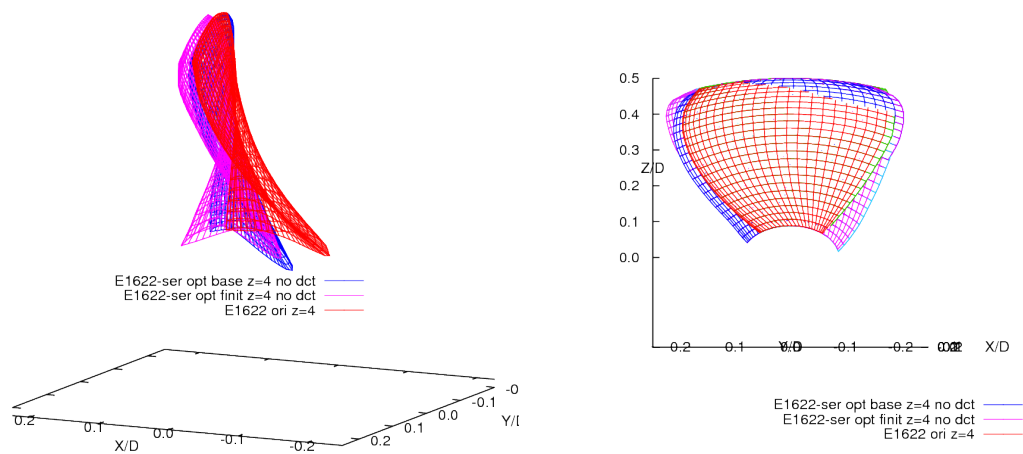


Figura 5.20: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche isolate della famiglia *E1622 – Series*. Geometrie delle eliche risultanti sovrapposte all'elica di riferimento. Sinistra: vista 3D. Destra: vista 2D sul piano trasversale all'asse di rotazione.

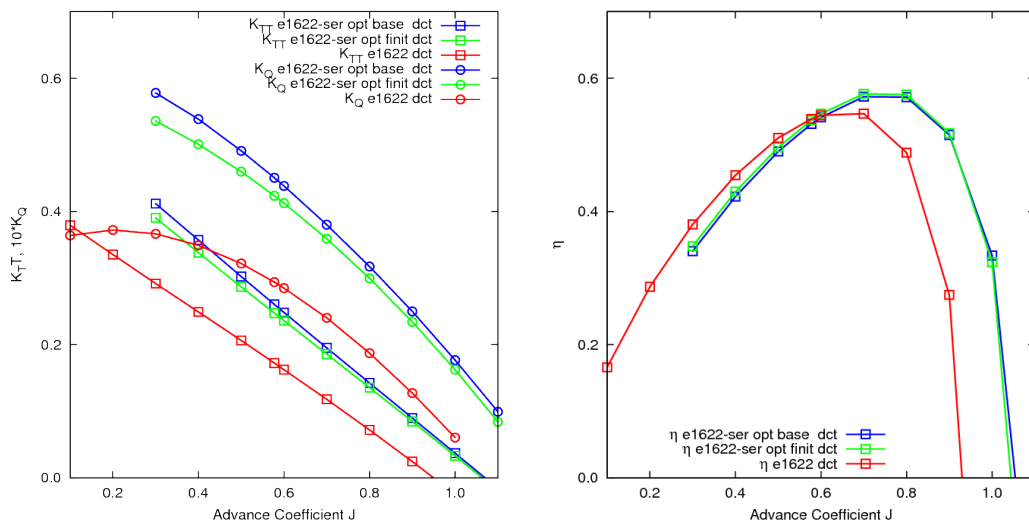


Figura 5.21: Ottimizzazione di base di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia *E1622 – Series*. Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: coefficiente di spinta e coppia al variare del coefficiente di avanzo; Destra: efficienza al variare del coefficiente di avanzo.

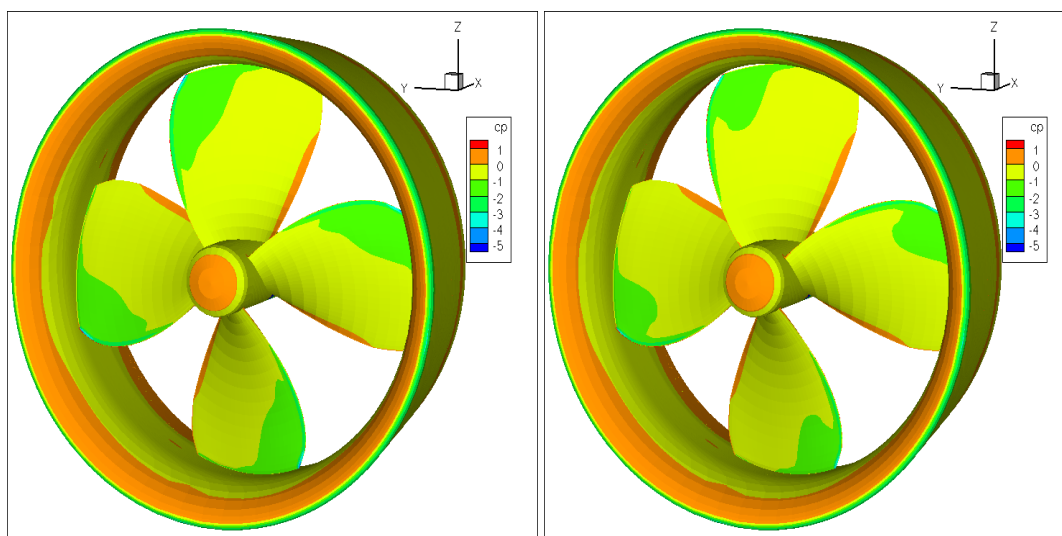


Figura 5.22: Ottimizzazione di base di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia *E1622 – Series*. Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie palare per l'elica *E1622* originale in configurazione intubata. A sinistra $J=0.514$; a destra $J=0.578$.

L'elica di riferimento, denominata *E1622DCT*, non appartenente alla serie sistematica di eliche virtuali denominata *E1622 – ser*, viene confrontata con le soluzioni trovate durante la fase di design di base, denominata con la sigla *E1622 – serOpt.DCTBase5* e con quella ricercata nel suo intorno durante la fase di design di finitura ed indicata con la sigla *E1622 – serOpt.DCTFinit5*; viene inoltre presa in considerazione la configurazione quadripala indicata con la sigla *E1622-serOpt.DCTBase4*. Le differenze nei valori assunti dalle variabili geometriche/operative globali

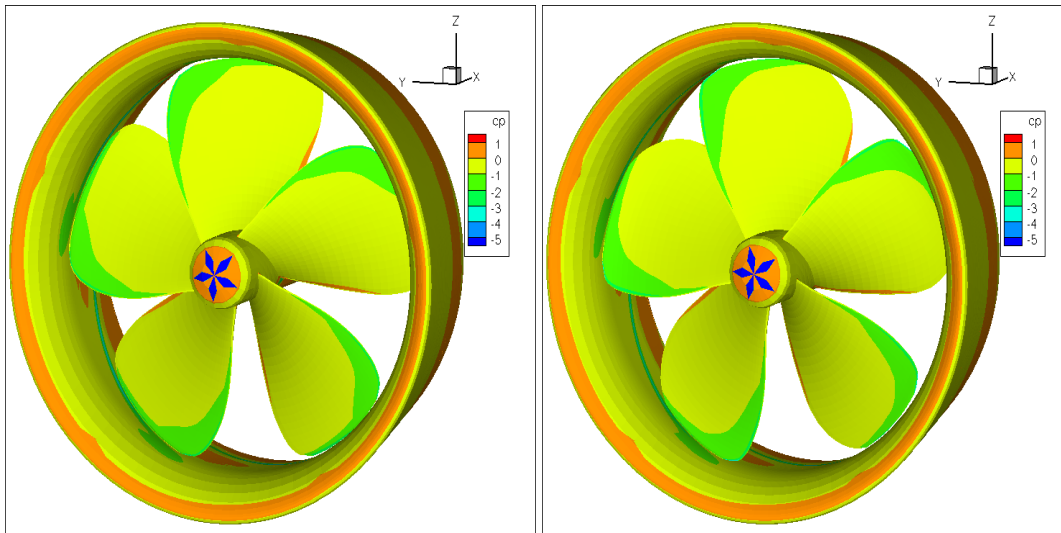


Figura 5.23: Ottimizzazione di base di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia *E1622 – Series*. Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie palare per l'elica ottimizzata in configurazione intubata ($J=0.578$). Sinistra: soluzione del problema di ottimizzazione di base; Destra: soluzione del problema di ottimizzazione di finitura.

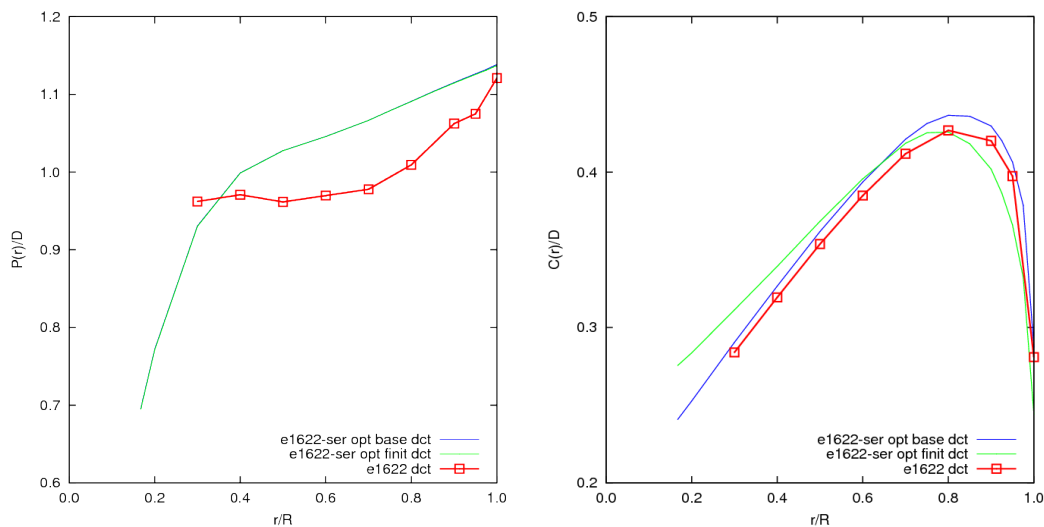


Figura 5.24: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia *E1622 – Series*. Distribuzioni radiali di passo (sinistra) e corda (destra) Confronto tra elica originale ed eliche da ottimizzazione.

si riflettono nelle differenti prestazioni esercitate, in generale, in corrispondenza a diversi punti di lavoro. In particolare, vengono mostrati confronti numerici tra l'efficienza idrodinamica dei propulsori a parità del punto di lavoro ed ognuna operante al suo punto di lavoro; il confronto avviene sia su base dati ad opera del solutore a pannelli usato, sia ad opera della rete neurale mediante la quale tali dati sono sintetizzati. Per la configurazione di propulsore ad elica isolata

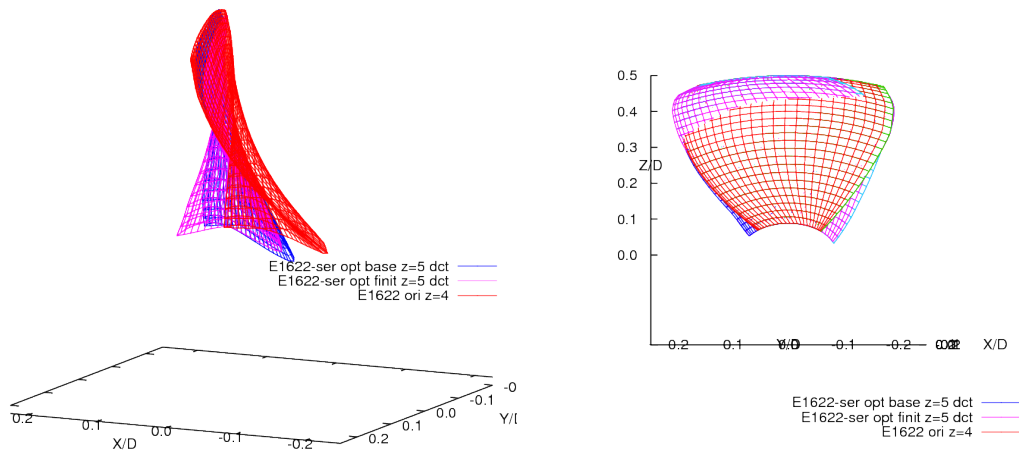


Figura 5.25: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia *E1622 – Series*. Geometrie delle eliche risultanti sovrapposte all'elica di riferimento. Sinistra: vista 3D. Destra: vista 2D sul piano trasversale all'asse di rotazione.

i guadagni di efficienza si attestano nell'ordine del 3% considerando anche la variazione del punto di lavoro, che si traduce in apparente perdita dell'1% se si confrontano le soluzioni originale ed ottimizzata per il punto di lavoro di quest'ultima.

Sebbene con piccola disuniformità con sovrastima dei guadagni, tale tendenza è confermata analizzando i dati predetti dal modello surrogato, basato sulla rete neurale ed addestrata sui dati di simulazione del modello idrodinamico: per esso, il guadagno medio confrontando i diversi punti di lavoro è dell'ordine del 4% che si traduce in una perdita dello 0.2% considerando il confronto fatto a parità di punto di lavoro.

In questo caso le eliche ottimizzate sono caratterizzate da una maggiore solidità delle pale (rappresentato globalmente dal maggior valore del rapporto di area espansa), da un numero maggiore di pale e da un rapporto maggiore di passo.

Se da un lato un incremento di passo e di numero di pale porta ad un'efficienza maggiore ad un valore più elevato del coefficiente di avanzo, dall'altra la maggior solidità delle pale determina un abbassamento dell'efficienza per le maggiori perdite da resistenza sul profilo.

Gli effetti contrastanti menzionati sono stati verificati mediante una analisi di sensibilità rispetto al valore di area espansa e di passo intorno alla configurazione di ottimo ottenuta nella fase di design di finitura dell'elica intubata.

Nella fig.5.26 viene mostrato l'andamento delle prestazioni al variare del rapporto di passo/diametro, parametrizzata rispetto al valore assunto dall'area espansa, entrambe nel range $\pm 5\%$ del valore della grandezza presa a riferimento. Le simulazioni sono state ottenute per semplicità, e senza perdere di generalità, per l'elica in configurazione isolata.

Come ci si poteva aspettare, la spinta è influenzata dal passo, la coppia dal passo ed in misura minore dal rapporto di area espansa. Infatti, ad un aumento di passo corrispondono incrementi di spinta e coppia; un aumento del rapporto

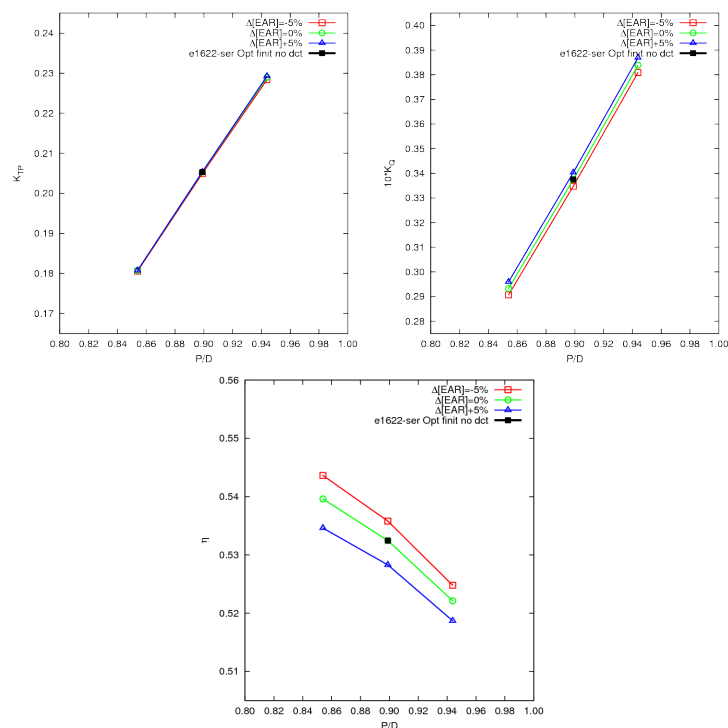


Figura 5.26: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia *E1622 – Series*. Analisi di sensibilità dell'efficienza rispetto all'area espansa ed al passo/diametro dell'elica, intorno alla configurazione determinata nella fase di design di finitura dell'elica intubata ($J=0.578$).

di area espansa determina un aumento di spinta minimo rispetto all'aumento di coppia resistente. Globalmente le grandezze risultano più influenzate da una variazione di passo piuttosto che un'analoga variazione di area espansa: l'effetto finale è una diminuzione di efficienza idrodinamica all'aumentare di passo e di rapporto di area espansa. Tale risultato è in totale accordo con la fisica, quando, a parità del resto viene incrementato il passo delle pale [24]. Se da un lato, ad un suo aumento, corrisponde un aumento del punto di massima efficienza e del punto di massima efficienza, dall'altro, come in questo caso, punti di lavoro inferiori al punto di massima efficienza si traducono in una diminuzione dell'efficienza idrodinamica.

Una ulteriore verifica dei risultati ottenuti in relazione all'influenza dei parametri considerati sulle grandezze di interesse viene mostrata considerando il confronto tra l'elica derivante dall'ottimizzazione di base in configurazione intubata e quella che si avrebbe fissando la configurazione ad essere quadripala come l'elica originale.

In fig. 5.27 viene mostrato l'andamento dell'efficienza delle eliche relative al problema di ottimizzazione in configurazione intubata, così come mostrato in precedenza, in abbinamento con la distribuzione di pressione superficiale dell'elica ottimizzata con vincolo ad essere quadripala.

Sebbene l'elica ottimizzata con vincolo aggiuntivo ad essere quadripala sia caratterizzata da un'efficienza prossima a quella della configurazione individuata come ottima, nel punto di lavoro di design (determinato univocamente nella ottimizzazione senza il vincolo in questione) mostra un leggero incremento di efficienza, ma ottenuta violando il

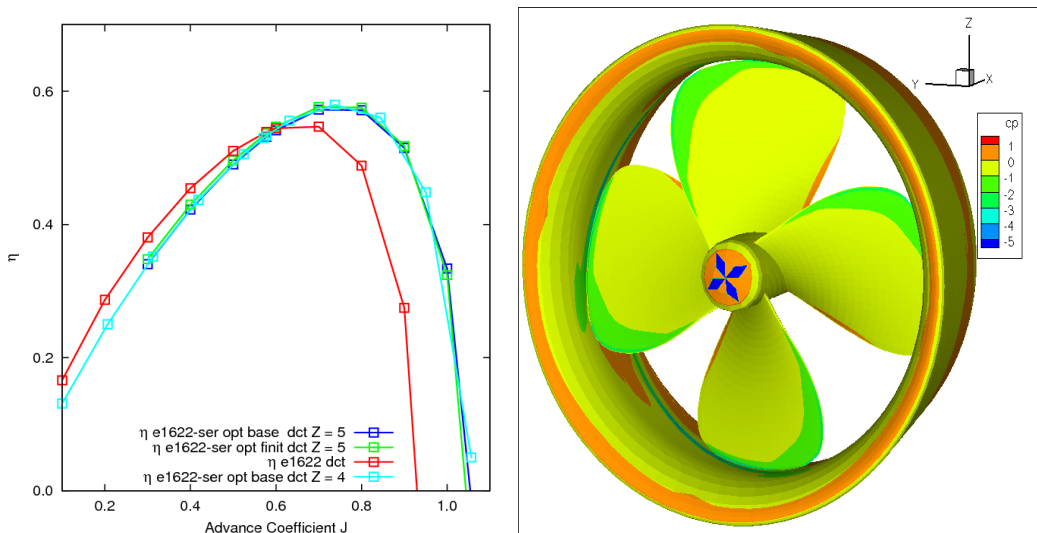


Figura 5.27: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia *E1622 – Series*. Risultati ottenuti su base dati numerica. Sinistra: efficienza al variare del coefficiente di avanzo; Destra: distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie palare per l'elica ottimizzata con vincolo $Z = 4$ ($J=0.578$).

vincolo su spinta (in particolare risulta minore della resistenza richiesta dalla carena per l'avanzamento a tale velocità).

	D[m]	Z	EAR	P/D	J	K_{TBEM}	$10K_{QBEM}$	η_{BEM}	$\Delta\eta_{BEM}\%$	η_{NN}	$\Delta\eta_{NN}\%$
E1622 OW	2.60	4	0.67	0.98	0.513 0.549	0.246 0.227	0.407 0.383	0.495 0.519	-% ² -% ¹		-% ² -% ¹
E1622-ser Opt. OW Base 3	2.69	3	0.70	0.83	0.517	0.162	0.252	0.527		0.528	+6.47%
E1622-ser Opt. OW Base 4	2.47	4	0.72	0.90	0.549	0.204	0.337	0.528	+1.75%	0.538	+6.72%
E1622-ser Opt. OW Base 5	2.68	5	0.74	0.80	0.527	0.172	0.274	0.529		0.532	+3.57%
											+6.91%
											+7.34%

Tabella 5.2: Caratteristiche geometriche e prestazionali delle eliche in configurazione isolata a valle della fase di design di base.¹: confronto a parità di punto di lavoro; ²: confronto tra punti di lavori equivalenti dal punto di vista dei vincoli su spinta e coppia.

	D[m]	Z	EAR	P/D	J	K_{TT}	K_Q	η_{BEM}	$\Delta\eta_{BEM}\%$	η_{NN}	$\Delta\eta_{NN}\%$
E1622 DCT	2.60	4	0.67	0.98	0.513	0.200	0.317	0.516	-% ²		-% ²
					0.578	0.172	0.294	0.539	-% ¹		-% ¹
E1622-ser Opt. DCT Base 3	2.69	3	0.60	0.89	0.518	0.170	0.264	0.532	+3.06%	0.536	+3.78%
E1622-ser Opt. DCT Base 4	2.47	4	0.77	1.06	0.571	0.248	0.425	0.530	+2.63%	0.534	+3.47%
E1622-ser Opt. DCT Base 5	2.45	5	0.85	1.07	0.578	0.260	0.450	0.531	-1.37%	0.537	-0.27%

Tabella 5.3: Caratteristiche geometriche e prestazionali delle eliche in configurazione intubata a valle della fase di design di base.¹: confronto a parità di punto di lavoro; ²: confronto tra punti di lavori equivalenti dal punto di vista dei vincoli su spinta e coppia.

	D[m]	Z	EAR	P/D	J	K_T	K_Q	η_{BEM}	$\Delta\eta_{BEM}\%$	η_{NN}	$\Delta\eta_{NN}\%$
E1622 OW	2.60	4	0.67	0.98	0.513	0.246	0.407	0.495	-% ²		-% ²
E1622-ser Opt. OW Base 4	2.55	4	0.72	0.90	0.549	0.227	0.383	0.519	-% ¹		-% ¹
E1622-ser Opt. OW Finit. 4	//	//	//	//	0.549	0.205	0.337	0.532	+1.75%	0.538	+3.57%
									+2.54%	0.532	+2.55%
									+7.50%		+7.50%
									+6.72%		+8.58%

Tabella 5.4: Caratteristiche geometriche e prestazionali delle eliche in configurazione isolata a valle della fase di design di finitura.¹: confronto a parità di punto di lavoro;
²: confronto tra punti di lavori equivalenti dal punto di vista dei vincoli su spinta e coppia.

	D[m]	Z	EAR	P/D	J	K_{TT}	K_Q	η_{BEM}	$\Delta\eta_{BEM}\%$	η_{NN}	$\Delta\eta_{NN}\%$
E1622 DCT	2.60	4	0.67	0.98	0.513	0.200	0.317	0.516	-% ²		-% ²
					0.578	0.172	0.294	0.539	-% ¹		-% ¹
E1622-ser Opt. DCT Base 5	2.45	5	0.85	1.07	0.578	0.260	0.450	0.531	-1.37%	0.537	-0.27%
E1622-ser Opt. DCT Finit. 5	//	//	//	//	0.578	0.247	0.423	0.537	-0.33%	0.538	-0.22%
E1622-ser Opt. DCT Base 4	2.47	4	0.77	1.06	0.578	0.245	0.422	0.533	-1.06%		+2.63%

Tabella 5.5: Caratteristiche geometriche e prestazionali delle eliche in configurazione intubata a valle della fase di design di finitura.¹ : confronto a parità di punto di lavoro; ² : confronto tra punti di lavori equivalenti dal punto di vista dei vincoli su spinta e coppia.

