



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

Vittorio BUCCI

Progetto di impianti di propulsione navale

5.5 SCELTA DEL MOTORE

Anno Accademico 2017/2018

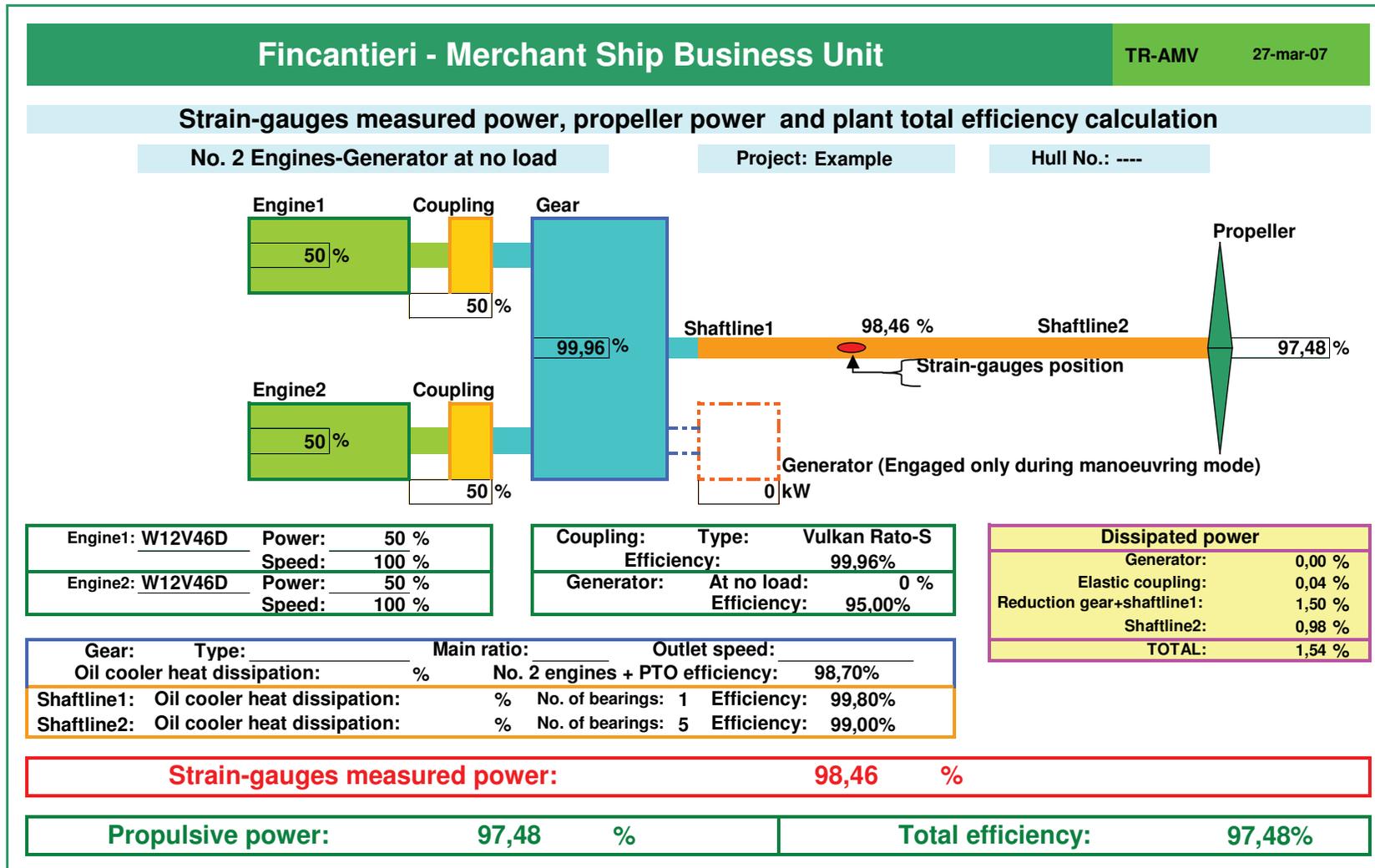
Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Confronto caratteristiche motori