Capitolo 6

Conclusioni

Il presente lavoro descrive l'attività triennale svolta in ambito dottorale dall'autore.

In tale periodo i risultati conseguiti sono stati: di natura teorica mediante lo sviluppo e/o l'estensione di modelli numerici; di natura computazionale legata all'applicazione degli stessi modelli a casi test.

Obiettivo generale del lavoro è stato lo sviluppo e la definizione di una tecnica per la progettazione che abbinasse automazione, velocità di esecuzione ed accuratezza dei risultati. Tale tecnica è stata applicata per la progettazione di forma di propulsori ad ala rotante in configurazione multi-corpo.

Il modo con cui tale obiettivo è stato perseguito ha riguardato l'attività su più fronti.

La tecnica di design proposta si basa sulla sequenza successiva di fasi di design di base e di finitura, preposte all'individuazione di parametri globali geometrico/operativi e delle distribuzioni radiali delle principali grandezze geometriche del propulsore, avendo fissate gli uni rispetto agli altri.

La soluzione viene cercata all'interno del set di configurazioni possibili di una famiglia di propulsori, i cui componenti sono differenti tra loro soltanto attraverso differenti valori delle variabili di design. Ad ogni configurazione è associato il valore di una o più grandezze fisiche utilizzate nel problema per la valutazione delle prestazioni del propulsore, dei vincoli e della funzione obiettivo del problema: il luogo di tali punti nello spazio delle variabili di progetto forma la superficie di risposta del sistema.

La suddivisione del problema in due sottofasi dedicate all'individuazione di parametri globali e locali del propulsore permette di costruire detta superficie di risposta su un numero limitato di punti, consentendo un risparmio in termini di risorse impiegate. Sebbene, a rigore, tale tecnica debba essere risolta iterativamente, in tale lavoro è utilizzata in singolo step conseguendo comunque risultati soddisfacenti.

Per incrementare la velocità di ricerca della soluzione del problema, l'esplorazione è stata condotta su una superficie di risposta approssimata costruita sulla base dell'applicazione di un modello surrogato di quello utilizzato per la costruzione accurata della superficie in esame.

Tra le tecniche utilizzate per la sintesi di sistemi complessi è stata adottata quella basata sull'applicazione di una rete

neurale, per la sintesi approssimata dei legami funzionali tra le variabili di design e la superficie di risposta del sistema e destinata a funzionare come modello surrogato.

È stato sviluppato un apposito modello di rete neurale basato su un'architettura multistrato di tipo *feed-forward*; per l'addestramento della stessa è stato applicato un modello di Levenberg-Marquardt, basato su una tecnica di *back-propagation* per il calcolo del gradiente dell'errore rispetto al valore dei pesi delle connessioni sinaptiche. I risultati predetti mediante l'utilizzo di tale strumento sono stati quindi verificati rispetto ai parametri fondamentali della rete e validati per diversi casi test a complessità crescente mediante: la definizione e l'uso di un dedicato dataset di validazione; confronto diretto con i risultati ottenuti da un solutore commerciale, basato su un modello di rete neurale equivalente.

La superficie di risposta del sistema è stata costruita sulla base dei risultati ottenuti da simulazioni numeriche operate da un modello teorico-numerico valido per lo studio di flussi che ammettono potenziale di velocità intorno a configurazioni complesse di tipo rotore-statore. Il modello preso in esame è stato ampiamente validato nel corso degli anni per lo studio aero/idrodinamico di rotori isolati investiti da correnti uniformi e non, in condizioni cavitanti e non, ed è stato qui esteso per lo studio del flusso intorno a configurazioni di tipo rotore intubato coassiale. Il mantello viene qui trattato come un oggetto rotante solidale al rotore, previo opportuno trattamento della scia rilasciata al bordo di uscita del mantello. Ciò permette la risoluzione del problema in modo rapido senza perdita di accuratezza rispetto al caso di considerarlo quale oggetto statorico. La robustezza dei risultati in relazione all'accuratezza, alla velocità e alla semplicità delle griglie geometriche di calcolo per la rappresentazione dei corpi portanti rendono tale strumento particolarmente adeguato all'uso in fase di design preliminare di forma di propulsori.

Oltre al solutore aero/idrodinamico ed al modello per la sintesi di sistemi complessi completano il set di strumenti utilizzati dalla tecnica di design esposta il generatore di griglie geometriche di calcolo e l'ottimizzatore per l'esplorazione della superficie di risposta del sistema alla ricerca della soluzione al problema in esame.

L'ottimizzatore svolge il compito di ricercare la soluzione nello spazio delle variabili di design, valutando il valore della funzione obiettivo e dei vincoli sui vari punti componenti la superficie di risposta del sistema. Come detto, l'ottimizzatore qui impiegato fa uso di un modello surrogato per la rappresentazione veloce e sufficientemente accurata di detta superficie. Due differenti modelli sono qui impiegati per la ricerca della soluzione. Un primo modello, basato sull'uso di algoritmi genetici per la ricerca veloce dell'ottimo globale del problema, sviluppato nel corso degli anni è applicato con successo al caso preso in esame; esso, mediante una tecnica mista randomica/sistematica, modifica le variabili di design alla ricerca della combinazione cui compete il valore più elevato della funzione obiettivo, stante il soddisfacimento dei vincoli per il tramite di apposite funzioni di penalità. Un secondo modello, basato sulla variazione sistematica delle variabili di design e detto modello parametrico viene qui impiegato per una ricerca accurata della soluzione, ma tanto più lenta quanto più è esteso il campo delle variabili di design.

Il generatore di griglie geometriche di calcolo fornisce, a partire da distribuzioni fissate delle grandezze geometriche di interesse, una rappresentazione tridimensionale della superficie dei propulsori, in base alla quale viene performata una simulazione con il solutore aero/idrodinamico.

Gli strumenti sopra enunciati sono stati verificati e validati singolarmente. A valle di un'apposita analisi di sensibilità

condotta per la determinazione dei limiti di variabilità dei parametri di design, lo strumento sviluppato nel presente lavoro è stato applicato a problemi a complessità crescente.

L'applicazione finale ha riguardato la progettazione ottimizzata di un propulsore destinato ad equipaggiare un peschereccio marciante in condizione di marcia libera.

A fronte della definizione dei vincoli di accoppiamento del propulsore al motore ed alla carena, l'obiettivo è stato ricercato massimizzando l'efficienza idrodinamica del propulsore in configurazione isolata ed intubata.

I risultati ottenuti sono stati soddisfacenti in virtù che:

- i modelli utilizzati per l'ottimizzatore hanno determinato soluzioni verosimilmente uguali
- le configurazioni ottimizzate mostrano guadagni in termini di efficienza ed in termini di massima velocità raggiungibile
- i risultati ottenuti mediante l'utilizzo del modello surrogato sono stati in gran parte confermati da una verifica ad opera del modello per l'analisi aero/idrodinamica considerato in questo lavoro
- la tecnica di progettazione è stata messa a punto e validata e può quindi essere utilizzata in futuro, con la possibilità di migliorarne i risultati mediante sostituzione degli strumenti componenti con altri migliori come:
 - modello solutore aero/idrodinamico sostituito con altro più accurato
 - modello di sintesi basato sull'uso di una rete neurale sostituito da altro modello per la rappresentazione più fedele della superficie surrogata di risposta del sistema

oppure:

- estendendo il numero di variabili e/o funzioni obiettivo del progetto
- includendo le azioni svolte dalla tecnica di design in un ciclo per la ricerca dell'ottimo facenti riferimento a più serie sistematiche di eliche virtuali

Più in particolare, l'accuratezza del modello surrogato utilizzato dagli ottimizzatori influisce sulla ricerca dell'ottimo; l'errore commesso dalla rete neurale risulta essere dello stesso ordine di grandezza delle differenze tra i vari punti di ottimo trovati, sebbene queste risultino comunque migliori del propulsore di riferimento.

Nei limiti propri del modello di sintesi scelto, i punti di ottimo sono giudicati soddisfacenti, sebbene nasca l'esigenza di migliorare l'accuratezza del modello adottando possibili diverse soluzioni sulla rete neurale:

- aumentando il grado di convergenza durante la fase di addestramento
- introducendo la variabile di output "efficienza" senza calcolarla per tramite delle variabili di spinta e coppia, cosa che introduce un errore composto di ordine non proporzionale a quello sulle singole variabili (la coppia appare al denominatore nell'espressione dell'efficienza)

- aumentando i dati utili per l'addestramento: finora infatti è stata utilizzata una griglia minima omogenea “ $5^{N_{IN}}$ ”, con N_{IN} pari al numero di variabili di design considerate.

Le suddette azioni migliorative non risolvono comunque il problema in maniera esaustiva. Pur aumentando l'accuratezza del modello surrogato, il grado di incertezza sulla soluzione trovata rimane legato all'accuratezza del modello utilizzato per il solutore aero/idrodinamico. Una possibile soluzione richiederebbe l'adozione in vece sua di un modello più complesso, come quello ibrido basato su metodologia BEM per il rotore, RANSE per il mantello. Tale scelta implicherebbe innanzitutto un aggravio dei tempi per la costruzione del dataset utile per la successiva sintesi mediante il modello di rete neurale o equivalente, oltre che complicare la fase di generazione delle griglie di calcolo; infatti, esso richiederebbe la discretizzazione non più della superficie dei corpi, bensì anche del volume fluido di controllo adottato in cui i corpi stessi sono immersi. Inoltre, poichè la robustezza dei risultati ottenuti è fortemente influenzata dalla qualità delle griglie adottate, la convergenza del modello non risulta assicurata per ogni singolo caso, imponendo un controllo/verifica dei risultati ottenuti.

D'altra parte:

- l'ipotesi di base con cui la scia in ingresso al propulsore risulta uniformemente modificata dal coefficiente di frazione di scia
- il vincolo sulla cavitazione basato sulla formula semiempirica di Keller può risultare troppo restrittivo e non dà alcuna informazione riguardo il comportamento locale dell'elica nei riguardi di tale fenomeno
- il problema considerato è di tipo mono-obiettivo, limitando la possibilità di indagare la soluzione a più problemi contemporaneamente.

La progettazione completa del propulsore deve considerare necessariamente anche aspetti legati alle reali condizioni operative, quali il funzionamento del propulsore dietro scia rilasciata dalla carena, responsabile di oscillazioni sui carichi oltre che di una serie di fenomeni non stazionari legati, tra l'altro alla cavitazione, al rumore irradiato nel campo ed alle vibrazioni indotte alla carena per tramite dell'asse.

Per tali problematiche appare evidente l'influenza di parametri che in tale contesto sembrano non influire quanto altri: il numero di pale e la distribuzione radiale di skew.

Infatti i risultati ottenuti mostrano che i punti di ottimo al variare del primo di tali parametri non sono tanto dissimili tra loro.

In realtà il numero di pale interagisce con tutti i fenomeni non stazionari influenzando fortemente la risposta del sistema (l'interazione tra il rotore ed una scia incidente non uniforme determina oscillazioni nei carichi il cui sviluppo in frequenza dipende proprio da questo parametro).

La suscettibilità del sistema in tali condizioni di funzionamento è altresì influenzata dalla distribuzione radiale di skew. Questo parametro infatti determina l'ampiezza dei carichi massimi applicati alle pale di un'elica. Una distribuzione nulla di skew, quando l'elica lavora investita da una scia non uniforme spazialmente, determina l'ingresso contemporaneo di tutte le sezioni nella zona a difetto di velocità, con conseguente aumento contemporaneo delle pressioni

agenti sulla superficie palare. Parimenti, l'evoluzione delle eventuali bolle di cavitazione che qui si formano determina globalmente picchi nel rumore irradiato nel campo e nelle vibrazioni trasmesse all'asse. Di contro, una distribuzione non nulla di skew permette all'elica di entrare gradualmente nella zona a difetto di velocità, consentendo ai carichi e a tutti i fenomeni ad esso collegati un'evoluzione caratterizzata da valori medi più elevati in valore assoluto, ma con limitati gradienti locali.

Una mirata progettazione tarando opportunamente la funzione obiettivo, legandola ad indicatori dei suddetti fenomeni (cavitazione, rumore, vibrazioni), sarebbe influenzata notevolmente da questi parametri, più che nella situazione di considerare l'efficienza idrodinamica come unica funzione obiettivo.

In virtù di tali considerazioni gli sviluppi futuri auspicabili possono sintetizzarsi nei seguenti punti:

- sviluppare il modello per l'analisi aero/idrodinamica mediante l'inclusione di un modello per l'allineamento della scia rilasciata dai corpi portanti alla corrente locale fluida
- sviluppare il modello di sintesi di sistemi complessi basati su reti neurali mediante adozione di modelli basati su algoritmi genetici per la ricerca dei migliori pesi sinaptici durante la fase di addestramento
- modificare la tecnica di sintesi del sistema complesso basandola sull'uso di modelli a fedeltà variabile; un più semplice e veloce modello viene accoppiato ad un modello surrogato destinato a fornire la correzione rispetto ad un modello più accurato
- estendere il problema considerato alla progettazione di propulsori investiti da correnti fluide non uniformi; tale estensione permetterebbe anche una ridefinizione della funzione obiettivo includendo vincoli legati a fenomeni locali non stazionari (oscillazioni dei carichi superficiali e/o dell'estensione della bolla cavitante).

Bibliografia

- [1] Baltazar J., Falcao de Campos J. A. C., *On the Modelling of the Flow in Ducted Propellers With a Panel Method*, First International Symposium on Marine Propulsors smp09, Trondheim, Norway, June 2009
- [2] Batchelor G. K., *An Introduction to Fluid Dynamics*, ISBN 0521663962, Cambridge University Press, 1967
- [3] Bernitsas M. M., Ray D., Kinley P., *K_T , K_Q and Efficiency curves for the Wageningen B-series Propellers*, Report No.237, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Michigan, May 1981
- [4] Bjorshol N. H., *Design concept for low energy fishing vessel*, International Council for the Exploration of the Sea, CM 2007/M:07
- [5] Bradley S. R., *A Comparison of Neural Network and Regression Models for Navy Retention Modelling*, Tesi di Laurea in Management, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 1993
- [6] Calcagni D., *Modellazione teorica e numerica del flusso attorno ad un'elica navale all'interno di un tunnel idrodinamico*, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Roma Roma Tre, Anno Accademico 2002/03.
- [7] Calcagni D., Greco L., Salvatore F., *Numerical Assessment of a BEM-based Approach for the Analysis of Ducted Propulsors*, 12th Numerical Towing Tank Symposium, NuTTS, Cortona, Italy, October 2009
- [8] Calcagni D., Salvatore F., Bernardini G., Miozzi M., *Automated Marine Propeller Design Combining Hydrodynamics Models and Neural Networks*, 1st International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency E-Fishing, Vigo, Spain, May 2010
- [9] Carlton, J.S., *"Podded Propulsors: Some Design and Service Experience"*, The Motor Ship Marine Propulsion Conference, Copenhagen, Danimarca, 2002.
- [10] Coney W.B., *A Method for the Design of a Class of Optimum Marine Propulsors*, Tesi di Dottorato in Naval Architecture, Massachusetts Institute of Technology, 1989
- [11] Deng Y., *Performance Database Interpolation and Constrained Nonlinear Optimization Applied to Propulsor Blade Design*, Report No. 052, Tesi di Laurea in Ingegneria, Università di Austin Texas, 2005

- [12] DEpagnier K. P., *A Computational Tool for the Rapid Design and Prototyping of Propellers for Underwater Vehicles*, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Massachusetts Institute of Technology, 2007
- [13] Deucker, S., *An Efficient Propulsion System for Small Underwater Vehicles*, Tesi di Laurea in Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1997
- [14] Doshi A., *Aircraft Position Prediction Using Neural Networks*, Tesi di Laurea in Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, 2005
- [15] Druckenbrod M., Hundemew J., Abdel-Maksoud M., Steden M., *Optimisation of Single and Multi-Component Propulsors*, 9th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries, COMPIT10, Gubbio, 12-14 April 2010
- [16] Geisbert J. J., Schroeder S. D., *A Stock Propeller Design for the High Speed Sealift Hybrid Contra-Rotating Shaft-Pod, Model 5653-3A*, NSWCCD-50-TR-2008/003 March 2008
- [17] Gennaretti, M., and Lisandrin, P., *Flap-Lag Rotor Dynamics and Aeroelastic Stability Using Finite-State Aerodynamics*, Proceedings of the 24th European Rotorcraft Forum, AAAF, Marseilles, France, Sept. 1998, pp. DY.01.1-DY.01.11.
- [18] Gu H., Kinnas S. A., *Modeling of Contra-Rotating and Ducted Propellers via Coupling of a Vortex-Lattice with a Finite Volume Method*, Propellers/Shafting 2003 Symposium, Society of Naval Architects and Marine Engineers, Virginia Beach, VA, September 17-18, 2003
- [19] Hoekstra M., *A RANS-based analysis tool for ducted propeller systems in open water condition*, International Shipbuilding Progress 53 (2006) pp. 205227
- [20] Karunanithi N., Grenney W. J., Whitley D., Bovee K., *Neural Networks for River Flow Prediction*, J. Comp. in Civ. Engrg. Volume 8, Issue 2, pp. 201-220 (April 1994)
- [21] Kee C., Hamill G. A., Lam W-H., Wilson P. W., *Investigation of the Velocity Distributions within a Ships Propeller Wash*, Proceedings of the Sixteenth (2006) International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA, May 28-June 2, 2006
- [22] Kerwin J. E., *Hydrofoils and propellers. Lecture Notes*, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute Technology, January 2001.
- [23] Kim S-Y., Moon B-Y., Kim D-E., *Optimum Design of Ship Design System Using Neural Network Method in Initial Design of Hull Plate*, KSME International Journal, Vol. 18 No. 11, pp. 1923-1931, 2004
- [24] Kuiper G., *The Wageningen Propeller Series*, MARIN Publication 92-001, 1992
- [25] Maiorov V., Pinkus A., *Lower Bounds for Approximating by MLP Neural Networks*, Neurocomputing, vol.25, pp. 81-91, 1999

- [26] Mertes P., Heinke H. J., *Aspects of the Design Procedure for Propellers Providing Maximum Bollard Pull*, ITS 2008, Singapore, May 2008
- [27] Mishima S., *Design of Cavitating Propeller Blades in Non-Uniform Flow by Numerical Optimization*, Tesi di Dottorato in Naval Architecture, Massachusetts Institute of Technology, 1996
- [28] Myers, R.H., Montgomery, D.C., *Response Surface Methodology*, ISBN: 0471581003, John Wiley and Sons Inc., New York, USA (1995).
- [29] Oosterveld H. W. C., Van Oossanen P., *Further Computer-Analyzed Data of the Wageningen B-Screw Series*, International Shipbuilding Progress, Vol. 22, No. 251, July 1975
- [30] Ozsu E., Takinaci A. C., Odabasi A. J., *Viscous/Potential Flow Coupling Study for Podded Propulsors*, First International Symposium on Marine Propulsors smp09, Trondheim, Norway, June 2009
- [31] Pyo S., Kinnas S. A., *Propeller wake sheet roll-up modeling in three dimensions*, Journal of Ship Research, 41(2):8192, June 1997
- [32] Ramsey A., *Assessment of the Modelling Abilities of Neural Networks*, Tesi di Laurea in Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1994
- [33] Raymer P.D., *Enhancing Aircraft Conceptual Design Using Multidisciplinary Optimization*, PhD Thesis, ISBN: 9172832592 Royal Institute of Technology, Stockholm (Sweden), May 2002.
- [34] Roddy R. F., Hess D. H., Faller W., *Neural Network Predictions of the 4-Quadrant Wageningen Propeller Series*, NSWCCD-50-TR-2006/004, April 2006
- [35] Sanchez-Caja A., Pylkkanen J. V., Sipila T. P., *Simulation of the Incompressible Viscous Flow around Ducted Propellers with Rudders Using a RANSE Solver*, 27th Symposium on Naval Hydrodynamics Seoul, Korea, 5-10 October 2008
- [36] Grippo L., Sciandrone M., *Metodi per l'Ottimizzazione per le Reti Neurali*, Technical Report 09-03, Università di Roma La Sapienza, April 2003
- [37] Stanway M. J., Stefanov-Wagner T., *Small-diameter ducted contrarotating propulsors for marine robots*, OCEANS 2006, Boston, MA
- [38] Steden M., Hundemer J., Abdel-Maksoud M., *Optimisation of a Linearjet*, First International Symposium on Marine Propulsors, smp09, Trondheim, Norway, June 2009
- [39] Stubblefield J.M., *Numerically-Based Ducted Propeller Design Using Vortex Lattice Lifting Line Theory*, Tesi di Laurea in Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2008
- [40] Taketani T., Kimura K., Ishii N., Matsuura M., Tamura Y., *Advanced Design of a Ducted Propeller with High Bollard Pull Performance*, First International Symposium on Marine Propulsors smp09, Trondheim, Norway, June 2009

- [41] Trani A. A., Wing-Ho F., *Enhancements to SIMMOD: A Neural Network Post-processor to Estimate Aircraft Fuel Consumption*, NEXTOR Research Report RR-97-8, 1997
- [42] Werle M.J., Presz W.M., *Ducted Wind/Water Turbines and Propellers Revisited*, *Journal of Propulsion and Power* 2008 0748-4658, vol.24 no.5 (1146-1150)

Appendice A

Risultati di compendio della tecnica di design

Vengono di seguito riportati i risultati di due analisi di sensibilità condotte, sulle variabili utilizzate nel problema di design di massima e quello di finitura in ottica di definizione del campo utile di variabilità delle stesse durante l'applicazione ad un problema pratico e in ottica di validazione delle prestazioni offerte dagli schemi ottimizzativi adottati nel presente lavoro. Vengono considerate le due configurazioni di elica isolata A.1.1 ed intubata A.1.2.

Vengono infine riportati i risultati ottenuti precedentemente al caso chiave del presente lavoro, riguardante l'ottimizzazione di base su base dati numerica, sperimentale e/o ibrida di propulsori ad elica isolata ed intubata, utilizzate per validare gli ottimizzatori utilizzati nel presente lavoro.

A.1 Analisi di sensibilità delle variabili di progetto

L'analisi di sensibilità dell'influenza delle variabili di design sulle prestazioni viene esaminata nei casi distinti relativi al design di base e di finitura.

Per il primo dei casi, l'obiettivo è quello di validare la configurazione scelta come base per la costruzione della serie sistematica di eliche virtuale, confrontando i risultati con quelli relativi all'elica di riferimento, mentre per il secondo caso, l'obiettivo è quello di verificare le variabili da utilizzare nel problema quantificandone i limiti di variabilità.

A.1.1 Eliche in configurazione isolata

L'elica di partenza *E1622* è stata messa a confronto con quella di base della serie sistematica, caratterizzata dai medesimi valori nominali delle grandezze suddette e denominata *E1622 – ser*. I risultati del confronto sono mostrati nella fig.A.1, dalla quale si evince che l'elica *E1622 – ser* mostra delle prestazioni leggermente inferiori alle basse velocità,

sebbene tale deficienza sia bilanciata da una maggiore maggiore efficienza alle alte velocità, ottenuta ad un valore più elevato di velocità e/o ad un minor regime di funzionamento, ovvero con un elica di diametro minore ¹.

Risulta quindi essere un buon punto di partenza per la ricerca di una soluzione ottimizzata rispetto alla E1622.

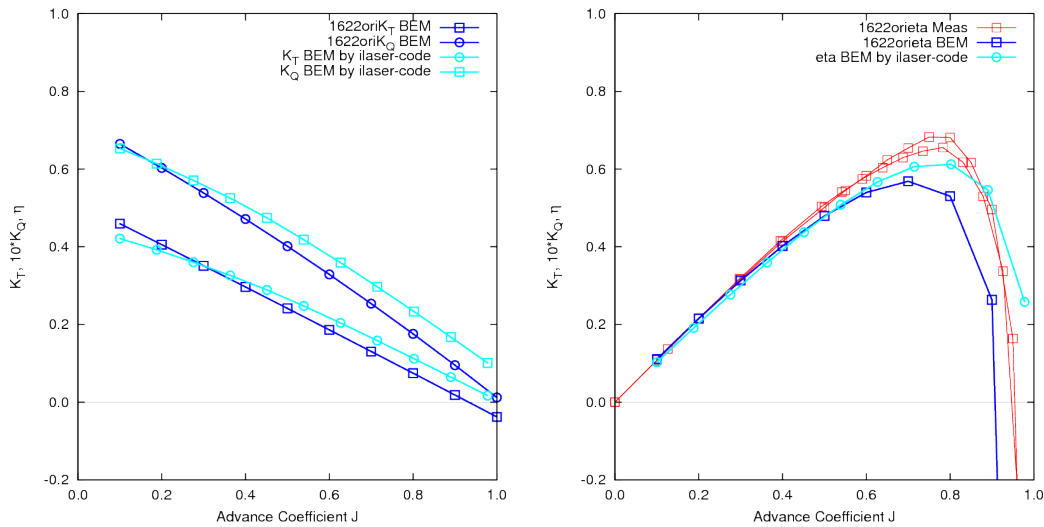


Figura A.1: Elica convenzionale di base E1622 e sua derivata equivalente E1622-series. Sinistra: coefficiente di spinta al variare del coefficiente di avanzo. Destra: efficienza al variare del coefficiente di avanzo.

Per valutare la consistenza dei risultati ottenuti per le eliche di tale serie, a partire dalla condizione relativa alla E1622-series sono state investigate nello spazio delle dimensioni $Z, EAR, P/D|_{0.7R}$ l'influenza delle variabili, secondo uno schema detto a croce, ovvero lasciandone libera di variare solo una per volta, intorno alla configurazione di partenza. I risultati sono mostrati nelle seguenti figure A.2, A.3, A.4, A.5.

Lasciando libero di variare il numero di pale sono stati ottenuti i seguenti risultati mostrati in fig.A.2; le condizioni caratteristiche di tale prova sono: $EAR = 0.68, P/D = 0.98, J = 0.5$.

Lasciando libero di variare il rapporto di area espansa sono stati ottenuti i seguenti risultati mostrati in fig.A.3; le condizioni caratteristiche di tale prova sono: $Z = 4, P/D = 0.98, J = 0.5$.

Lasciando libero di variare il passo sono stati ottenuti i seguenti risultati mostrati in fig.A.4; le condizioni caratteristiche di tale prova sono: $Z = 4, EAR = 0.68, J = 0.5$.

Tale verifica parametrica è stata ripetuta variando contemporaneamente i valori relativi alle quattro variabili. I risultati sono mostrati nella figura A.5.

A.1.2 Eliche in configurazione intubata

Analogamente a quanto descritto per il propulsore in configurazione isolata, le medesime azioni sono state eseguite avendo come oggetto le stesse eliche in configurazione intubata. Il mantello di riferimento è simile per forma ai

¹secondo la definizione del coefficiente di avanzo $J = V_a / (nD)$

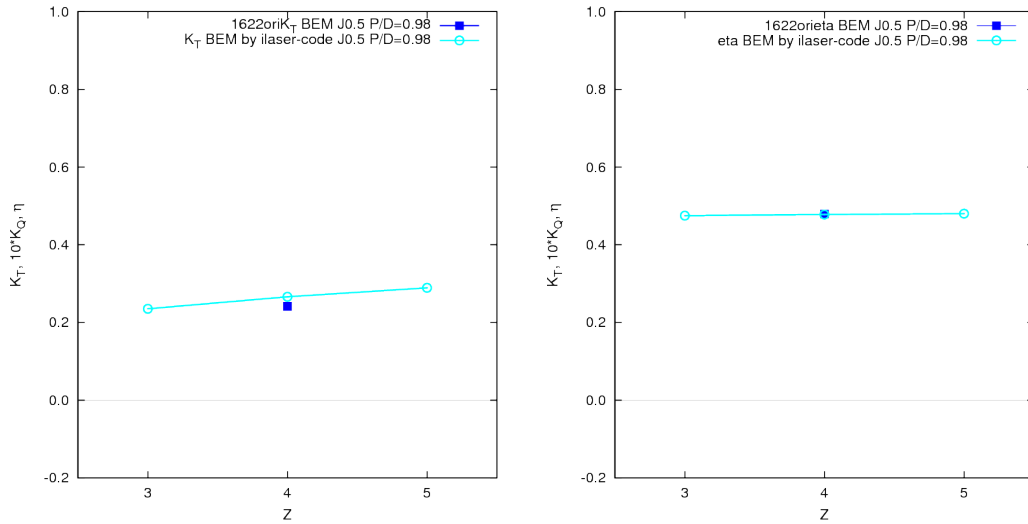


Figura A.2: Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione del numero di pale sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.

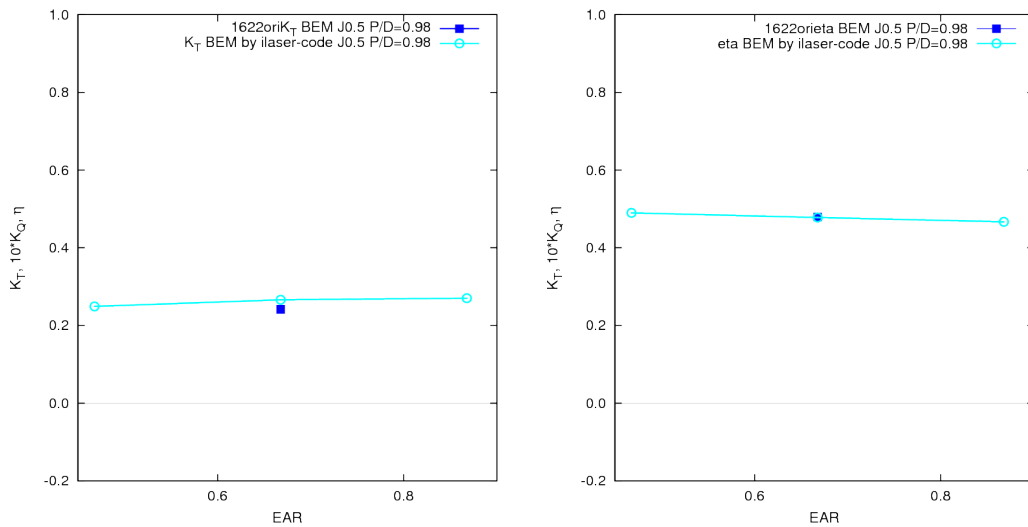


Figura A.3: Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione del rapporto di area espansa sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.

mantelli di tipo Wageningen 19A.

Per essa, le griglie geometriche di calcolo relative alle eliche rimangono le stesse, mentre per quanto riguarda le griglie del mantello, esse sono generate in modo automatico nel solutore aero/idrodinamico; in particolare, le linee nodali che si sviluppano secondo la direzione dettata dall'asse di rotazione, seguono le linee descritte dal tip palare e della relativa scia che si stacca dal bordo di uscita dell'elica, risultando elicoidi di rivoluzione.

Come già descritto nel paragrafo A.1.1, l'elica di partenza E1622 è stata messa a confronto con quella di base della

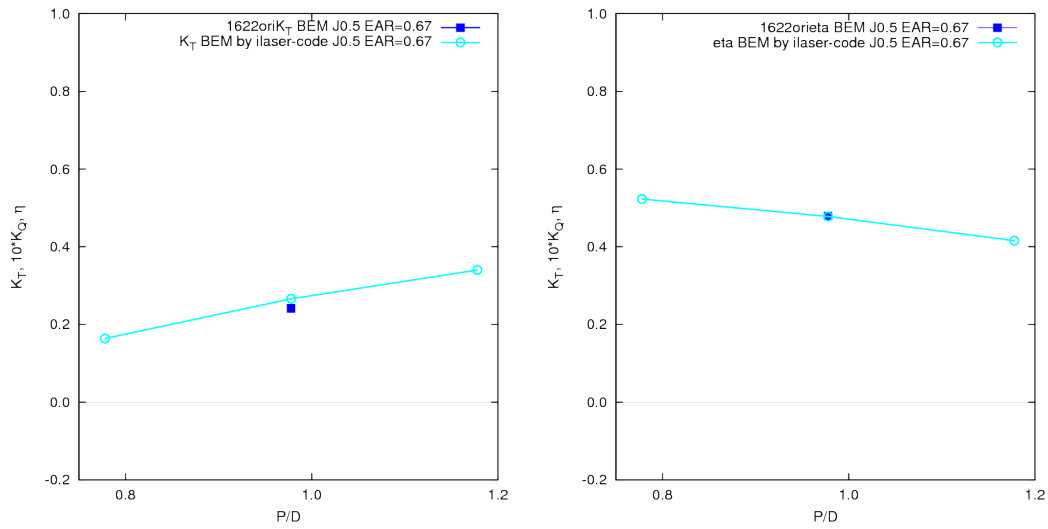


Figura A.4: Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione del passo sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.

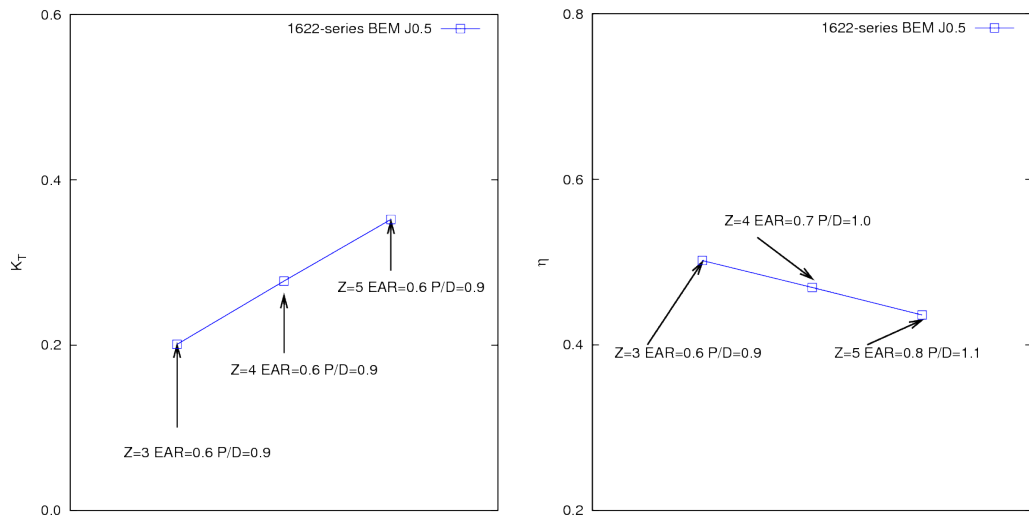


Figura A.5: Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione contemporanea del numero di pale, del rapporto di area espansa e del passo sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.

serie sistematica, considerando la configurazione intubata. I risultati del confronto sono mostrati nella fig.A.6: l'elica *E1622 – ser* mostra delle prestazioni leggermente inferiori alle basse velocità, sebbene tale deficienza sia bilanciata da una maggiore maggiore efficienza alle alte velocità, ottenuta ad un valore più elevato di velocità e/o ad un minor regime di funzionamento, ovvero con un elica di diametro minore².

Anche in questo caso, l'elica *E1622 – ser* risulta essere un buon punto di partenza per la ricerca di una soluzione

²secondo la definizione del coefficiente di avanzo $J = V_a/(nD)$

ottimizzata rispetto alla *E1622*.

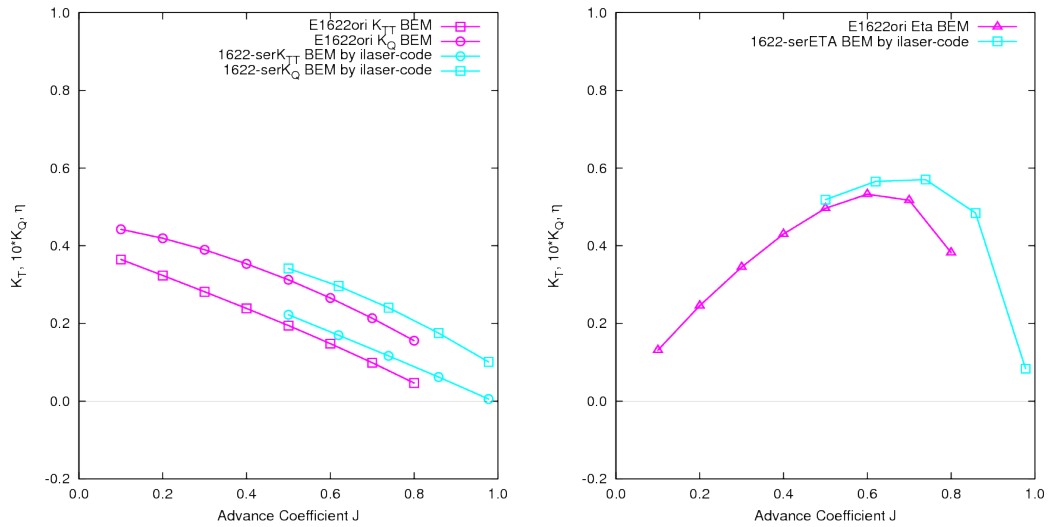


Figura A.6: Elica convenzionale di base E1622 e sua derivata equivalente E1622-series. Sinistra: coefficiente di spinta al variare del coefficiente di avanzo. Destra: efficienza al variare del coefficiente di avanzo.

Per valutare la consistenza dei risultati ottenuti per le eliche di tale serie, a partire dalla condizione relativa alla *E1622-ser* sono state investigate nello spazio delle dimensioni $Z, EAR, P/D|_{0.7R}$ l'influenza delle variabili, secondo uno schema detto a croce, ovvero lasciandone libera di variare solo una per volta, intorno alla configurazione di partenza. I risultati sono mostrati nelle seguenti figg. A.7, A.8, A.9 e A.5.

Lasciando libero di variare il numero di pale sono stati ottenuti i seguenti risultati mostrati in fig. A.7; le condizioni caratteristiche di tale prova sono: $EAR = 0.68, P/D = 0.98, J = 0.5$.

Lasciando libero di variare il rapporto di area espansa sono stati ottenuti i seguenti risultati mostrati in fig. A.3; le condizioni caratteristiche di tale prova sono: $Z = 4, P/D = 0.98, J = 0.5$.

Lasciando libero di variare il passo sono stati ottenuti i seguenti risultati mostrati in fig. A.9; le condizioni caratteristiche di tale prova sono: $Z = 4, EAR = 0.68, J = 0.5$.

Tale verifica parametrica è stata ripetuta variando contemporaneamente i valori relativi alle quattro variabili. I risultati sono mostrati nella fig. A.10.

Preliminarmente alla ottimizzazione di finitura del propulsore intorno ad un punto prossimo a quello identificato dalla ottimizzazione di base, è stata condotta una analisi di sensibilità sulle variabili di progetto di finitura.

Oggetto di tale analisi è stato lo studio dell'influenza sulle prestazioni del propulsore.

In particolare risulta investigata la soluzione nell'intorno del punto definito da:

- $Z = 5$;
- $P/D = 0.92$;

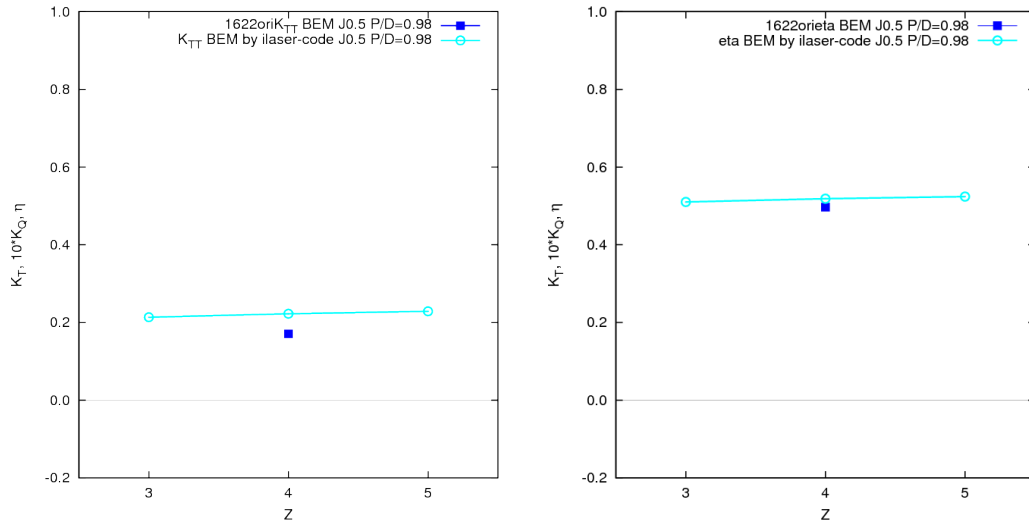


Figura A.7: Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione del numero di pale sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.

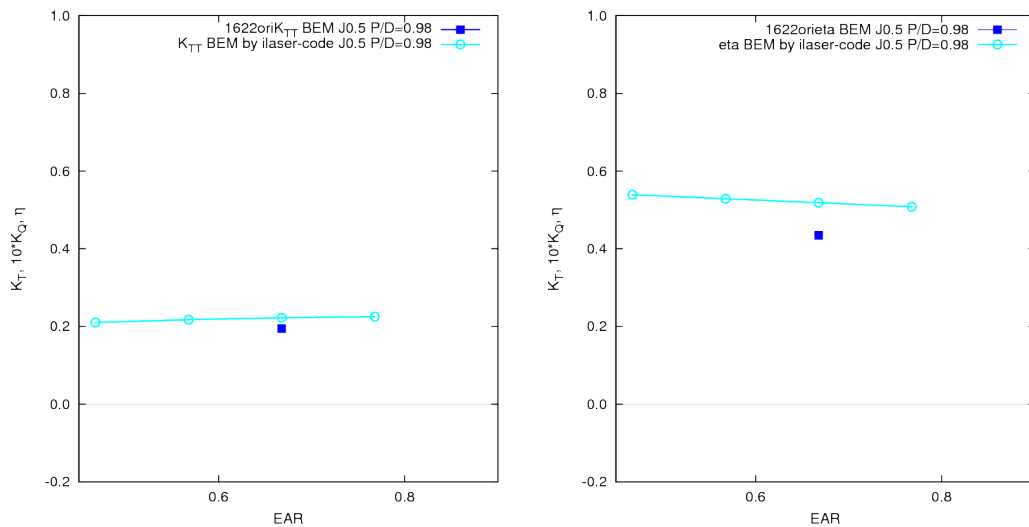


Figura A.8: Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione del rapporto di area espansa sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.

- $A_e/A_0 = 0.50$;
- $J = 0.52$.

La risposta del sistema è determinata su 5 punti per ogni variabile di progetto, corrispondenti a $(+ - 100, 50, 0\% \Delta g(r))$ (par. 5.3), per un totale di 125 punti, utili ai fini dell'addestramento della rete neurale.

Di seguito vengono mostrati i risultati relativi all'influenza sulle prestazioni del propulsore ad opera di una variazione della distribuzione di:

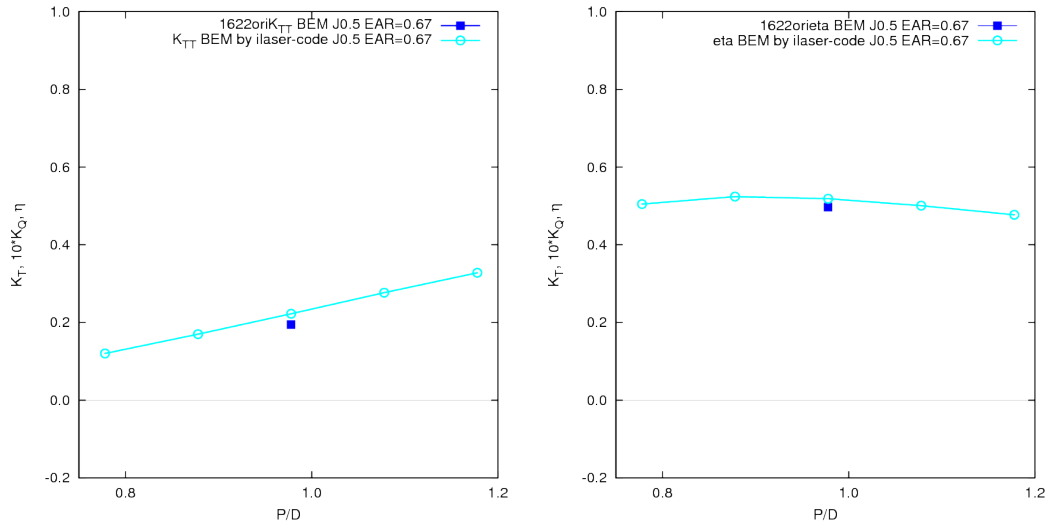


Figura A.9: Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione del passo sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.

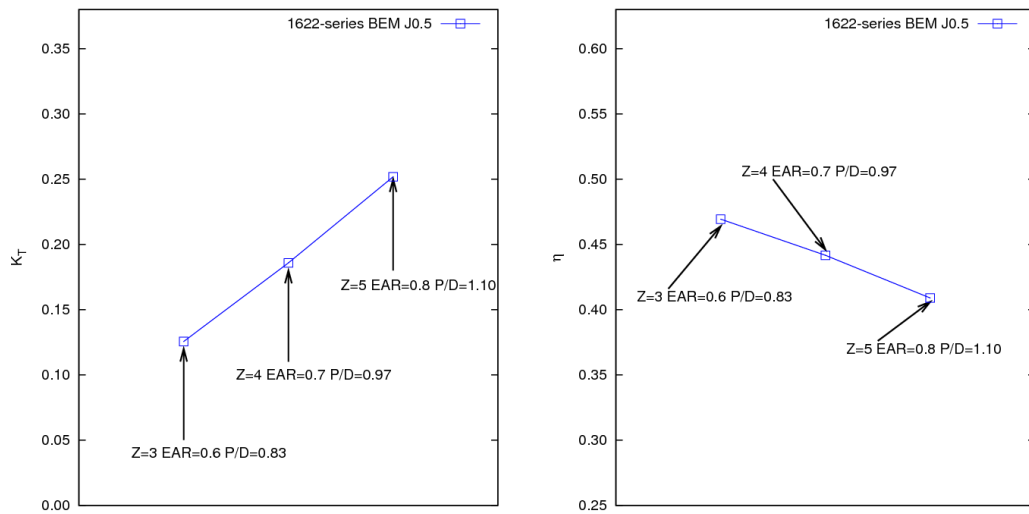


Figura A.10: Elica convenzionale di base E1622-series. Effetto di una variazione contemporanea del numero di pale, del coefficiente dui area espansa e del passo sulle prestazioni. Sinistra: coefficiente di spinta. Destra: efficienza.

- passo (fig. A.11)
- corda (fig. A.12)
- skew (fig. A.13)
- camber massimo (fig. A.14)
- rake (fig. A.15)

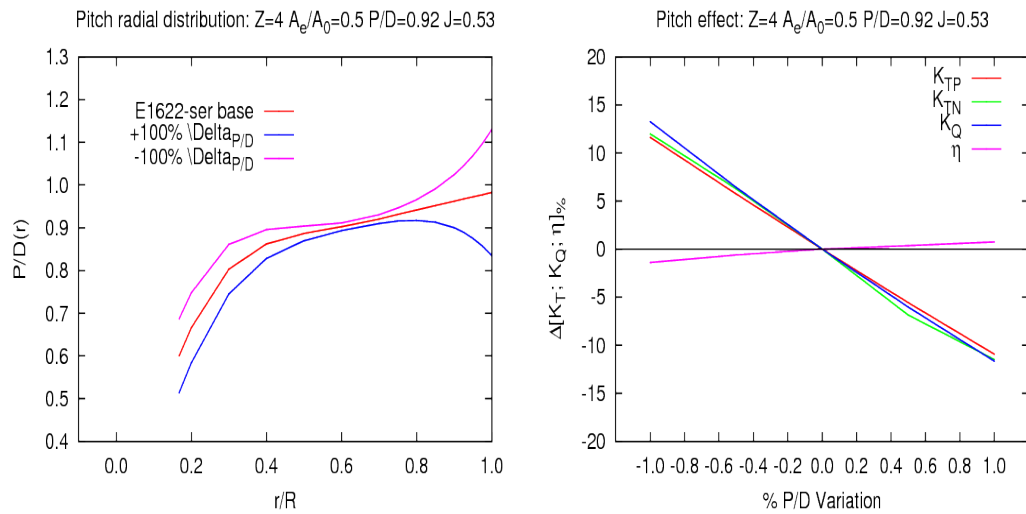


Figura A.11: Analisi di sensibilità condotta nell'intorno di un punto rappresentativo di un'elica intubata della famiglia *E1622 – ser*. Effetto di una perturbazione del passo. Sinistra: andamento delle diverse distribuzioni radiali di passo; Destra: effetto delle differenti distribuzioni sulle prestazioni del propulsore intubato.