- **Come visto in precedenza, i possibili fornitori di motori marini a 4T sono praticamente la MAN, la MAK e la Wärtsilä;**
- **Ricordando gli esempi del campo di utilizzazione del motore, si suppone di sviluppare il progetto di un traghetto con le seguenti assunzioni di base, già descritte nell'esempio dei campi di utilizzazione:**
 - ✓ **Impianto propulsivo con quattro motori, due riduttori di velocità, due linee d'alberi e due eliche a passo variabile;**
 - ✓ **Potenza totale alle eliche di circa 42.000 kW (P_0) necessaria per sviluppare la velocità contrattuale;**
 - ✓ **Sea Margin del 15% (SM_1) con il punto di funzionamento corrispondente circa ad una posizione del telegrafo in tacca n. 9 alla velocità nominale;**
 - ✓ **Alternatore asse di circa 1625 kW funzionante solo in manovra alla velocità di sincronismo del motore di 430 giri/min, corrispondente ad una posizione del telegrafo in tacca n. 6;**
 - ✓ **Sea Margin residuo del 3,0% (SM_2) con alternatore a carico nominale;**
 - ✓ **Rendimento totale della linea d'alberi del 97,48% (η), come risulta nel foglio di calcolo della pagina seguente;**

Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Confronto caratteristiche motori



Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Confronto caratteristiche motori

➤ Con tali dati si possono definire le seguenti potenze minime del motore (P_{\min}):

✓ Potenza necessaria per sviluppare la velocità contrattuale incluso SM_1 :

$$P_{\min 1} = (P_0 \times SM_1) / (4 \times \eta) = (42.000 \times 1,15) / (4 \times 0,9748) = 12.367 \text{ kW (1);}$$

✓ Potenza totale a 432,6 giri/min incluso SM_2 e alternatore asse a carico nominale:

$$P_6 = ((P_0 \times (V_6 / V_0)^3 \times SM_2) / (2 \times \eta) + P_{aa})/2 = \\ ((42.000 \times (430 / 500)^3 \times 1,03) / (2 \times 0,9748) + 1.625)/2 = 7.869 \text{ kW}$$

✓ Potenza alla velocità nominale corrispondente alla P_6 :

$$P_{\min 2} = P_6 \times (V_0 / V_6)^3 = 7.869 (500 / 430)^3 = 12.371 \text{ kW (2)}$$

➤ In base a tali valori il motore deve avere una potenza di circa 12.400 kW e si hanno le alternative riportate nella pagina successiva;

Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Confronto caratteristiche motori

Engine type			Wartsila 16V38B	Wartsila 16VZA40S	Wartsila 12V46C	Wartsila 12V46D	Wartsila 12V46F	Wartsila 6L64	MAN 12V48/60B	MAK 12VM43C
Characteristics and performance	Bore	[mm]	380	400	460	460	460	640	480	430
	Stroke	[mm]	475	560	580	580	580	900	600	610
	Stroke/Bore Ratio	μ	1,25	1,40	1,26	1,26	1,26	1,41	1,25	1,42
	No. Of cylinders	----	16	16	12	12	12	6	12	12
	Mean effective pressure	[bar]	26,92	25,08	26,14	28,76	25,94	26,74	26,53	27,09
	Mean piston speed	[m/s]	9,5	9,5	9,7	9,7	11,6	10,0	10,0	10,2
	Cylinder output	[kW _m]	725	750,0	1050,0	1155,0	1250,0	2150,0	1200,0	1000,0
	Power	[kW _m]	11600	12000	12600	13860	15000	12900	14400	12000
	Speed	[rpm]	600	510	500	500	600	333,3	500	500
	Brake specific fuel consumption	[g/kWh]	185	185	183	184	184	177	185	180
	Lubricating oil consumption	[g/kWh]	0,7	0,85	0,5	0,5	0,6	0,5	0,73	0,6
	Mep x Mps	[barm/s]	256	239	253	278	301	267	265	275
Weight and dimensions (ref. 46C engine)	Weight	[tons]	110	132	166	166	----	227	181	162
	Specific power	[kW/tons]	105,45	90,91	75,90	83,49	----	56,83	79,56	74,07
	Mean width [(C+I)/2]	[m]	2,589	3,095	3,35	3,35	----	3,36	3,49	3,16
	Length [F]	[m]	6,565	7,3	7,85	7,85	----	7,955	7,593	7,51
	Height [B+E]	[m]	4,50	5,267	5,164	5,164	----	6,269	5,44	4,99
	Volume	[m ³]	76,52	119,00	135,80	135,80	----	167,56	144,03	118,42
	Specific power	[kW/m ³]	151,60	100,84	92,78	102,06	----	76,99	99,98	101,33