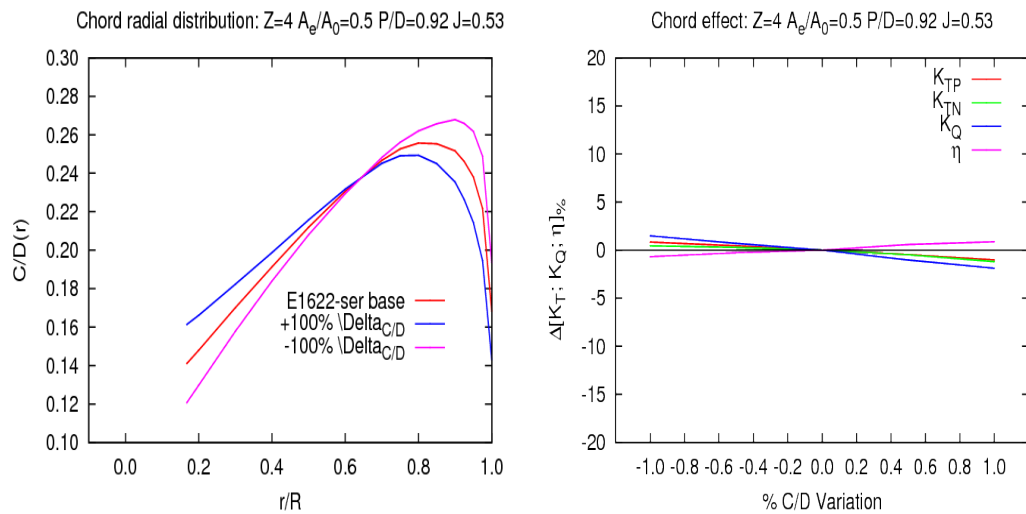


Figura A.12: Analisi di sensibilità condotta nell'intorno di un punto rappresentativo di un'elica intubata della famiglia *E1622 – ser*. Effetto di una perturbazione sulla corda. Sinistra: andamento delle diverse distribuzioni radiali di corda; Destra: effetto delle differenti distribuzioni sulle prestazioni del propulsore intubato.

I risultati ottenuti mostrano che si può ridurre la ricerca dell'ottimo nello spazio delle variabili depurato della variabile camber (f_{MAX}) e definito da una particolare combinazione delle variabili di corda e di skew (C/D e Sk/D); per queste ultime, infatti, sono state considerate due condizioni. Prese a riferimento le figure A.16 sono state confrontate le soluzioni afferenti a valori di ugual segno (curve a medesimo colore) e di segno opposto (curve con ugual tipo di punti).

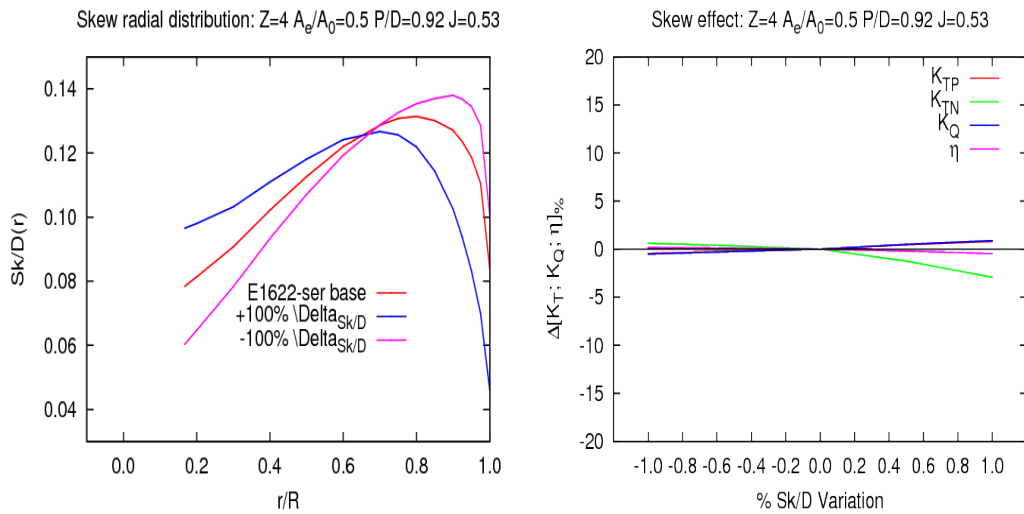


Figura A.13: Analisi di sensibilità condotta nell'intorno di un punto rappresentativo di un'elica intubata della famiglia *E1622 – ser*. Effetto di una perturbazione dello skew. Sinistra: andamento delle diverse distribuzioni radiali di skew; Destra: effetto delle differenti distribuzioni sulle prestazioni del propulsore intubato.

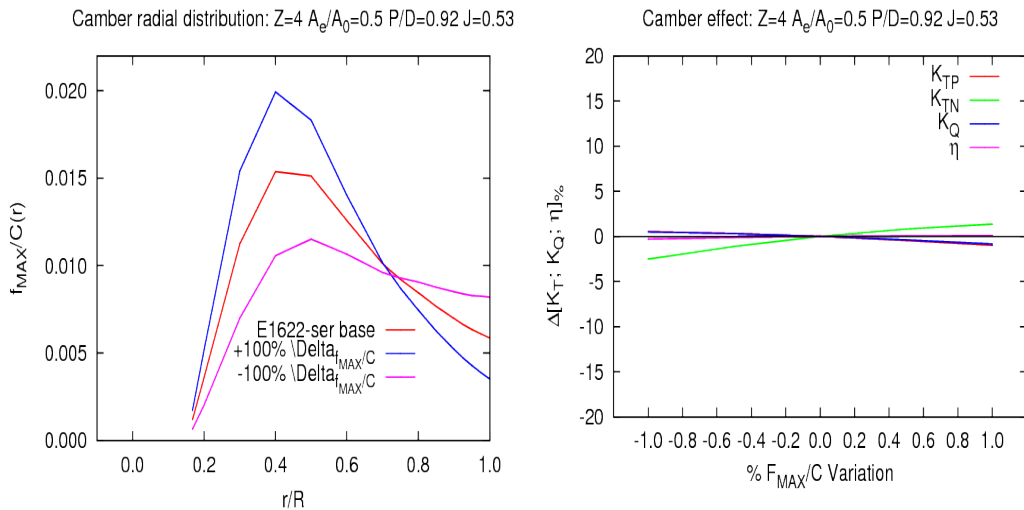


Figura A.14: Analisi di sensibilità condotta nell'intorno di un punto rappresentativo di un'elica intubata della famiglia *E1622 – ser*. Effetto di una perturbazione del camber. Sinistra: andamento delle diverse distribuzioni radiali di curvatura delle sezioni; Destra: effetto delle differenti distribuzioni sulle prestazioni del propulsore intubato.

In fig. A.17 sono mostrati i risultati per le due tipologie di configurazioni.

In virtù della loro maggior influenza sulle prestazioni del propulsore, le geometrie caratterizzate da valori discordi di perturbazione delle variabili di corda e skew sono state selezionate per la generazione del dataset generalizzato ad uso dell'ottimizzatore.

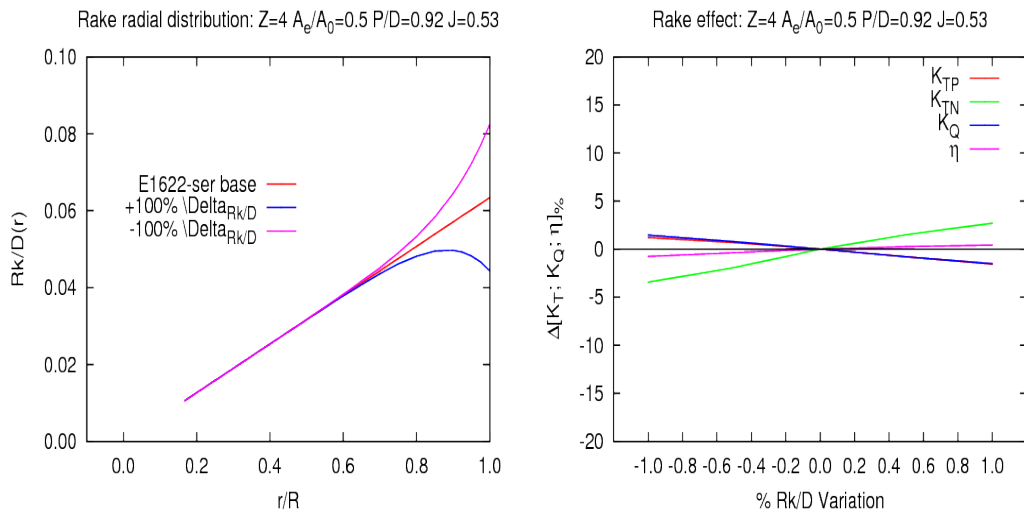


Figura A.15: Analisi di sensibilità condotta nell'intorno di un punto rappresentativo di un'elica intubata della famiglia *E1622 – ser*. Effetto di una perturbazione del rake. Sinistra: andamento delle diverse distribuzioni radiali di abbattimento; Destra: effetto delle differenti distribuzioni sulle prestazioni del propulsore intubato.

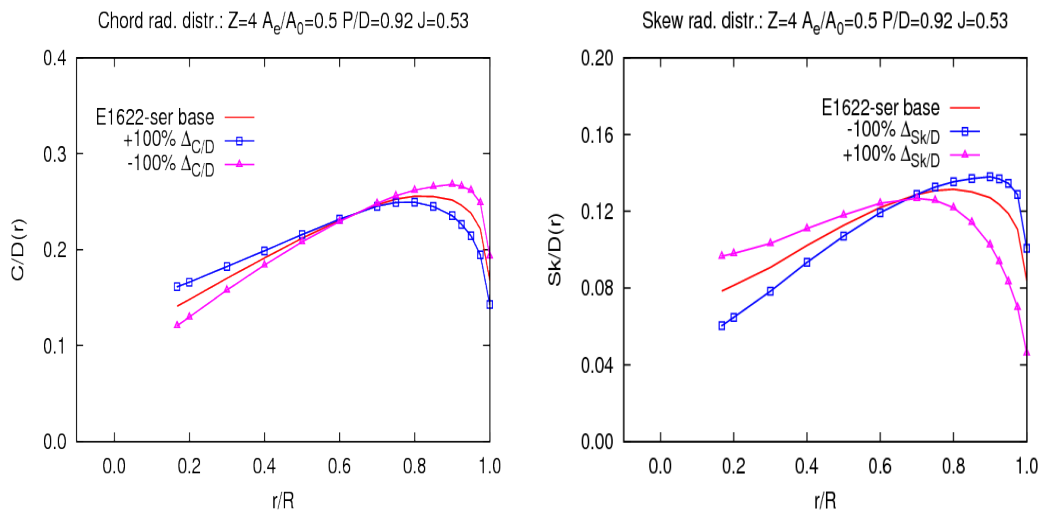


Figura A.16: Analisi di sensibilità condotta nell'intorno di un punto rappresentativo di un'elica intubata della famiglia *E1622 – ser*. Effetto di una perturbazione della corda e dello skew. Sinistra: andamento delle diverse distribuzioni radiali di corda; Destra: andamento delle diverse distribuzioni radiali di skew.

In conclusione, le variabili del sistema sono:

- perturbazione sulla distribuzione di passo;
- perturbazione sulla distribuzione combinata di corda/skew;
- perturbazione sulla distribuzione di rake.

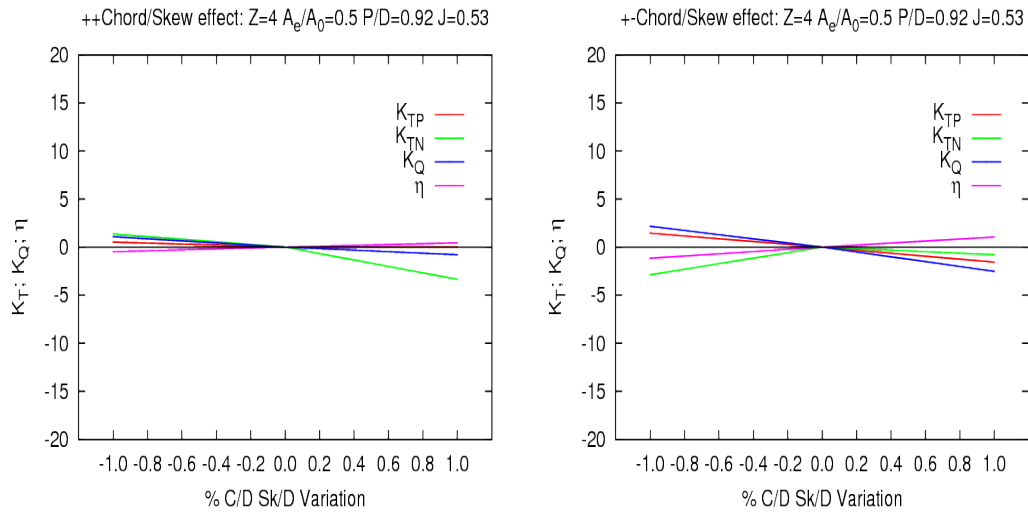


Figura A.17: Analisi di sensibilità condotta nell'intorno di un punto rappresentativo di un'elica intubata della famiglia *E1622 – ser.* Effetto di una perturbazione del rake. Sinistra: analisi con uguale segno di perturbazione corda/skew; Destra: analisi con segno discorde di perturbazione di corda/skew.

Lo spazio delle variabili è stato discretizzato considerando cinque valori per ognuna delle variabili enunciate. La matrice dei casi risulta quindi definita da un totale di 125 punti ($5^{N_{IN}}$), che rappresentano la risposta del sistema nell'intorno del punto ottimo trovato mediante l'uso del modello parametrico.

Mediante l'uso del modello parametrico è stata dapprima investigata l'influenza dei parametri di passo, corda (e conseguentemente skew, ad essa legata univocamente) e rake, avendo posto nulla la modifica della distribuzione radiale del camber massimo. In fig. A.18 viene mostrata la superficie di risposta del sistema così come viene ricostruita mediante una rete neurale correttamente addestrata (residuo dell'ordine del 10^{-7}).

Mentre la funzione obiettivo identificata dall'efficienza mostra tendenza monotona nei riguardi della corda e del rake, diverso è il suo comportamento nei riguardi del passo; tale influenza è stata investigata ulteriormente avendo circoscritto l'analisi al caso relativo a $\Delta Ch/D = +100\% = -\Delta Sk/D$ e $\Delta Rk/D = +100\%$.

La soluzione ottima è stata quindi identificata con una variazione del passo pari a $\Delta P/D = +5\%$.

A.2 Altri risultati di ottimizzazione di base

Nel seguito vengono mostrati i risultati relativi all'ottimizzazione di base per i casi descritti nella tab.5.1 e non mostrati nel cap.5.

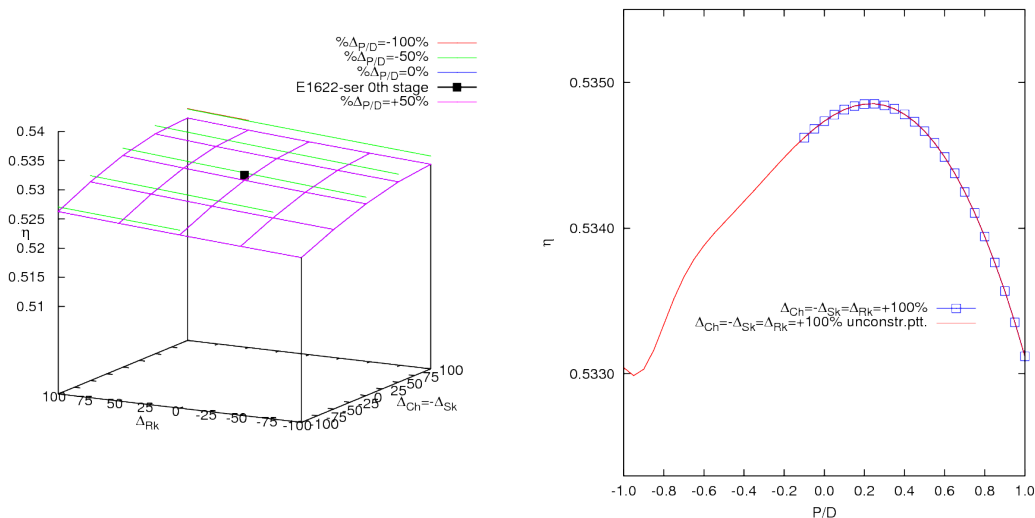


Figura A.18: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche intubate della famiglia *E1622 – Series*, nell'intorno della configurazione scelta a riferimento per la verifica dell'algoritmo dedicato all'ottimizzazione di finitura. Risultati ottenuti su base dati numerica riguardanti la condizione di flusso libero. Sinistra: efficienza al variare della modifica su corda (skew) e rake, parametrizzata rispetto al passo.; Destra: efficienza al variare del passo.

A.2.1 Elica della famiglia Wageningen B-series in configurazione isolata

In tale paragrafo sono mostrati i risultati dell'ottimizzazione basata sulla ricerca della soluzione tra le eliche appartenenti alla famiglia delle eliche convenzionali isolate denominate Wageningen B-series.

La ricerca del set di parametri geometrici/operativi che massimizza l'efficienza idrodinamica del propulsore è avvenuta nel dominio delle variabili geometrico/operative globali (Z , A_e/A_0 , P/D , V , D) e descritto nella tab. 3.1.

Un duplice esercizio è stato svolto, considerando, per la costruzione della serie sistematica virtuale, l'uso di dati:

- sperimentali
- numerici, basati su modello BEM per rotore in flusso isolato, uniforme, non cavitante

Il modello di ricerca dell'ottimo fa uso di una sola rete neurale addestrata per l'intero dataset disponibile, come da fig. A.19.

Nelle figg.(A.20), (A.21), (A.21) sono mostrate le caratteristiche dei risultati ottenuti in termini di valori assunti dalle variabili di design.

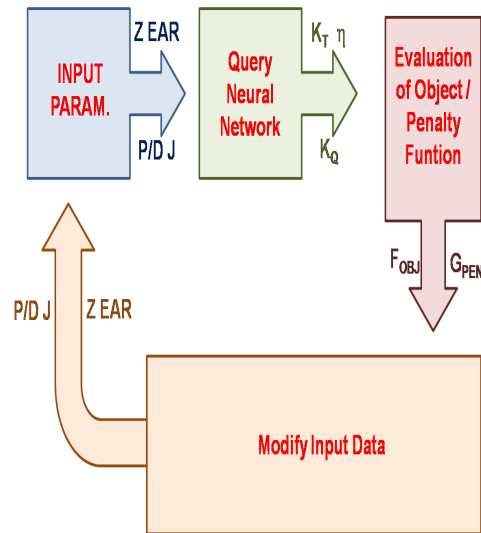


Figura A.19: Schema risolutivo di ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche convenzionali della famiglia Wageningen $B - Series$.

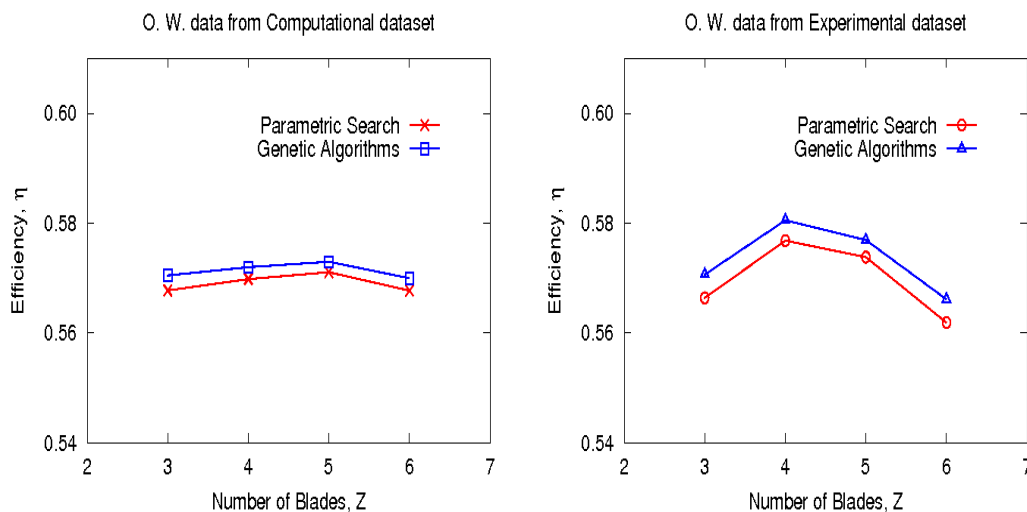


Figura A.20: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche convenzionali della famiglia Wageningen $B - Series$. Andamento dell'efficienza ottima al variare del numero di pale. Sinistra: risultati ottenuti su base dati numerica. Destra: risultati ottenuti su base dati sperimentale.

A.2.2 Elica della serie Wageningen Ka in configurazione intubata

In questo paragrafo come nel successivo (par. A.2.3) viene affrontato l'esercizio di ottimizzazione di base per eliche in configurazione intubata.

La ricerca della soluzione avviene modificando il valore del solo parametro P/D di passo.

Il modello di ricerca dell'ottimo fa uso di una doppia rete neurale: una dedicata alla simulazione delle caratteristiche

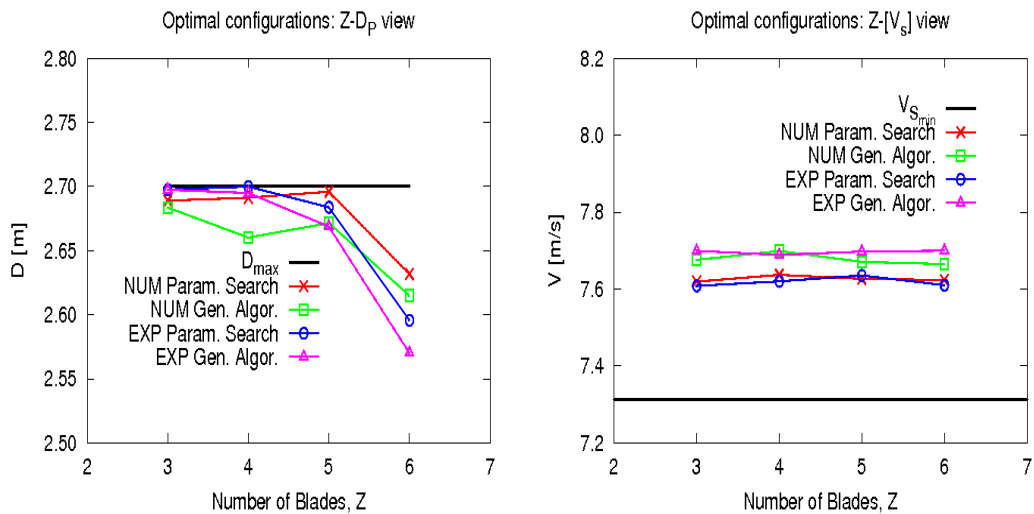


Figura A.21: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche convenzionali della famiglia Wageningen $B - Series$. Sinistra: Andamento del diametro ottimo al variare del numero di pale. Destra: Andamento della velocità nave al variare del numero di pale.

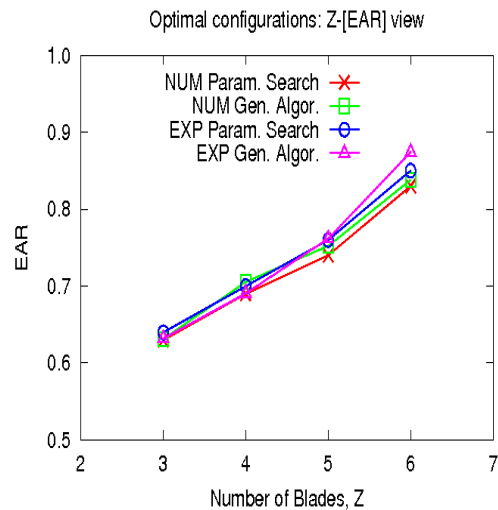


Figura A.22: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche convenzionali della famiglia Wageningen $B - Series$. Rapporto di area espansa al variare del numero di pale.

dell'elica in mantello, una per quelle del mantello, come mostrato in fig. A.23.