Impianti di propulsione navale

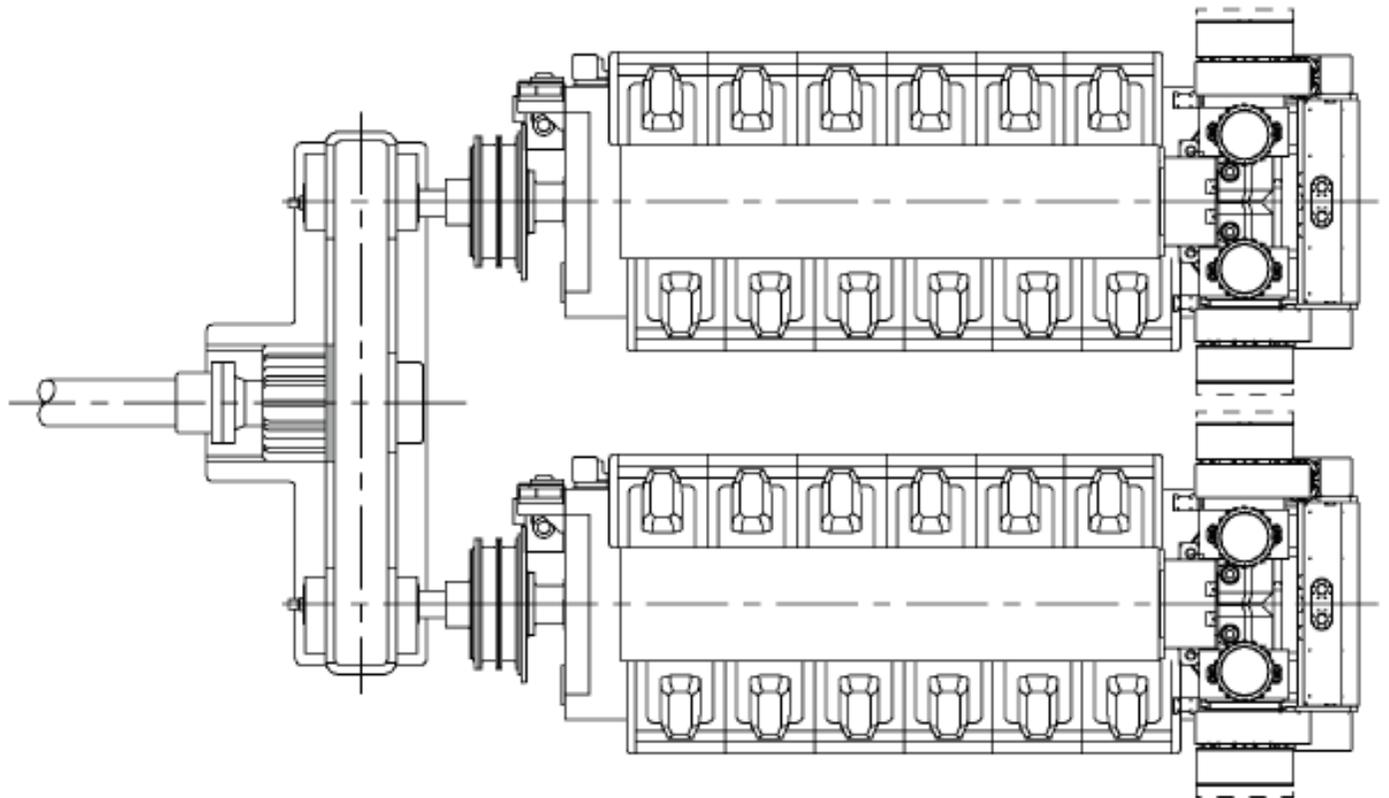
Motori diesel 4T – Confronto caratteristiche motori