Ciò è stato reso necessario per la cattiva predizione del contributo mantello alla spinta totale da parte del modello idrodinamico usato e la contemporanea evidenza sperimentale secondo la quale tale contributo è principalmente governato dal valore che assume il passo dell'elica.

In questo caso, il modello considerato è quindi ibrido: ad un contributo di spinta elica predetto numericamente viene

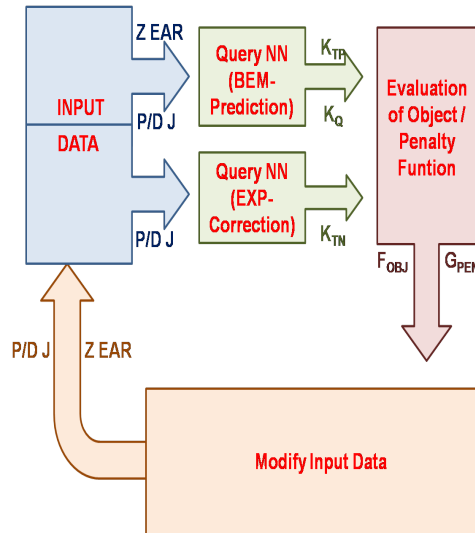


Figura A.23: Schema risolutivo di ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche in mantello mediante l'uso di una doppia rete neurale.

sommato un contributo che viene da dati sperimentali (contributi mantello alla spinta disponibili per vari valori del parametro P/D relativo all'elica).

Nelle figg. A.24 e A.25 sono mostrate le caratteristiche dei risultati ottenuti in termini di valori assunti dalle variabili di design.

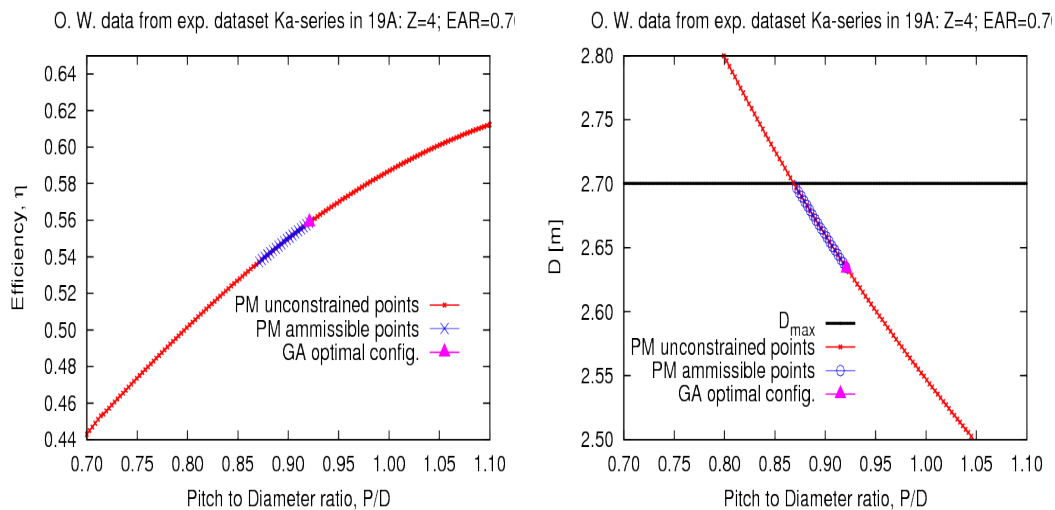


Figura A.24: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche in mantello della famiglia Wageningen $K_a - Series4 - 070$ in duct 19A. Sinistra: Andamento dell'efficienza al variare del rapporto P/D . Destra: Andamento del diametro ottimo al variare del rapporto P/D .

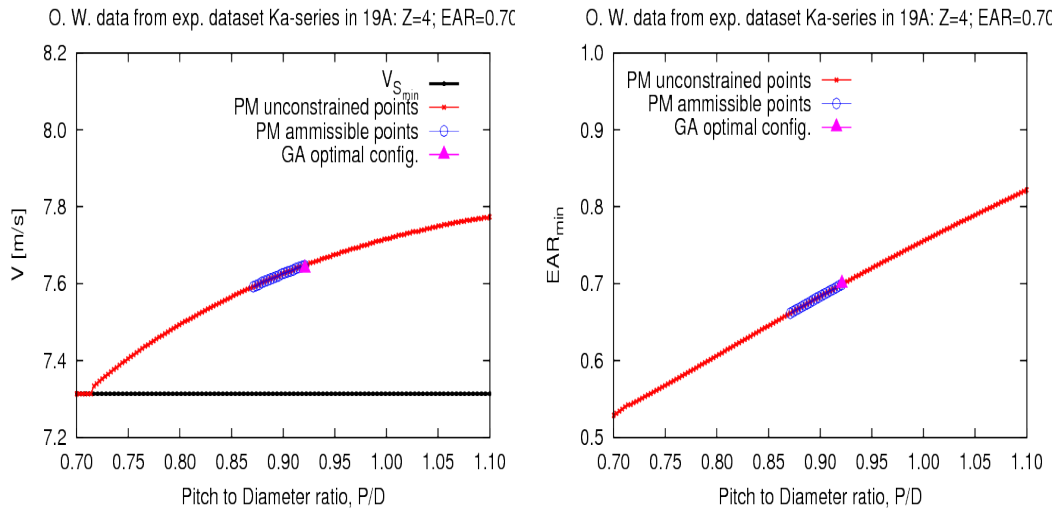


Figura A.25: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche in mantello della famiglia Wageningen $K_a - Series$ in duct 19A. Sinistra: Andamento della velocità nave al variare del rapporto P/D . Destra: Andamento del rapporto di area espansa al variare del rapporto P/D .

A.2.3 Elica della famiglia $E1622-ser$ in configurazione intubata: base dati numerico-sperimentali

In questo caso, data la mancanza di dati sperimentali tali da poter ripetere l'esercizio svolto al punto precedente, è stata utilizzata una congettura, secondo la quale, la variazione di prestazioni del mantello predette dal BEM al variare del valore che assume il passo sia meno dissimile dal rispettivo sperimentale che non la grandezza stessa. In altre parole, si evidenzia che:

$$K_{TNBEM}(P/D) \neq K_{TNEXP}(P/D)$$

$$\Delta[K_{TNBEM}(P/D) - K_{TNBEM}(P/D)_0] \approx \Delta[K_{TNEXP}(P/D) - K_{TNEXP}(P/D)_0]$$

da cui si assume:

$$K_{TN}(P/D) = K_{TNEXP}(P/D)_0 + \Delta[K_{TNBEM}(P/D) - K_{TNBEM}(P/D)_0]$$

Un duplice esercizio è stato svolto, considerando, per le prestazioni dell'elica K_{TP} , dati:

- sperimentali
- numerici, basati su modello BEM per rotore in flusso confinato da mantello, uniforme, non cavitante

Nelle figg. A.26 e A.27 sono mostrate le caratteristiche dei risultati ottenuti in termini di valori assunti dalle variabili di design.

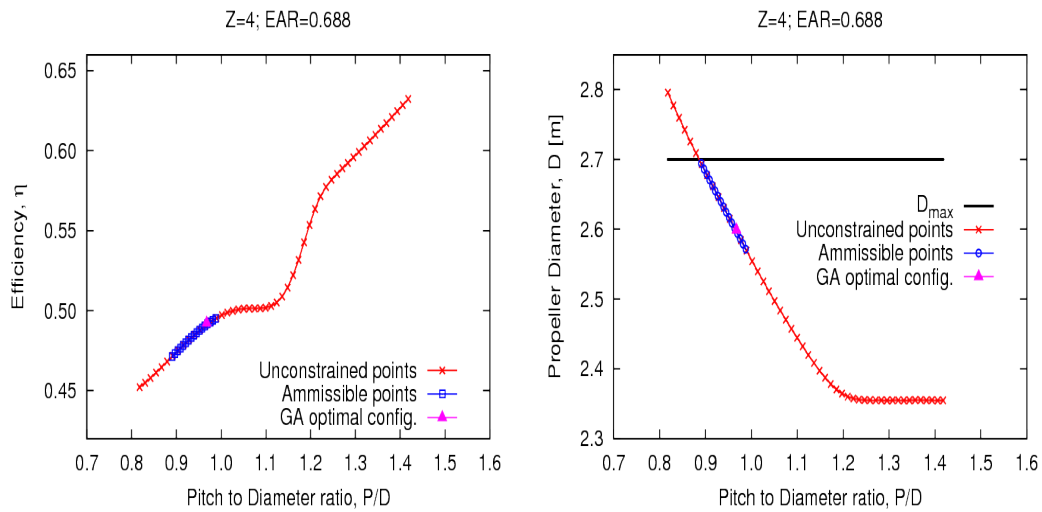


Figura A.26: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche in mantello simili alla CNR-INSEAN E1622. Soluzione puramente numerica. Sinistra: Andamento dell'efficienza al variare del rapporto P/D . Destra: Andamento del diametro ottimo al variare del rapporto P/D .

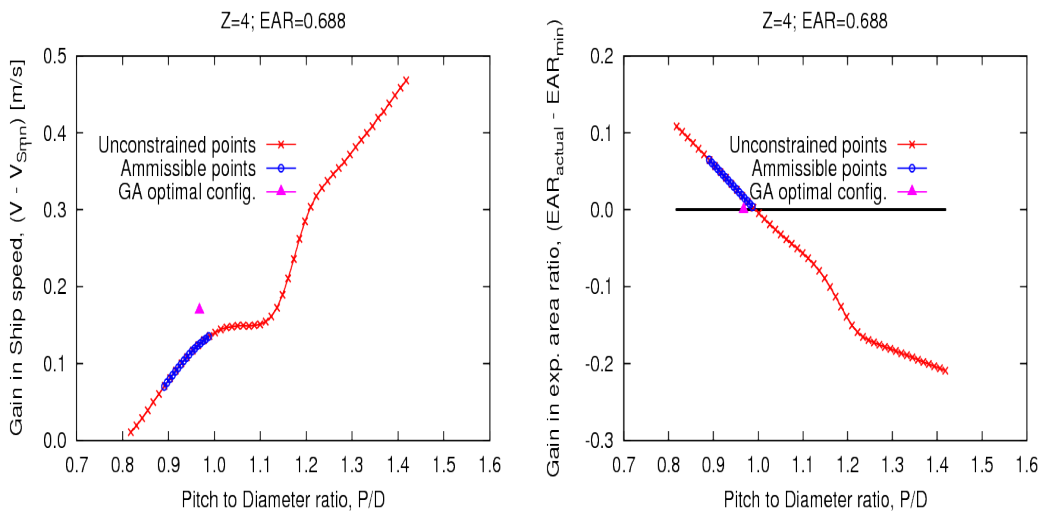


Figura A.27: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche in mantello simili alla CNR-INSEAN E1622. Soluzione puramente numerica. Sinistra: Andamento della velocità nave al variare del rapporto P/D . Destra: Andamento del rapporto di area espansa al variare del rapporto P/D .

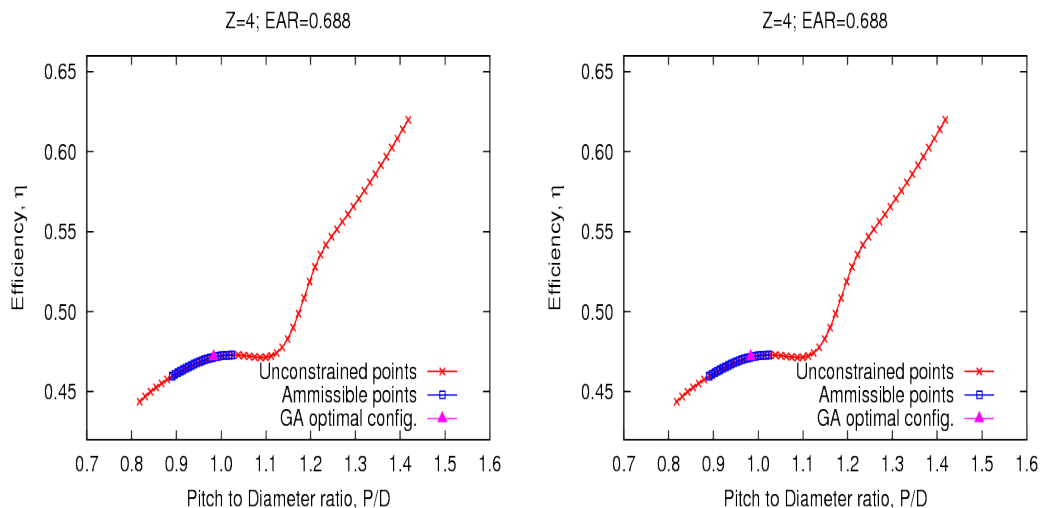


Figura A.28: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche in mantello simili alla CNR-INSEAN E1622. Soluzione ibrida numerico-sperimentale. Sinistra: Andamento dell'efficienza al variare del rapporto P/D . Destra: Andamento del diametro ottimo al variare del rapporto P/D .

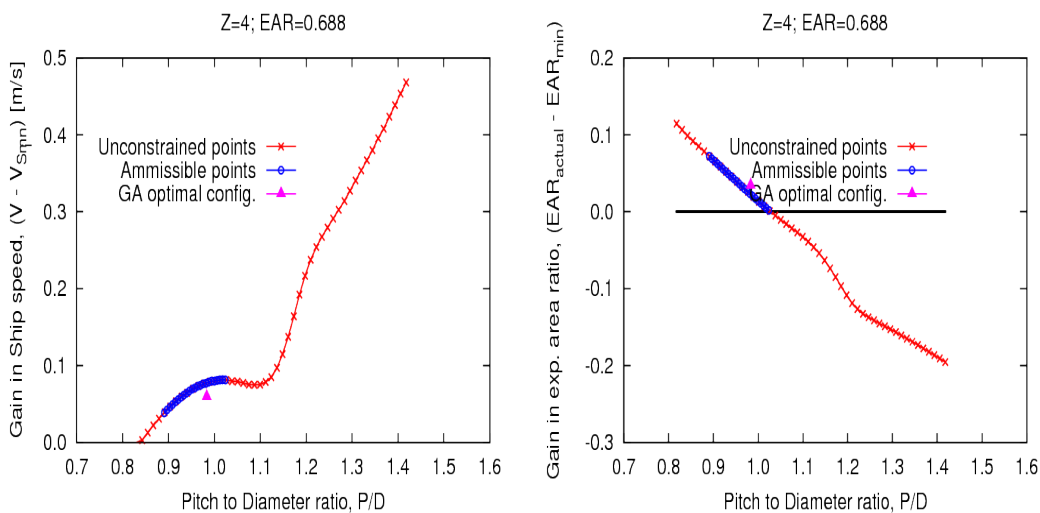


Figura A.29: Ottimizzazione di un'elica di un peschereccio in corsa libera, investigando la soluzione tra le eliche in mantello simili alla CNR-INSEAN E1622. Soluzione ibrida numerico-sperimentale. Sinistra: Andamento della velocità nave al variare del rapporto P/D . Destra: Andamento del rapporto di area espansa al variare del rapporto P/D .

Appendice B

Rete Neurale

Qui viene inserito il calcolo dell'errore associato ai singoli neuroni mediante tecnica di backpropagation, utile per la determinazione del gradiente dell'errore rispetto alle connessioni sinaptiche della rete neurale.

Vengono inoltre presentati i risultati della fase di verifica che, per chiarezza di esposizione, non sono stati presentati nel par.3.4.

B.1 Calcolo dell'errore sul singolo neurone: tecnica di back-propagation

Il calcolo del gradiente dell'errore commesso dalla rete rispetto alle singole connessioni sinaptiche $\frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}} = \delta_j^{(l+1)} Z_i^l$ tra il neurone $N_j^{(l+1)}$ appartenente allo strato $(l + 1)$ ed il neurone N_i^l appartenente allo strato l e definita in 3.5 presuppone il calcolo delle uscite dei singoli neuroni z_i^l associata al neurone $N_j^{(l+1)}$.

Per completezza si riportano gli estremi di variabilità dei singoli indici qui menzionati:

- p , associato all'errore sul dato p -esimo di addestramento: $1 \leq p \leq P$, con P pari al numero totale dei dati utili per l'addestramento
- l , associato allo strato nascosto l -esimo: $1 \leq l \leq L$, con L pari al numero totale di strati nascosti
- i (o j), associato al neurone i -esimo del generico strato nascosto: $1 \leq i(oj) \leq N_{(NEUR+1)}$; con l'indice $(NEUR + 1)$ si indica il neurone di soglia tale per cui risulta $Z_{(NEUR+1)} = -1$

Per quanto concerne il calcolo del termine $\delta_j^{(l+1)}$ bisogna distinguere se il neurone appartiene: A) allo strato di uscita $(L + 1)$; B) al generico strato nascosto l .

Nel primo dei due casi, ricordando la definizione di $\delta_k = \frac{\partial E_p}{\partial a_k}$, con a_k valore di attivazione del neurone k -esimo dello strato di uscita ($1 \leq k \leq N_{OUT}$ e la relazione tra il valore di attivazione e l'uscita del neurone (che in questo caso coincide con l'uscita della rete) $y_k = g(a_k)$ (per g vedasi il par. 3.2) si ha:

$$\frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial E_p}{\partial y_k} \frac{\partial y_k}{\partial a_k} = \frac{\partial E_p}{\partial y_k} g'(a_k) \quad (\text{B.1})$$

con $\frac{\partial y_k}{\partial a_k}$ calcolabile analiticamente a partire dall'espressione data in 3.1 applicata all'uscita della rete, mentre $g'(a_k)$ è la derivata prima della funzione sigmoideale calcolata in a_k (vedasi eq. 3.2).

Nel caso in cui il neurone appartenga al generico strato nascosto l , si può legare il calcolo della grandezza in esame ai neuroni dello strato successivo che ricevono l'input dal neurone in esame j :

$$\delta_j^{(l+1)} = \frac{\partial E_p}{\partial a_j^{(l+1)}} = \sum_{k=1}^{N^{(l+2)}} \frac{\partial E_p}{\partial a_k^{(l+2)}} \frac{\partial a_k^{(l+2)}}{\partial a_j^{(l+1)}} = \sum_{k=1}^{N^{(l+2)}} \delta_k^{(l+2)} \frac{\partial a_k^{(l+2)}}{\partial a_j^{(l+1)}} \quad (\text{B.2})$$

con $N^{(l+2)}$ pari a:

- N_{OUT} se $(l+2) = (L+1)$
- N_{NEUR} se $(l+2) \leq L$

Il valore di attivazione $a_k^{(l+2)}$ del neurone k -esimo dello strato successivo $(l+2)$ è legato al valore di attivazione $a_j^{(l+1)}$ relativo al j -esimo neurone dello strato $(l+1)$ per il solo tramite del peso della connessione w_{kj} tra i due neuroni in esame (vedasi eq. 3.1); risulta quindi:

$$\frac{\partial a_k^{(l+2)}}{\partial a_j^{(l+1)}} = g'(a_j^{(l+1)}) w_{kj}$$

Inserendo nell'eq. B.2, l'espressione che assume l'errore associato al generico neurone appartenente al generico strato nascosto è la seguente:

$$\delta_j^{(l+1)} = g'(a_j^{(l+1)}) \sum_{k=1}^{N^{(l+2)}} \delta_k^{(l+2)} w_{kj} \quad (\text{B.3})$$

Il calcolo dei termini δ_j deve avvenire necessariamente a partire dallo strato di uscita, a ritroso verso lo strato di ingresso alla rete neurale.

Da qui risulta il termine utilizzato comunemente per definire la tecnica con cui viene calcolato il gradiente dell'errore della rete neurale, *back-propagation*.

B.2 Verifica delle prestazioni della rete neurale

I risultati della verifica relativi al test-case Wageningen descritto nel par.3.4 sono presentati di seguito.

Essi fanno riferimento agli item esposti sinteticamente in 3.4.1, esclusi quelli di cui al punto D del par. 3.4.1, e proposti qui per facilitare la comprensione.

- (3.4.1)
- fissati Z ed A_e/A_0 , verificata la capacità della rete di simulare l'effetto di P/D e J sulle grandezze di uscita; l'intero dataset è stato utilizzato per la fase di addestramento (par. B.2.1)
- fissato Z , verificata la capacità della rete di simulare l'effetto di A_e/A_0 , P/D e J sulle grandezze di uscita; l'intero dataset è stato utilizzato per la fase di addestramento (par. B.2.2)
- caso $Z = 4$ con, rispetto alla grandezza J , metà punti usati per l'addestramento e metà per la validazione e viceversa; i risultati sono stati confrontati con quelli precedentemente ottenuti con tutto il set di dati usati per l'addestramento (par. B.2.3)
- caso completo rispetto alle variabili Z , A_e/A_0 , P/D e J con, rispetto alla grandezza J , metà punti usati per l'addestramento e metà per la validazione: performati due casi a seconda della destinazione d'uso dei due dataset (par. 3.4.1)
- verifica dell'influenza del numero di punti disponibili per l'addestramento sulla capacità della rete di essere addestrata e di simulare le grandezze di output: per il caso $Z = 4$, viene valutata l'influenza del parametro A_e/A_0 , che presenta 5 punti: 0.40, 0.55, 0.70, 0.85, 1.00. Sono stati considerati tre sottocasi, togliendo, dal set completo di addestramento i dati relativi a:
 - 0.70 ottenuto dal dataset completo togliendo i dati relativi al punto centrale, creando una finestra la cui estensione è pari al 50% del dominio; verifica della capacità interpolativa della rete (par. B.2.4)
 - 0.55 e 0.85 ottenuto in analogia al precedente punto togliendo tali due punti e creando altrettante finestre la cui estensione è pari al 50% del dominio; verifica della capacità interpolativa della rete (par. B.2.4)
 - 1.00 ottenuto togliendo un punto distante il 33% dell'ampiezza del dominio restante dal punto più vicino, verificando la capacità estrapolativa della rete (par. B.2.4)
- verifica dell'influenza dei parametri caratteristici dell'architettura della rete: numero di strati nascosti e numero di neuroni per singolo strato; test ottenuto per il caso $Z = 4$; analisi dell'influenza del numero di neuroni per strato e del numero di strati minimi da usare per ottenere un dato errore (par. B.2.5)
- verifica della capacità della rete di ottenere soluzione aggiungendo punti al set di addestramento e contemporanea comparazione rispetto al caso completo, in termini di tempo impiegato ad ottenere la soluzione; caso $Z = 4$ con metà punti di addestramento su J (par. B.2.6): confronto tra:
 - caso completo: pesi connessioni inizializzati random
 - caso incompleto dei dati relativi ad $A_e/A_0 = 0.7$ e $P/D = 1.00$ con pesi inizializzati random; restart del caso completato dei dati mancanti con pesi inizializzati al valore a convergenza del precedente caso

- verifica della convergenza su un caso particolare come il B6, per il quale sono presenti errori localizzati e non distribuiti relativi a $A_e/A_0 = 0.95$ e $P/D = 1.2, 1.3$ (par. B.2.7). Risultati ottenuti con:
 - restart.
 - incrementando il numero di neuroni per singolo strato nascosto

Più in dettaglio, i risultati dei suddetti punti vengono mostrati: di questi, solo i risultati relativi a due dei tre segnali di uscita della rete, K_T ed η , poichè il K_Q risulta essere dello stesso tipo del K_T , sia in termini di segnale da riprodurre che in termini di risposta della rete.

Per i dettagli sulle variabili del test-case vedasi la tab. 3.1.

B.2.1 influenza del numero di variabili di input sulle prestazioni della rete: P/D e J

Rispetto all'intero dataset delle eliche della serie Wageningen, considerata una rete neurale addestrata con dati relativi alla sottofamiglia $Z = 4$, $A_e/A_0 = 0.40$, i risultati ottenuti in termini di spinta (K_T) ed efficienza (η) sono di seguito mostrati; le curve sono parametrizzate in funzione del valore del passo nominale $P/D = 0.5 - 1.4$ con passo incrementale pari a 0.1 (figg.B.1, B.2, B.3):

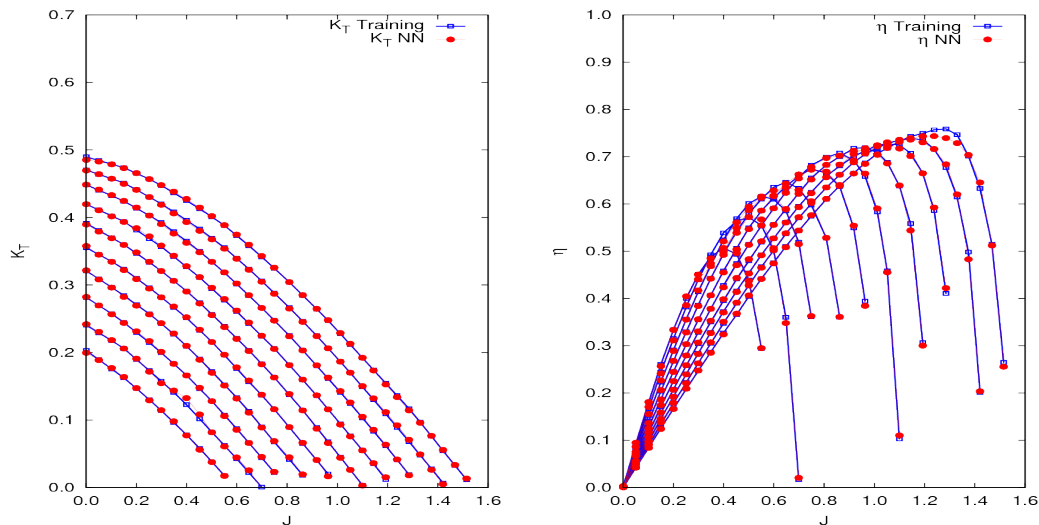


Figura B.1: Caso $Z = 4$; $A_e/A_0 = 0.40$. Verifica risultati NN: vista 2D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.

Tali risultati sono stati ottenuti analogamente per reti addestrate considerando tutte le restanti sottofamiglie caratterizzate da valori fissati per i parametri Z ed A_e/A_0 (vedi tab. 3.1).

B.2.2 influenza del numero di variabili di input sulle prestazioni della rete: EAR , P/D e J

Considerata la famiglia delle eliche tripala, $Z = 3$, presi ad esempio i risultati ottenuti per la sottofamiglia corrispondente al rapporto $A_e/A_0 = 0.50$, i risultati, come per il precedente punto, sono di seguito mostrati (figg.B.4, B.5,

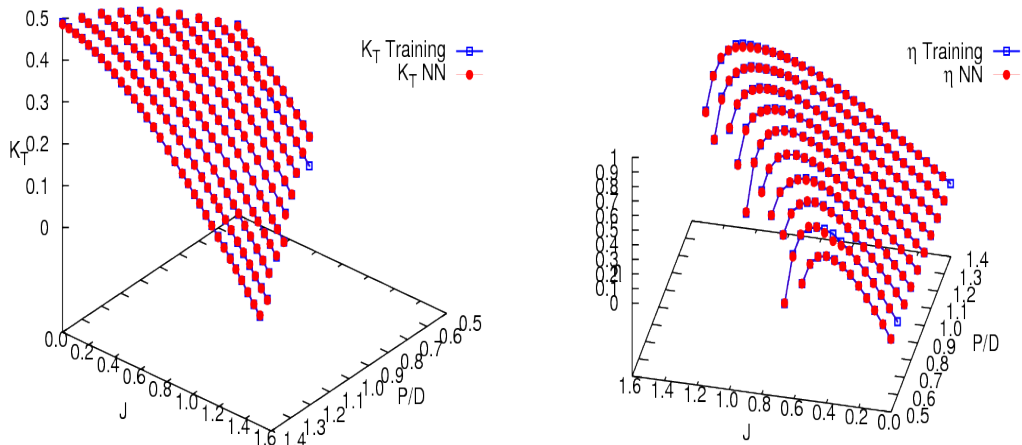


Figura B.2: Caso $Z = 4$; $A_e/A_0 = 0.40$. Verifica risultati NN: vista 3D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.

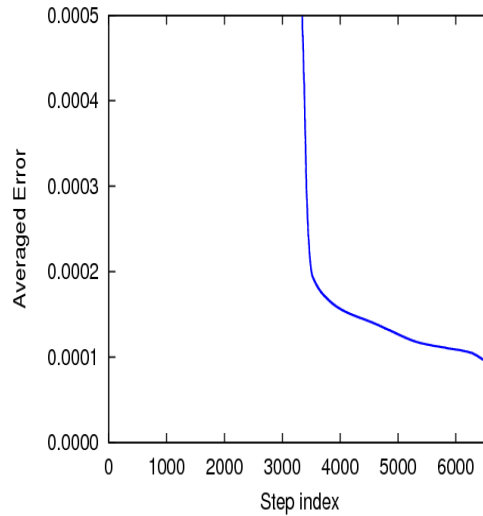


Figura B.3: Caso $Z = 4$; $A_E/A_0 = 0.40$. Verifica risultati NN: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.

B.6):

I risultati ottenuti sono analoghi nel caso si considerino i restanti valori del rapporto A_e/A_0 (0.35; 0.65).

B.2.3 influenza del numero di punti utili per l'addestramento sulle prestazioni della rete per $Z = 4$: J

Preso ad esempio il caso relativo ad una rete neurale addestrata con dati relativi alla sottofamiglia con valore $Z = 4$ e focalizzata l'attenzione al sottocaso $A_e/A_0 = 0.70$, la curva obiettivo è rappresentata dalla linea continua verde. I

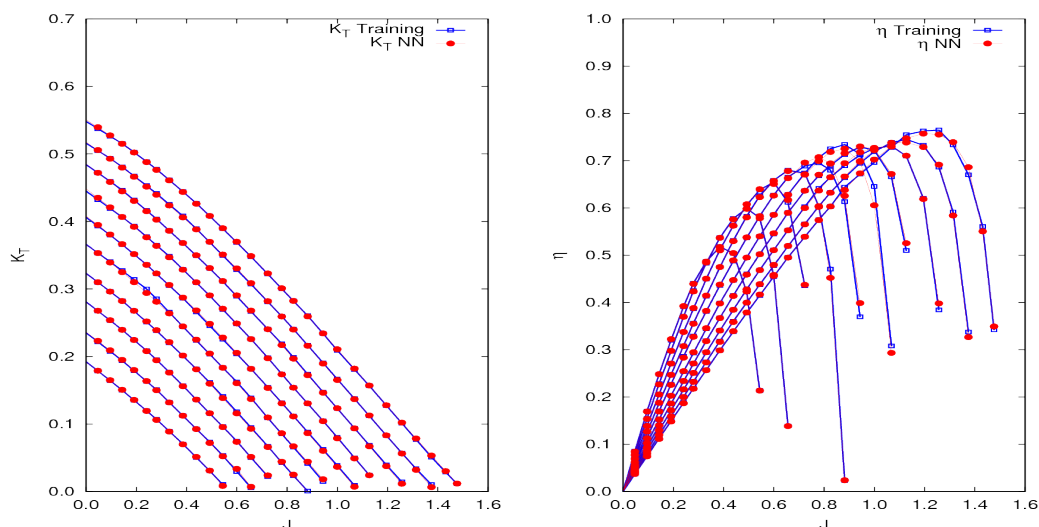


Figura B.4: Caso $Z = 3$. Verifica risultati NN per $A_e/A_0 = 0.50$: vista 2D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.

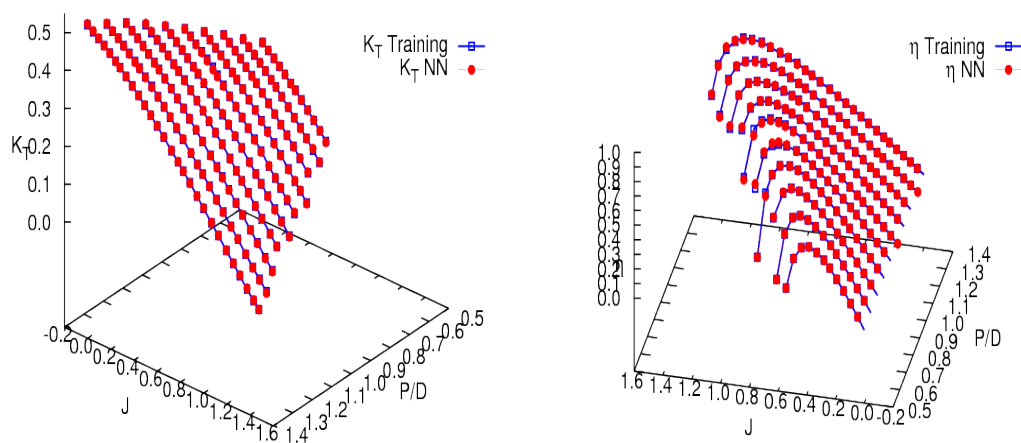


Figura B.5: Caso $Z = 3$. Verifica risultati NN per $A_e/A_0 = 0.50$: vista 3D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.

punti rappresentano la ricostruzione della rete sui punti di addestramento, mentre le linee (blu e viola) rappresentano la ricostruzione del segnale nei punti di validazione della rete. In tal caso, oltre ad aver considerato tutto il set di dati come disponibili per l'addestramento (curva verde e punti rossi), sono stati considerati due sottocasi: reti addestrate con dati complementari tra loro rispetto al dataset completo, rispettivamente con metà dei punti dedicati all'addestramento (punti blu e viola) e metà alla validazione (solo linee blu e viola) (figg. B.7, B.8).

Se è ovvio che una popolazione più ampia di punti utili per l'addestramento genera tempi di convergenza più lunghi, meno ovvio è la differenza che si nota tra due casi qualitativamente uguali tra loro. Sebbene il set di dati completo sia stato equamente diviso (in termini di numero ed in termini di distribuzione nell'iperspazio di input) in due, i tempi di

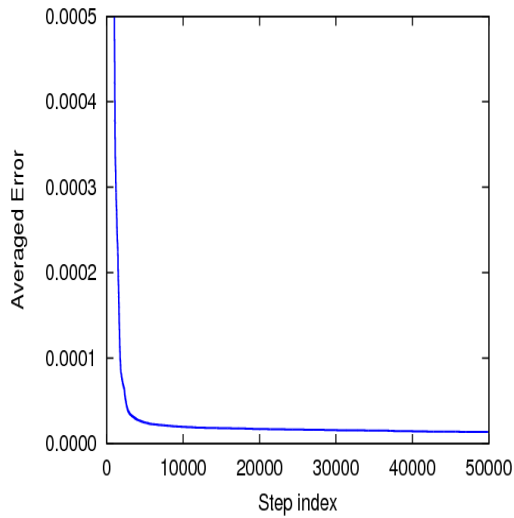


Figura B.6: Caso $Z = 3$. Verifica risultati NN per $A_e/A_0 = 0.50$: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.

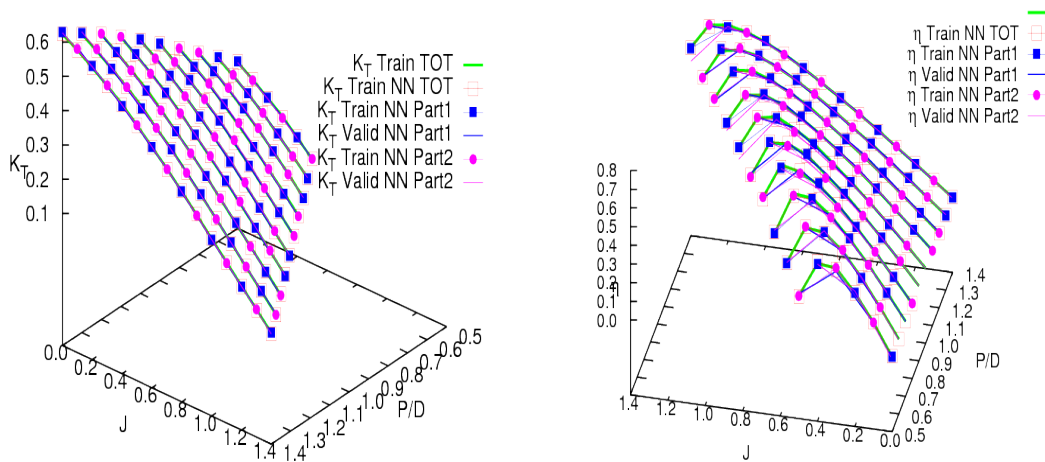


Figura B.7: Caso $Z = 4$. Verifica risultati NN per $A_e/A_0 = 0.70$ e sottocasi: vista 3D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.

calcolo di tali casi sono decisamente diversi tra loro.

B.2.4 influenza del numero di punti utili per l'addestramento sulle prestazioni della rete per

$$Z = 4: A_e/A_0$$

Finora l'influenza della densità di dati utili per l'addestramento è stata investigata per grandezze di per se già dense (J); tale analisi è stata condotta anche considerando un parametro di ingresso presente in modo sparso (A_e/A_0). Conside-

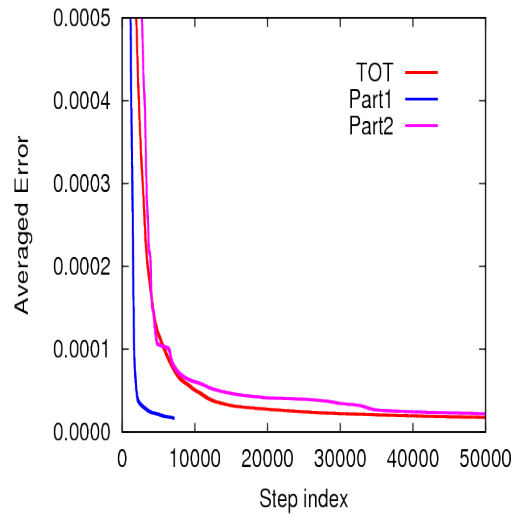


Figura B.8: Caso $Z = 4$. Verifica risultati NN per $A_e/A_0 = 0.70$ e sottocasi: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.

rato il caso relativo ad una rete addestrata fissato il parametro $Z = 4$, precedentemente analizzato nel par. B.2.3, sono stati estratti tre sottocasi a seconda del valore tolto dal set di addestramento, relativo al parametro A_e/A_0 ; in particolare, questo parametro pu assumere cinque valori: 0.40, 0.55, 0.70, 0.85, 1.00. I tre sottocasi in esame differiscono tra loro per il valore che tale parametro pu assumere all'interno dell' intervallo discreto suddetto; è stata quindi analizzata la risposta della rete nel/i punto/i mancante/i (verifica della capacità interpolativa della rete, poichè la risposta della rete nei punti di addestramento rimane quella già vista precedentemente).

influenza di $A_e/A_0 = 0.70$

Punti caratterizzati da $A_e/A_0 = (0.40, 0.55, 0.85, 1.00)$ utilizzati per l'addestramento, con validazione effettuata per $A_e/A_0 = 0.70$ (figg. B.9, B.10):

In virtù del punto tolto dal set di addestramento i due punti adiacenti ad esso sono distanti tra loro di una quantità pari al 50% dell'estensione dell'intero set ; in tal modo, nonostante l'errore medio (che comunque è calcolato sul set di addestramento disponibile) risulti inferiore a quello ottenuto sull'intero set di addestramento, la rete così addestrata risulta deficitaria nella sua capacità interpolativa.

influenza di $A_e/A_0 = 0.55; 0.85$

I punti caratterizzati da $A_e/A_0 = (0.40, 0.70, 1.00)$ sono utilizzati per l'addestramento, mentre la validazione viene effettuata per punti caratterizzati dai valori $A_e/A_0 = 0.55; 0.85$. Vengono mostrati i risultati afferenti al caso $A_e/A_0 = 0.55$ (figg. B.11 e B.12).

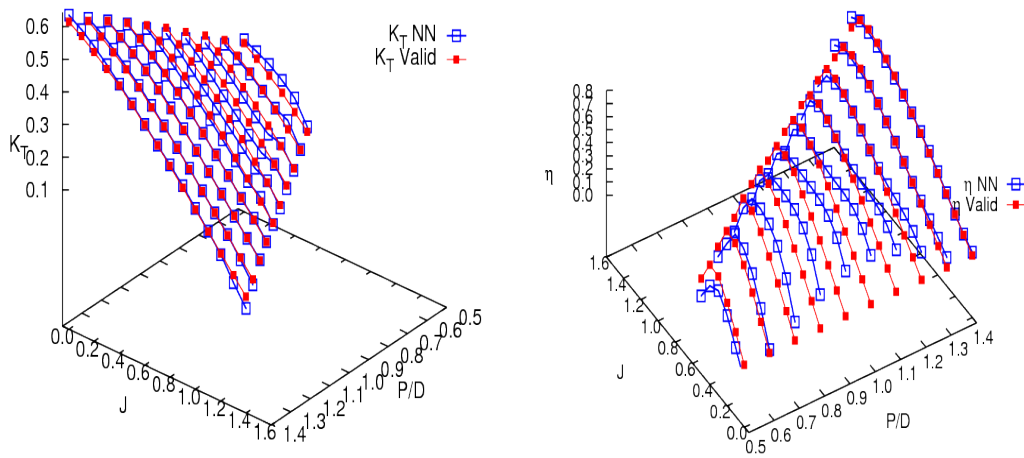


Figura B.9: Caso $Z = 4$ con dati mancanti relativi ad $A_e/A_0 = 0.70$. Validazione risultati NN per $A_e/A_0 = 0.70$: vista 3D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.

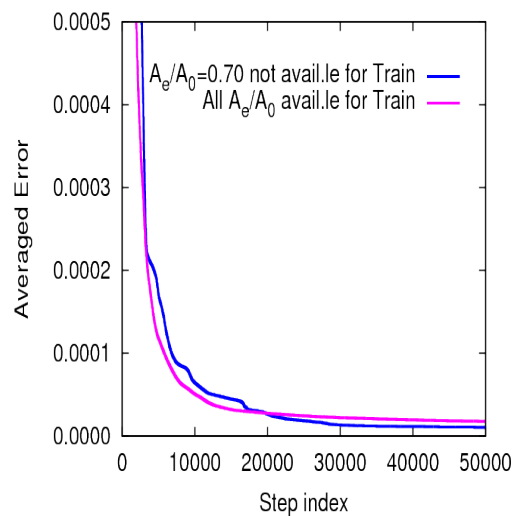


Figura B.10: Caso $Z = 4$ con dati mancanti relativi ad $A_e/A_0 = 0.70$. Validazione risultati NN per $A_e/A_0 = 0.70$: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.

influenza di $A_e/A_0 = 1.00$

I punti caratterizzati da $A_e/A_0 = (0.40, 0.55, 0.70, 0.85)$ sono utilizzati per l'addestramento, mentre la validazione viene effettuata sui punti caratterizzati da $A_e/A_0 = 1.00$ (figg. B.13 e B.14):

Dalle figure precedenti si può notare come la capacità di estrapolazione della rete neurale sia limitata, sebbene sia relativa ad un punto distante una quantità pari al 33% dell'intera ampiezza del dominio entro cui varia il parametro in esame.

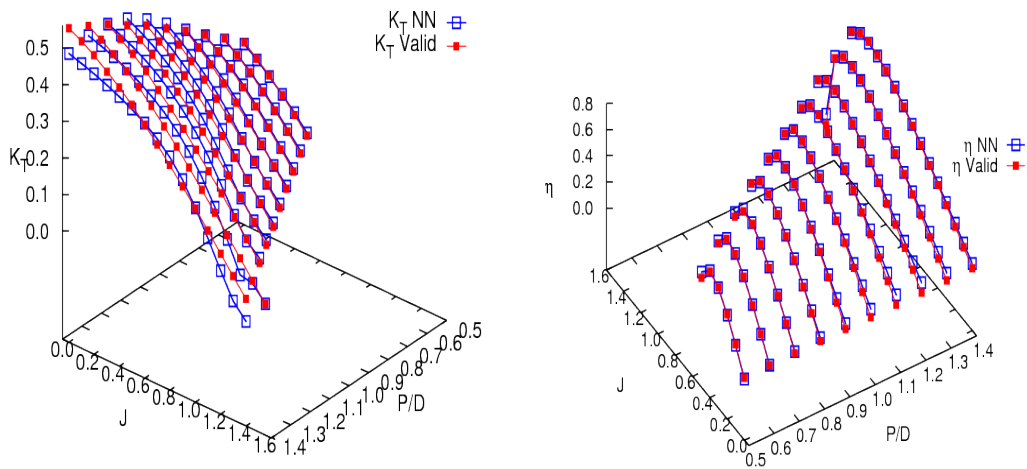


Figura B.11: Caso $Z = 4$ con dati mancanti relativi ad $A_e/A_0 = 0.40, 0.55; 1.00$. Validazione risultati NN per $A_e/A_0 = 0.55$: vista 3D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.

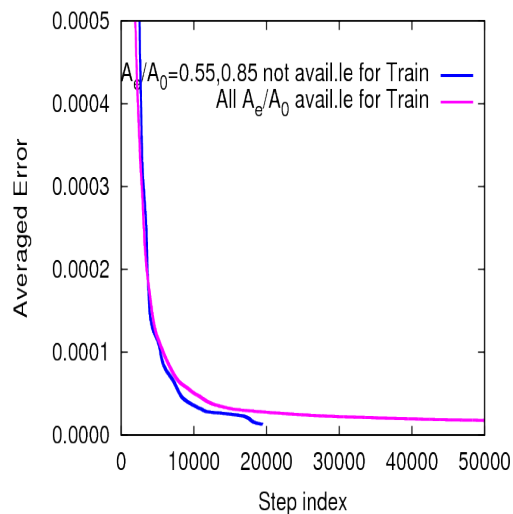


Figura B.12: Caso $Z = 4$ con dati mancanti relativi ad $A_e/A_0 = 0.40, 0.55; 1.00$. Validazione risultati NN per $A_e/A_0 = 0.55$: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.

B.2.5 analisi dell'influenza dei parametri numero di neuroni e numero di strati sulle prestazioni della rete per $Z = 4$

Per la verifica dell'influenza dei parametri di rete sulle prestazioni della stessa è stato considerato il caso il cui set di addestramento è caratterizzato dalla condizione $Z = 4$. Obiettivo di tale analisi è stato determinare, per il caso in questione, il numero minimo di neuroni e di strati nascosti per ottenere una determinata accuratezza, in relazione anche ai tempi necessari per la convergenza del ciclo di addestramento della rete neurale. I risultati mostrati a titolo di

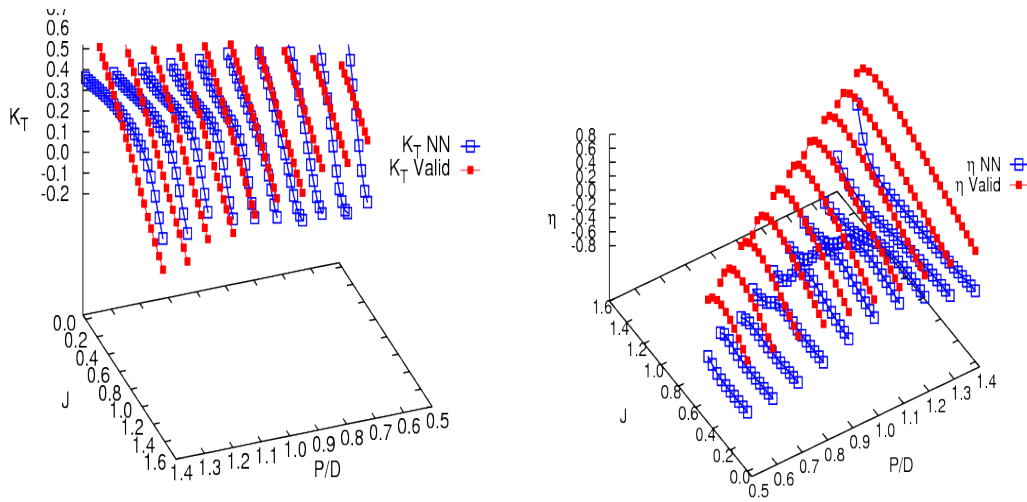


Figura B.13: Caso $Z = 4$ con dati mancanti relativi ad $A_e/A_0 = 1.00$. Validazione risultati NN per $A_e/A_0 = 1.00$: vista 3D. Sinistra: coeff. spinta. Destra: efficienza.

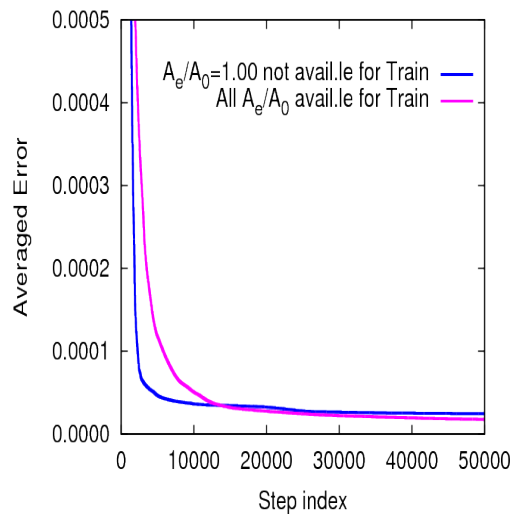


Figura B.14: Caso $Z = 4$ con dati mancanti relativi ad $A_e/A_0 = 1.00$. Validazione risultati NN per $A_e/A_0 = 1.00$: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.

esempio fanno riferimento alla condizione $A_e/A_0 = 0.85$.

Nel seguito vengono mostrate due gruppi (KT ed η) di tre figure disposte sulla stessa riga, tale per cui, da sinistra a destra passo dalle curve relative a reti costruite con uno strato, due ed infine tre strati nascosti. Le curve all'interno di ogni figura mostrano la variabilità della risposta della rete quando si usano: 5, 8, 13 o 18 neuroni per singolo strato nascosto (figg. B.15, B.16 e B.17).

Dall'analisi effettuata, i casi considerati sono stati classificati come scarso (Errore medio $> 15\%$), non sufficiente e

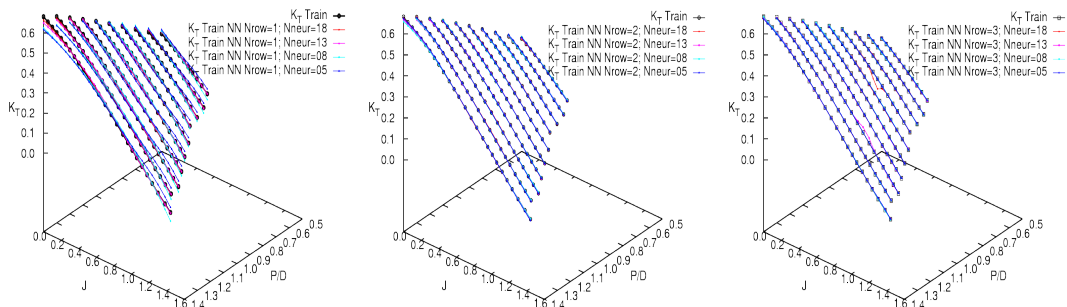


Figura B.15: Caso $Z = 4$. Coefficiente di spinta. Effetto del numero di neuroni. Sinistra: 1 strato nascosto; centro: 2 strati nascosti; destra: 3 strati nascosti.

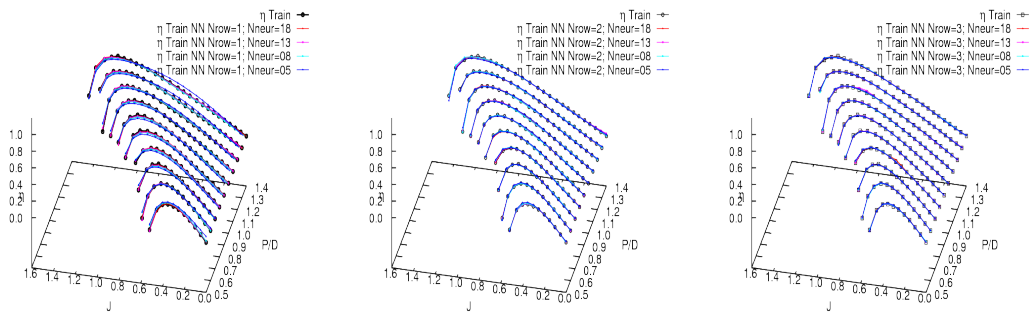


Figura B.16: Caso $Z = 4$. Efficienza. Effetto del numero di neuroni. Sinistra: 1 strato nascosto; centro: 2 strati nascosti; destra: 3 strati nascosti.

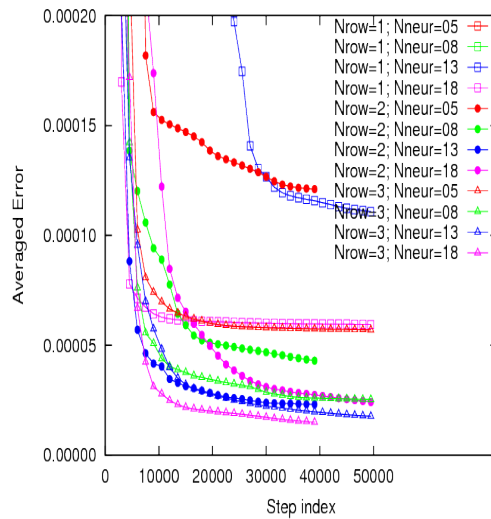


Figura B.17: Caso $Z = 4$. Effetto del numero di neuroni per strato e del numero degli strati nascosti della rete. Andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.

sufficiente (Errore medio < 3%) come mostrato nella seguente tab. B.1:

N_{row}	N_{neur}			
	5	8	13	18
1	$\geq 0.015\%$	$\geq 0.015\%$	$\geq 0.015\%$	$\geq 0.015\%$
2	$\geq 0.015\%$	$0.003 \leq \epsilon \leq 0.015\%$	$0.003 \leq \epsilon \leq 0.015\%$	$0.003 \leq \epsilon \leq 0.015\%$
3	$\geq 0.015\%$	$0.003 \leq \epsilon \leq 0.015\%$	$\leq 0.003\%$	$\leq 0.003\%$

Tabella B.1: Andamento dell'errore commesso dalla rete neurale al variare dei parametri di base.

B.2.6 analisi influenza del numero di dati utili di addestramento: restart ed ampliamento dataset

Per verificare la continuità della convergenza ampliando il set di dati di addestramento e valutare la variazione nei tempi di convergenza è stato considerato il caso relativo $Z = 4$, con metà punti dedicati all'addestramento e metà alla validazione della rete. Il confronto è avvenuto fra:

- caso A, con set dei dati addestramento completi
- caso B, in cui, al set completo di dati, sono stati tolti i dati relativi ad $A_e/A_0 = 0.70$ e $P/D = 1.0$
- caso C, con set dei dati completo e restart dell'addestramento della rete a partire dal set di pesi delle connessioni relativo al caso B a convergenza

Il caso A è stato quindi messo a confronto con il caso (B+C); il confronto è avvenuto sia in termini di capacità della rete di ricostruire nel punto mancante del set dei dati addestramento, sia in termini di velocità della convergenza (fig. B.18).

Come si può notare, sebbene il caso B sia mancante del punto di addestramento su esposto, la rete ad esso associata è capace di ricostruire il segnale con la stessa precisione del caso A (set di dati di addestramento completo); tale capacità, però, si contrappone ad una maggiore lentezza nel raggiungimento della convergenza. Più in particolare, mentre il caso A ha impiegato per l'addestramento circa 7200 cicli per circa 66 minuti (1.82 cicli/sec), l'unione dei casi B+C ha impiegato 100 minuti per completare 11200 cicli (1.86 cicli/sec). A fronte di tale risultato, si può concludere che è preferibile, laddove sia possibile, addestrare la rete neurale col maggior numero possibile di dati, sia in termini di accuratezza, che in termini di velocità di convergenza.

B.2.7 incremento accuratezza in presenza di errori sulle grandezze di output localizzati

Preso a riferimento il caso di una rete addestrata con un set di dati relativi a $Z = 6$, essa mostra una accuratezza nella ricostruzione del segnale giudicata soddisfacente globalmente, mentre presenta delle lacune localizzate in taluni punti.

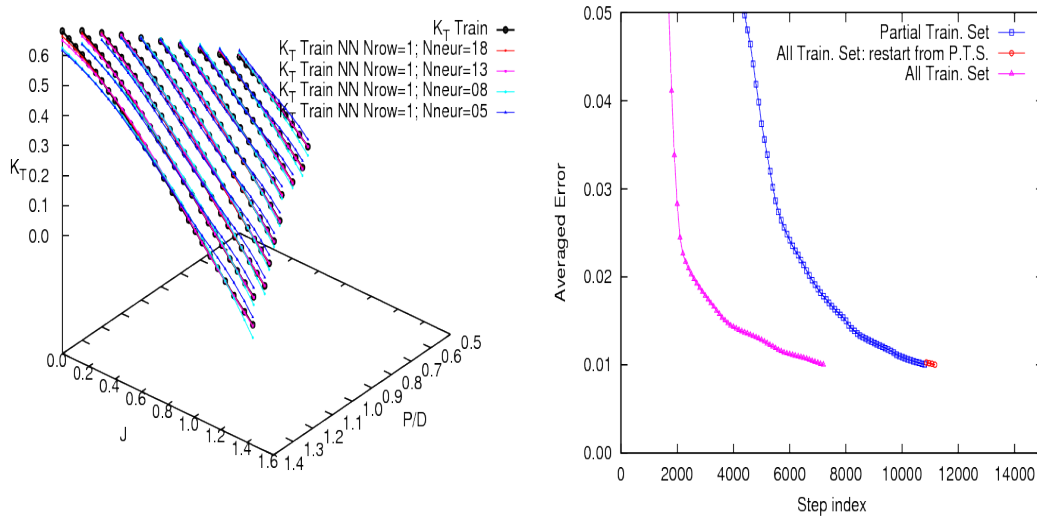


Figura B.18: Caso $Z = 4$. Effetto dell’inserimento di nuovi dati di addestramento sulla capacità di simulazione della rete neurale (sinistra: coefficiente di spinta) e sulla velocità di addestramento (destra: andamento del residuo di addestramento).

In particolare, considerato il sottocaso relativo ad $A_e/A_0 = 0.95$ e $P/D = 1.2, 1.3$, il segnale ricostruito dalla rete si discosta considerevolmente dal segnale dato in addestramento, sebbene, nelle zone circostanti non si evidenziano errori considerevoli. È stata quindi effettuata un’analisi al variare del numero di cicli massimo utili per l’addestramento della rete stessa mediante comparazione dei risultati; la rete presa in esame è caratterizzata da tre strati nascosti e 13 neuroni per singolo strato. Nelle figure a seguire, mentre per il K_T saranno mostrate le curve relative alla famiglia $A_e/A_0 = 0.95$, per l’efficienza, η , sarà mostrata solo la curva relativa al valore $P/D = 1.2$, in modo tale da magnificare le differenze tra segnale originale e quello ricostruito dalla rete addestrata (fig.B.19).

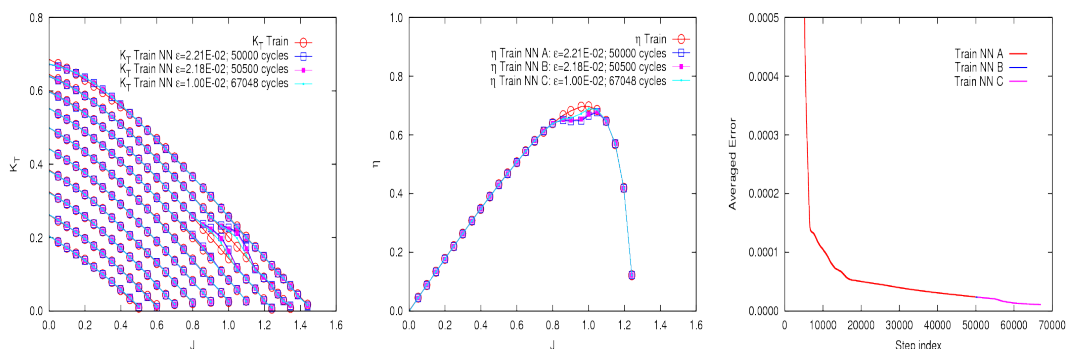


Figura B.19: Caso $Z = 6$. Verifica risultati NN per $A_e/A_0 = 0.95$. Sinistra: andamento del coeff. di spinta. Centro: andamento dell’efficienza per il sottocaso $P/D = 1.2$. Destra: andamento dell’errore residuo durante la fase di addestramento.

Oltre a cercare di investigare l’influenza del numero dei cicli di addestramento sull’accuratezza prodotta, si è analizzata

anche l'influenza del numero di neuroni per singolo strato nascosto. In particolare, i risultati ottenuti con 18 neuroni per ogni strato nascosto è stato confrontato con quelli ottenuti con 3 strati nascosti e 13 neuroni per strato, a parità di livello di errore a convergenza (fig. B.20).

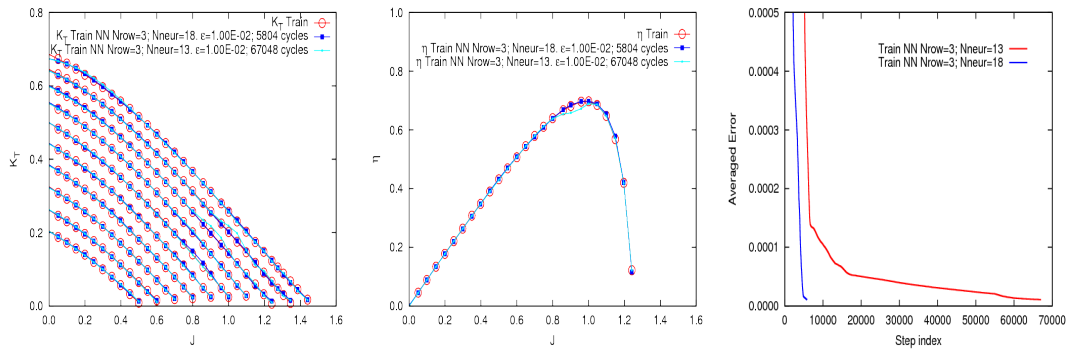


Figura B.20: Caso $Z = 6$. Verifica risultati NN per $A_e/A_0 = 0.95$: confronto tra reti a 13 e 18 neuroni per singolo strato nascosto. Sinistra: andamento del coeff. di spinta. Centro: andamento dell'efficienza. Destra: andamento dell'errore residuo durante la fase di addestramento.

Appendice C

Approfondimento a supporto del modello agli elementi di contorno

C.1 Uso della funzione di Green, soluzione fondamentale nello spazio a tre dimensioni

Il modello matematico utilizzato nel presente lavoro si basa sullo utilizzo di una funzione di Green che risulta essere una particolare soluzione della equazione di Laplace applicata a tale funzione (soluzione fondamentale nello spazio a tre dimensioni):

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_*) = \frac{-1}{4\pi\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_*\|}$$

Essa non soddisfa condizioni al contorno omogenee sulla derivata normale, ma risulta $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_*) = 0$ per $\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_*\| \rightarrow \infty$. Il suo significato fisico è notevole: essa rappresenta il potenziale nel punto \mathbf{x} dovuto ad una sorgente di intensità unitaria in \mathbf{x}_* ; infatti, (posto $\mathbf{r} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_*$, $r = \|\mathbf{r}\|$):

$$\nabla \left(\frac{-1}{4\pi\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_*\|} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{-1}{4\pi r} \right) \frac{\mathbf{r}}{r} = \frac{1}{4\pi r^3} \mathbf{r} \quad (\text{C.1})$$

La velocità indotta sui punti di una sfera di raggio r e centro nel punto \mathbf{x}_* è diretta in direzione radiale; il flusso attraverso la sfera ha intensità unitaria.

Se G individua il potenziale di una sorgente unitaria, $\frac{\partial G}{\partial n}$ è il potenziale dovuto ad una doppietta, o dipolo, di intensità unitaria.

L'equazione (4.1) può scriversi quindi, indicando con S_{W*} la superficie della scia (costituita da due sovrapposte al dorso ed al ventre della scia, aventi le rispettive normali uguali ed opposte), con $S_B \cup S_H$, le superfici dell'elica e del

mozzo e con S_D la superfici del mantello:

$$\begin{aligned}\phi(\mathbf{x}_*) &= \oint_{S_B \cup S_H \cup S_{W_B}^*} \left[G \frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial G}{\partial n} \right] dS \\ &+ \oint_{S_D \cup S_{W_D}^*} \left[G \frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial G}{\partial n} \right] dS\end{aligned}\quad (C.2)$$

Una analisi a posteriori dell'andamento della funzione $\phi(\mathbf{x}_*)$ mostra che al tendere all' infinito della distanza r del punto \mathbf{x}_* dalla superficie dei corpi e delle scie vorticosi che da essi si staccano, risulta:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \phi(\mathbf{x}_*) = 0$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r \frac{\partial \phi(\mathbf{x}_*)}{\partial n} = 0$$

Utilizzando i pedici u, ℓ (dall'inglese "upper, lower") per distinguere le grandezze valutate rispettivamente sul dorso e sul ventre, dalle condizioni al contorno viste nel precedente paragrafo, si ha, sui punti della scia:

$$\Delta \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} \right) = \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_u - \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_\ell = 0$$

Indicando con S_W la superficie della scia, indifferentemente, delle pale e del mantello e posto $\Delta \phi = \phi_u - \phi_\ell$, si ottiene:

$$\oint_{S_W^*} \left[G \frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial G}{\partial n} \right] dS = - \int_{S_W} \left[\Delta \phi \frac{\partial G}{\partial n} \right] dS$$

avendo assunto il verso della normale ad S_W uguale a quello della normale ad S_W^* sul dorso della scia.

Sostituendo nella (C.2):

$$\begin{aligned}\phi(\mathbf{x}_*) &= \oint_{S_B \cup S_H \cup S_D} \left[G \frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial G}{\partial n} \right] dS \\ &- \int_{S_{W_B} \cup S_{W_D}} \left[\Delta \phi \frac{\partial G}{\partial n} \right] dS\end{aligned}\quad (C.3)$$

Da questa equazione risulta che il potenziale in un generico punto interno al campo è dato dal contributo di una distribuzione di sorgenti sulla superficie del corpo di intensità $\frac{\partial \phi}{\partial n}$, nota dalle condizioni al contorno, da una distribuzione di doppiette sulla superficie del corpo e del tunnel di intensità ϕ e da una distribuzione di doppiette sulla superficie della scia avente intensità pari a $\Delta \phi$. La relazione (C.3) non fornisce una equazione esplicita per il calcolo del potenziale: essa è piuttosto una "rappresentazione integrale" per calcolare la funzione ϕ in un generico punto \mathbf{x}_* immerso nel fluido, una volta nota la distribuzione del potenziale di ϕ su $S_B \cup S_H \cup S_D$, di $\partial \phi / \partial n$ su $S_B \cup S_H \cup S_D$ e di $\Delta \phi$ su $S_{W_B} \cup S_{W_D}$.

In base all'equivalenza tra doppietta ed angolo solido Ω (si veda, al proposito, Batchelor [2]):

$$\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{-1}{4\pi r} \right) dS = \frac{1}{4\pi r^3} \mathbf{r} \cdot \mathbf{n} dS = \frac{1}{4\pi} d\Omega$$

si può dimostrare che, se il punto \mathbf{x}_* appartiene alla superficie del corpo, risulta:

$$E(\mathbf{x}_*)\phi(\mathbf{x}_*) = \oint_{S_B \cup S_H \cup S_D} \left[G \frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial G}{\partial n} \right] dS - \int_{S_{WB} \cup S_{WD}} \left[\Delta \phi \frac{\partial G}{\partial n} \right] dS$$

con $E(\mathbf{x}_*) = 1/2$ nei punti regolari della superficie $S_B \cup S_H \cup S_D$, ovvero quei punti per i quali risulta definito in modo univoco il piano tangente alla superficie stessa.

Questa è una equazione integrale nella incognita ϕ ; essa rappresenta la condizione di compatibilità tra ϕ e $\frac{\partial \phi}{\partial n}$ sui punti della superficie del corpo.

Dalla soluzione della precedente equazione si ricava la distribuzione del potenziale sul corpo; nota questa, l'equazione (C.3) consente di determinare il potenziale in ogni punto interno al campo.

C.2 Equazione della velocità indotta nei punti interni al campo

Nota la distribuzione del potenziale sulla superficie del corpo, dalla (C.3) si ricava il campo di velocità nei punti intorno al corpo; indicando con ∇_* l'operatore gradiente agente sulla variabile \mathbf{x}_* , si ha:

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}_*) = \nabla_* \oint_{S_B \cup S_H \cup S_D} \left[(G) \frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial G}{\partial n} \right] dS - \nabla_* \int_{S_{WB} \cup S_{WD}} \left[\Delta \phi \frac{\partial G}{\partial n} \right] dS$$

Ricordando che $r = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_*\|$ e la C.1, risulta allora:

$$\nabla_* \left(\frac{1}{r} \right) = -\nabla \left(\frac{1}{r} \right) = \frac{1}{r^3} \mathbf{r}$$

e quindi

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}_*) = \oint_{S_B \cup S_H \cup S_D} \left[\frac{-\mathbf{r}}{4\pi r^3} \frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{-\mathbf{r}}{4\pi r^3} \right) \right] dS - \int_{S_{WB} \cup S_{WD}} \left[\Delta \phi \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{-\mathbf{r}}{4\pi r^3} \right) \right] dS \quad (C.4)$$

Questa equazione può essere in particolare utilizzata per il calcolo della velocità dei punti della scia e dei punti interni al volume fluido al fine di confrontarli, con dati sperimentali disponibili.

Appendice D

Stima delle prestazioni di una carena

La determinazione della potenza propulsiva richiesta da una imbarcazione operante sotto fissate condizioni operative del motore necessita dapprima di una descrizione sommaria dei parametri caratterizzanti il funzionamento di una imbarcazione tipo.

Ogni carena, in assenza di un'elica che la spinga, è caratterizzata da una curva caratteristica di funzionamento, che lega la resistenza R_T , offerta all'avanzamento al variare della velocità V_{Ship} .

In funzione di tale resistenza, si può esprimere la potenza effettiva P_E richiesta per l'avanzamento dell'imbarcazione ad una data velocità:

$$P_E = R_{Ship} V_{Ship} / 1000 [KW] \quad (D.1)$$

dove la resistenza è espressa in Newton, mentre la velocità è data in m/s.

D'altro canto, un'elica in assenza di una carena è caratterizzata da una curva caratteristica di spinta T_P al variare della velocità della corrente fluida in cui essa è immersa; parimenti esiste una curva di efficienza idrodinamica η_0 . Come sopra, la potenza erogabile dall'elica può essere espressa in funzione di tale spinta:

$$P_{TP} = T_P V_a / 1000 [KW] \quad (D.2)$$

Le due potenze finora enunciate, una relativa ad una carena in assenza di elica e l'altra relativa ad un'elica operante in assenza di carena possono essere messe in relazione l'una all'altra mediante dei coefficienti equivalenti di interazione elica-carena:

$$V_a = V_{Ship} (1 - w) \quad (D.3)$$

$$T_P = R_{Ship} / (1 - t)$$

dove w è definito come la frazione di scia di Taylor, mentre t la frazione di spinta.

Mediante l'introduzione delle efficienze η_p , relativa ad un'elica operante nella scia fluida indotta dalla presenza della carena, ed η_r , detta rotativa relativa, si può trasformare l'efficienza idrodinamica nell'efficienza di elica operante dietro scia: $\eta_p = \eta_0 \eta_r$.

Sostituendo le espressioni date in D.3 nell'equazione D.2 ed utilizzando l'espressione data in D.1, si giunge alla relazione diretta tra la potenza netta per muovere lo scafo e le grandezze caratteristiche dell'elica in flusso libero:

$$P_{TP} = P_E(1 - w)/(1 - t) \quad (D.4)$$

Viene definita un'efficienza globale, $\eta_h = (1 - t)/(1 - w) = P_E/P_{TP}$, mediante la quale si tiene conto delle perdite indotte dalla carena.

Immaginando ora di andare a ritroso dall'elica al motore, la potenza disponibile all'elica è legata alla potenza effettiva per il tramite dell'efficienza,

$$\eta_p: P_D = P_{TP}/\eta_p = P_{TP}/(\eta_0 \eta_r) = P_E/(\eta_h \eta_0 \eta_r).$$

Infine vengono definite le potenze all'albero P_S , misurabile a valle del gruppo di riduzione dei giri e la potenza del motore primo, detta di brake P_B ; la prima di essa è legata alla potenza disponibile all'elica per il tramite delle perdite associate ai *stern tube bearing and seal efficiency* e ai cuscinetti di supporto, mentre la potenza all'albero è pari alla potenza di brake decurtata delle perdite legate alla trasmissione (sia meccanica che elettrica a seconda che il motore sia collegato ad un cambio o ad un motore elettrico).

In tal senso, in cascata, si ottengono le seguenti espressioni per le efficienze introdotte:

$$\begin{aligned} P_S &= P_D/(\eta_s \eta_b) \\ P_B &= P_S/\eta_t = \frac{P_E}{(\eta_h \eta_0 \eta_r \eta_s \eta_b \eta_t)} \end{aligned} \quad (D.5)$$

Solitamente vengono assegnate dal fornitore del motore primo la potenza di brake P_B , mentre le perdite sopraenunciate sono stimate dal progettista.

Generalmente, nella progettazione di massima di un sistema propulsivo si parte dalla condizione di prove a mare, supposta l'imbarcazione nuova, con scafo ideale come appena uscito da cantiere, in condizioni di mare ed aria calma. Sotto tali condizioni viene stimata la resistenza dello scafo; la stima di tale potenza mediante modelli semplificati e l'uso di dati di design approssimativi producono un'incertezza nel dato di potenza stimato; un coefficiente di sicurezza M_D di design (*Power Design Margin*) rappresentativo di tale incertezza, viene incluso quindi nei calcoli.

Similmente, un coefficiente di sicurezza di servizio M_S , rappresentativo dell'incremento di resistenza dovuto alle condizioni realistiche in cui versa lo scafo (sporczia, usura vernici), alle condizioni realistiche di onde e vento, alla navigazione in acque poco profonde viene considerato.

Sotto tali condizioni la potenza di brake viene corretta nella seguente maniera:

$$P_B(1 - M_S) = \frac{P_E(1 + M_D)}{(\eta_h \eta_0 \eta_r \eta_s \eta_b \eta_t)} \quad (D.6)$$

L'elica viene dimensionata in modo tale che il predetto equilibrio viene conseguito in corrispondenza del punto di design definito dalle condizioni a mare sopra esposte.

In tale punto, quindi, fissata la velocità di avanzamento dell'imbarcazione ed il numero di giri di funzionamento del motore, la potenza erogata dal motore eguaglia quella richiesta dallo scafo.

Poichè la potenza di brake rappresenta la minima potenza richiesta al motore per il funzionamento, questo, nella pratica, dovrà essere fornito con una potenza massima continua di funzionamento (MCR: *maximum continuous rating*) al minimo pari a P_B ; solitamente il margine viene fissato nell'intorno del 3 – 5%.

Valori tipici assunti dalle potenze e dai rendimenti sopra enunciati nella pratica progettuale sono:

- $15 \leq M_S \leq 25$ per applicazioni tipiche commerciali, crescenti al crescere della velocità di esercizio
- $(\eta_s \eta_b) = 0.97$ (se posizionamento motore in avanti); 0.98 (se posto nella mezzeria della nave)
- $\eta_t = \eta_g = \prod_i (1 - l_i)$, con $l_i = 0.010$ per ogni fattore di riduzione del cambio; 0.005 per il cuscinetto reggispinta; 0.010 per la retromarcia. Per un cambio a singola riduzione, con un solo cuscinetto reggispinta, l'efficienza della trasmissione di un motore diesel si può stimare in circa 0.975. Se l'elica è mossa da un motore elettrico, l'efficienza di trasmissione o del generatore, deve tener conto anche dell'efficienza del generatore elettrico, del convertitore di potenza e del motore elettrico, in aggiunta all'efficienza di riduzione del cambio: $\eta_t = \eta_{gen} \eta_c \eta_m \eta_g$. A seconda dei possibili accoppiamenti tra potenze (AC/DC; AC/AC; DC/DC), l'efficienza assume valori compresi tra 0.80 e 0.95.

Appendice E

Set-up sperimentale: carena CNR-INSEAN C2503

Presso gli impianti dell'Istituto CNR-INSEAN è stata condotta una campagna sperimentale su una carena denominata "C2503", modello in scala $\lambda = 12$, rappresentativa di un peschereccio a singola linea d'assi, spinto da un propulsore ad elica intubata. Questa è stata realizzata in loco mediante lavorazione su legno ad opera di una fresatrice a controllo numerico e finita a mano, mentre il mantello e le restanti appendici della carena sono realizzate in PVC.

In fig. E.1 sono mostrate immagini relative alla realizzazione del modello in scala, mentre in fig. E.2 quelle relative al modello di elica utilizzato nelle prove sperimentali, denominata CNR-INSEAN E1622.

Gli esperimenti sono stati condotti nel bacino N.1 (450mX14mX6m) degli impianti CNR-INSEAN.

Le prove sono state condotte ad acqua ferma con modello posto in trascinamento da un carro mobile.

La campagna sperimentale ha riguardato la misura della resistenza offerta dalla carena in avanzamento senza la propulsione dell'elica; la misura della prova di auto propulsione in cui il modello di carena si pone in equilibrio di avanzamento sotto la spinta generata dall'elica; la misura delle prove di elica in flusso libero condotte sull'elica in configurazione isolata e intubata, in cui il propulsore avanza ad una data velocità ruotando ad un determinato numero di giri in assenza di carena.

La prova di resistenza è avvenuta mediante l'ausilio di un trasduttore di forza, tipo Hottinger HBM11-F di fondo scala pari a 20Kgf. Finestre di misura della lunghezza di almeno 10secondi sono state utilizzate per la registrazione delle grandezze ad una velocità stazionaria. Le prove sono state condotte seguendo gli standard internazionali delle procedure ITTC towing tank (7.5-02-02-01).

La prova di autopropulsione ha previsto il modello di elica posto in rotazione mediante un motore elettrico DC. Le misure delle prestazioni dell'elica hanno riguardato l'uso di un:

- dinamometro di tipo CUSSONS CUS103-T e CUS103-Q per la misura della spinta e della coppia esercitata



Figura E.1: Dettaglio delle fasi di lavorazione della carena CNR-INSEAN C2503.

dall'elica (valori di fondo scala pari a 10Kgf per la spinta e 10Kgm per la coppia)

- trasduttore di tipo Hydronics HYD189-F per la misure della resistenza offerta dalla carena all'avanzamento ad una data velocità (fondo scala pari a 50Kgf)
- encoder di tipo CNR-INSEAN FB01 per la misura della velocità di rotazione dell'elica

Le prove sono state condotte seguendo gli standard internazionali delle procedure ITTC towing tank (7.5-02-03-01.1).

Le prove di elica in flusso libero sono avvenute mediante l'ausilio di:

- dinamometro di tipo Kempf&Remmers REMH29-T, REMH29-Q, REMH29-Fx per la misura rispettivamente della spinta e della coppia dell'elica e della resistenza del mantello con valori di fondo scala pari a 20Kgf per la spinta e 20Kgm per la coppia
- encoder di tipo CNR-INSEAN FB01 per la misura della velocità di rotazione dell'elica

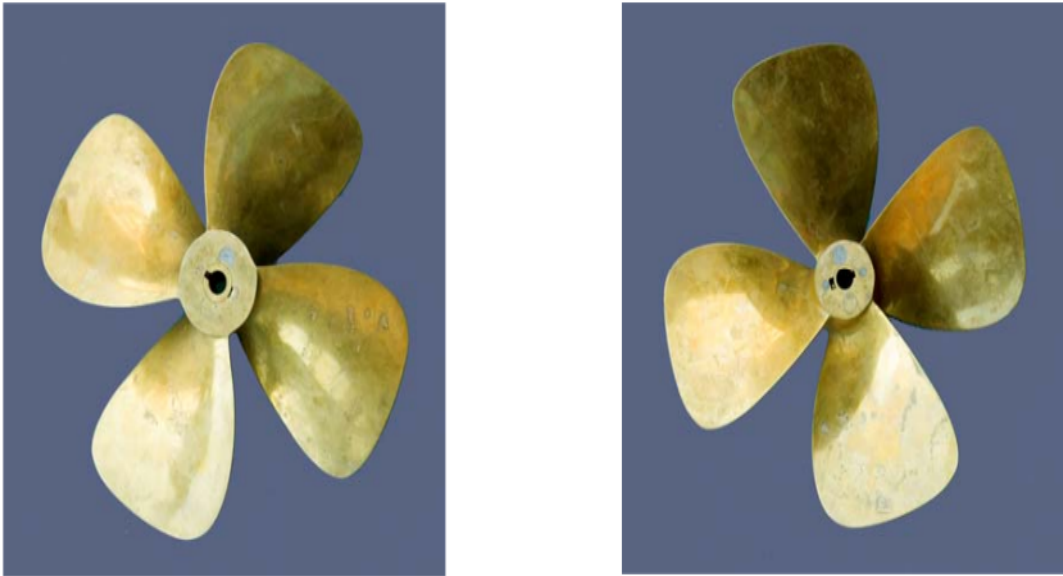


Figura E.2: Dettaglio del modello di elica CNR-INSEAN E1622, utilizzato nella campagna sperimentale relativa alla carena C2503.

Le prove sono state condotte seguendo gli standard internazionali delle procedure ITTC towing tank (7.5-02-03-01.1).

Nelle figg. E.3, E.4, E.5 e E.6 sono riportate le tabelle relative alle prove sperimentali descritte.

Ship Model No:2503- Test No:001 Resistance Test INSEAN

RESISTANCE TEST RESULTS

<p>Scale ratio λ 12.000</p> <p>Temperature of sea water (std) t_s 15.000 °C</p> <p>Temperature of tank water t_n 24.000 °C</p> <p>Viscosity of sea water (std) ν_s 1.1873 $\times 10^{-6}$ m²/s</p> <p>Viscosity of tank water ν_n 0.9159 $\times 10^{-6}$ m²/s</p> <p>Mass density of sea water (std) ρ_s 104.610 Ygt m³/m³</p> <p>Mass density of tank water ρ_n 102.060 Ygt m³/m³</p> <p>Incremental resistance coefficient Δc_f 2.000 $\times 10^{-4}$</p>	<p>MODEL CONDITION</p> <p>Length between perpendiculars L_{pp} 67.000 m</p> <p>Length of waterline L_{wl} 70.580 m</p> <p>Length overall submerged L_{os} 70.580 m</p> <p>Breadth moulded max B_m n.a.</p> <p>Breadth of waterline B_{wl} 12.000 m</p> <p>Draft at forward perpendicular T_f 3.120 m</p> <p>Draft at afterword perpendicular T_a 4.728 m</p> <p>Draft at midship T_m 3.924 m</p> <p>Displacement weight Δ 2025.54 t</p> <p>Area of wetted surface S_w 1024.24 m²</p> <p>Block coefficient C_b 0.595</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

X ₀	V _n m/s	RT _n Kgf $\times 10^3$	CT _n $\times 10^3$	C _r $\times 10^3$	CT _n $\times 10^3$	V _n knots	RT _n t	P _n CV	F _n	F _n ∇	CT _v $\times 10^3$
1	0.594	0.615	4.802	1.229	3.453	4.00	0.78	21.	0.078	0.185	22.46
2	0.743	0.935	4.673	1.246	3.407	5.00	1.21	41.	0.098	0.232	22.16
3	0.891	1.369	4.720	1.406	3.518	6.00	1.89	74.	0.117	0.278	22.88
4	1.040	1.850	4.716	1.494	3.585	7.00	2.48	119.	0.137	0.325	23.19
5	1.188	2.440	4.762	1.616	3.654	8.00	3.32	182.	0.156	0.371	23.76
6	1.337	3.140	4.842	1.761	3.770	9.00	4.33	267.	0.176	0.417	24.52
7	1.485	4.020	5.022	1.997	3.980	10.00	5.64	387.	0.196	0.464	25.89
8	1.634	5.060	5.224	2.249	4.209	11.00	7.22	545.	0.215	0.510	27.38
9	1.782	6.270	5.439	2.508	4.449	12.00	9.08	748.	0.235	0.556	28.93
10	1.931	7.910	5.847	2.956	4.878	13.00	11.69	1042.	0.254	0.603	31.73
11	2.079	10.320	6.578	3.723	5.628	14.00	15.64	1502.	0.274	0.649	36.61
12	2.228	13.470	7.479	4.657	6.547	15.00	20.89	2149.	0.293	0.695	42.58

Notas:
 * 001 - Dislocamento rilevato in acqua
 Appendages:
 * 001 - Mantello con supporto
 * 002 - Timona + asse a supporto
 Modifications: —

SMT/19/0001 11.09.01

Figura E.3: Foglio relativo alla prova di resistenza, nella campagna sperimentale relativa alla carena C2503.

PROPULSION TEST

Referred to the Self Propulsion point of ship

Scale ratio	λ	12.000	
Temperature of sea water (std)	t_w	15.000	$^{\circ}\text{C}$
Temperature of tank water	t_w	24.500	$^{\circ}\text{C}$
Viscosity of sea water (std)	ν_w	1.1873	$\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Viscosity of tank water	ν_w	0.9063	$\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Density of sea water (std)	ρ_w	104.610	$\times 10^{-3} \text{ kg m}^3/\text{m}^3$
Density of tank water	ρ_w	102.060	$\times 10^{-3} \text{ kg m}^3/\text{m}^3$
Incremental resistance coefficient	Δr_i	2.000	$\times 10^{-4}$
Longitudinal propeller position	X_p	0.000	
Propeller diameter	D	2.600	
Number of propeller	N_p	1	

MODEL CONDITION

Length between perpendiculars	L_{pp}	67.000	m
Length of waterline	L_{wl}	70.580	m
Length overall submerged	L_{OS}	70.580	m
Breadth moulded max	B_m	n.a.	
Breadth on waterline	B_w	12.000	m
Draft at forward perpendicular	T_f	3.120	m
Draft at aft. perpendicular	T_A	4.728	m
Draft at midship	T_M	3.924	m
Displacement weight	Δ	2025.54	t
Area of wetted surface	S_w	1024.24	m ²
Block coefficient	C_b	0.595	

Resistance test No. : 001

Open Water test No. : 001

V_a knots	T_a kgf	V_a g/s	Q_a kgf x cm	T_a s	V_a g/m	PD CV	PE CV	$\Delta W/PD$	K_T	J	$1-z$	$1-w_K$	η_D	η_D	η_R	η_{RR}
4.0	0.43	3.59	1.820	0.76	62.18	34.	21.	1632.6	0.148	0.701	1.028	0.918	0.636	0.640	0.899	1.120
5.0	0.65	4.37	2.680	1.14	75.69	60.	41.	1138.5	0.150	0.698	1.057	0.890	0.635	0.688	0.913	1.188
6.0	0.92	5.18	3.730	1.62	89.72	99.	74.	828.1	0.152	0.695	1.108	0.876	0.634	0.744	0.928	1.265
7.0	1.27	6.08	5.030	2.25	105.31	157.	119.	610.5	0.153	0.693	1.101	0.878	0.633	0.757	0.954	1.254
8.0	1.73	7.02	6.730	3.06	121.59	243.	182.	451.6	0.156	0.687	1.082	0.880	0.631	0.749	0.966	1.230
9.0	2.32	8.04	9.030	4.11	139.26	373.	267.	330.6	0.159	0.681	1.054	0.888	0.628	0.716	0.961	1.187
10.0	3.02	9.07	11.860	5.35	157.10	553.	387.	247.9	0.163	0.674	1.055	0.893	0.625	0.700	0.947	1.182
11.0	3.77	10.08	14.780	6.88	174.59	766.	545.	196.9	0.165	0.671	1.052	0.898	0.624	0.712	0.947	1.205
12.0	4.67	11.12	18.340	8.27	192.60	1048.	748.	156.9	0.168	0.666	1.098	0.901	0.621	0.713	0.941	1.219
13.0	5.92	12.35	23.130	10.48	213.91	1468.	1042.	121.4	0.172	0.658	1.116	0.912	0.617	0.710	0.940	1.223
14.0	7.83	13.38	30.170	13.88	231.75	2075.	1502.	92.5	0.194	0.618	1.127	0.861	0.595	0.724	0.930	1.308
15.0	11.22	15.08	41.320	19.87	261.19	3203.	2149.	64.2	0.219	0.572	1.051	0.839	0.564	0.671	0.950	1.252

Notes:

* 001 - Dislocamento rilevato in acqua

Appendages:

* 001 - Mantello con supporto
* 002 - Timone + asse a supporto

Modifications: —

Figura E.4: Foglio relativo alla prova di autopropulsione, nella campagna sperimentale relativa alla carena C2503.

Propeller No:1622-

Test No:001

Open Water Test

INSEAN

C.2503- Serie 006

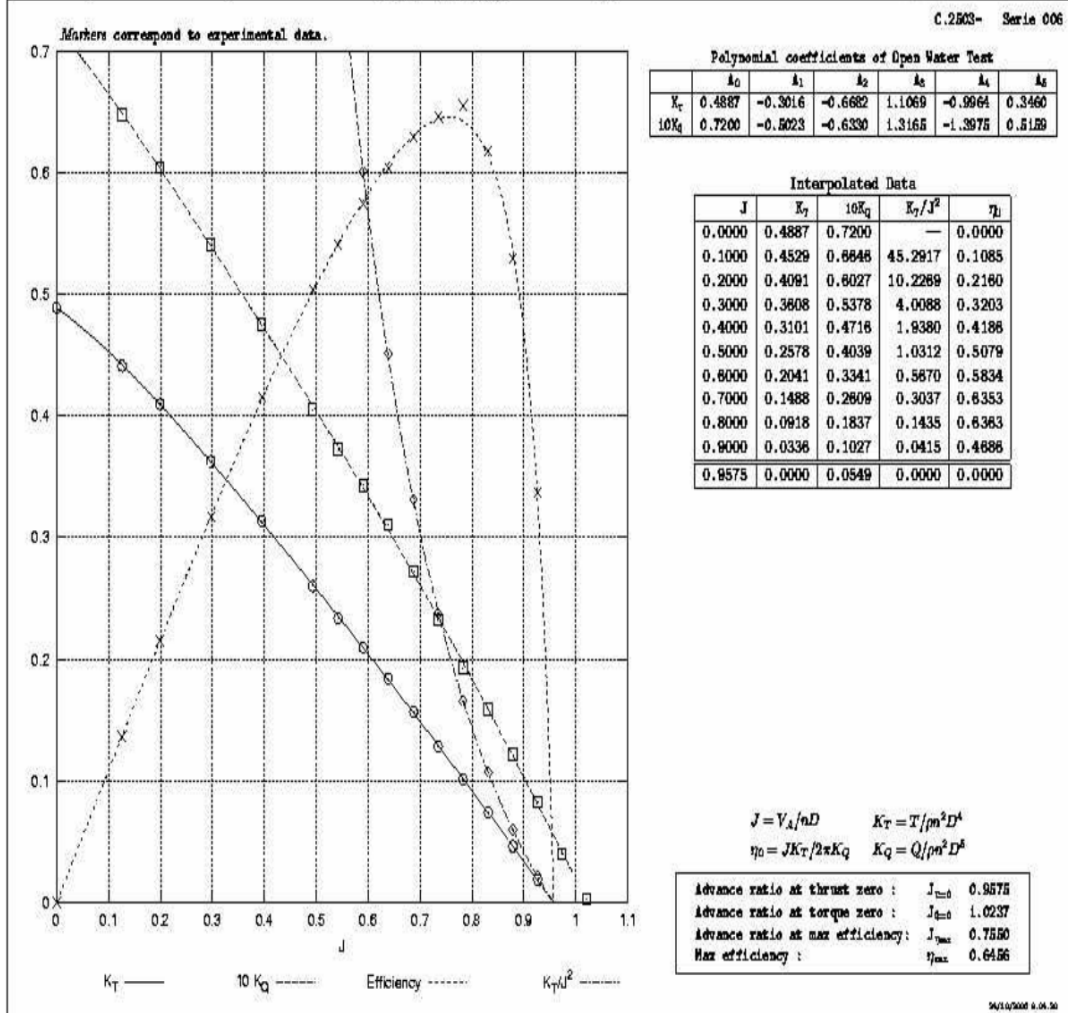


Figura E.5: Foglio relativo alle prestazioni del propulsore CNR-INSEAN E1622, in configurazione di elica isolata, nella campagna sperimentale relativa alla carena C2503.

Propeller No:1622-

Test No:01A

Open Water Test



C.2503- Serie 005

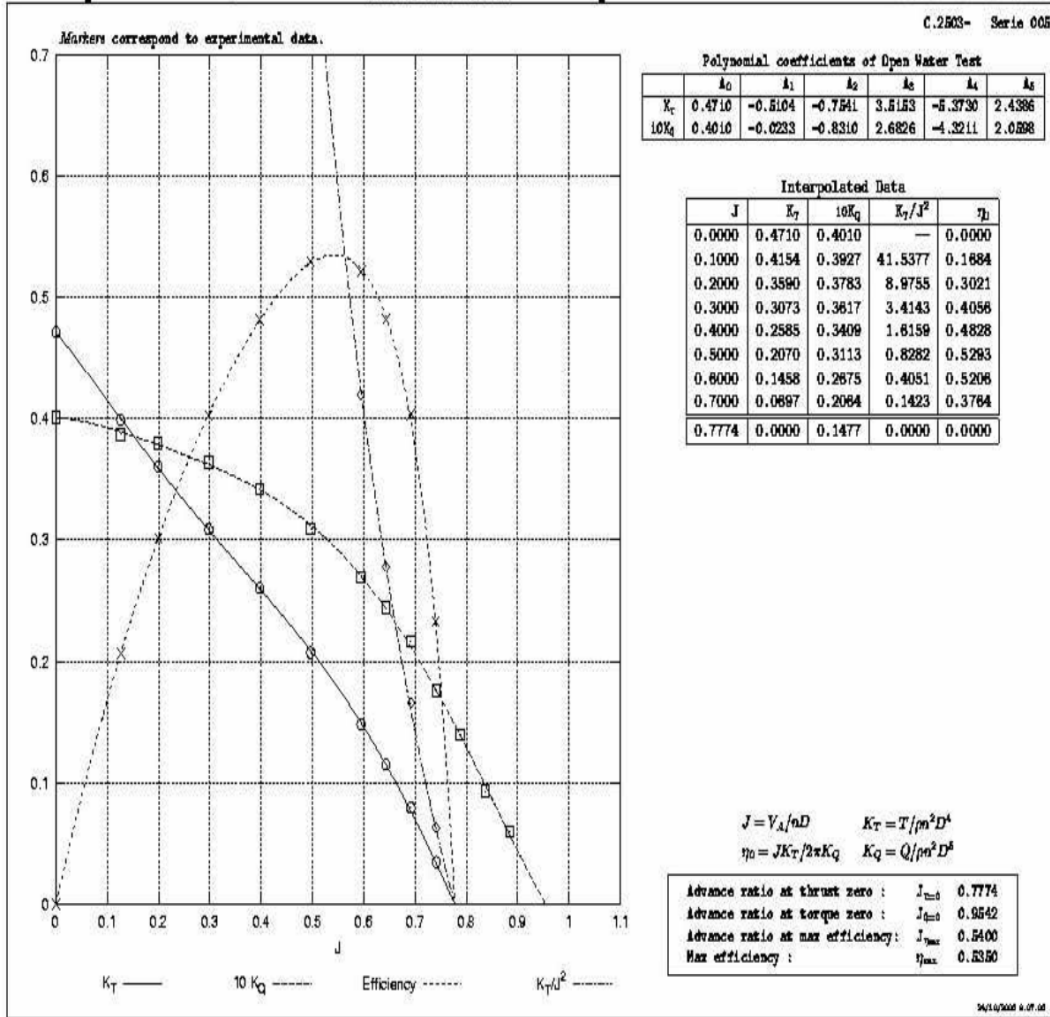


Figura E.6: Foglio relativo alle prestazioni del propulsore CNR-INSEAN E1622, in configurazione di elica intubata, nella campagna sperimentale relativa alla carena C2503.