- **Dall'esame della tabella si evince quanto segue:**
 - ✓ **I motori Wärtsilä 16V38B, Wärtsilä 16VZA40S e MAK 12V43C erogano una potenza inferiore alla minima richiesta;**
 - ✓ **I motori Wärtsilä 12V46D, Wärtsilä 12V46F e MAN 12V48/60B erogano una potenza troppo superiore alla minima richiesta;**
 - ✓ **Il motore Wärtsilä 6L64 ha un peso ed un'altezza troppo elevati che rendono non semplice l'installazione su traghetti;**
- **Il motore più idoneo per l'applicazione in oggetto è pertanto il Wärtsilä 12V46C;**
- **Nel seguito si farà riferimento a tale motore per illustrare tutti i layout dei circuiti dei fluidi di servizio;**

Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Confronto caratteristiche motori

- Vista in pianta di un impianto bi-motore tipico con il motore 12V46C e riduttore doppio ingresso:

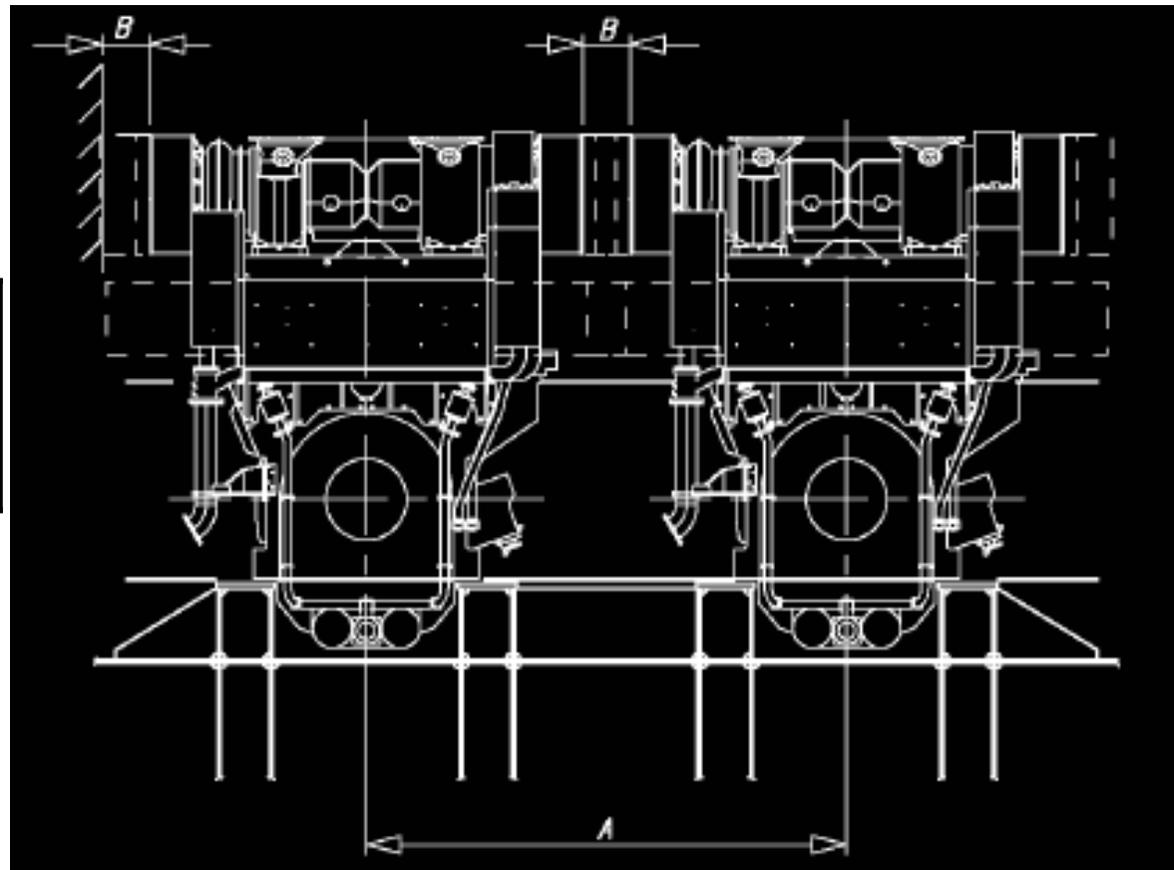


Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Confronto caratteristiche motori

- Vista in sezione dei due motori 12V46C con indicate le quote minime dello spazio di smontaggio della turbosoffiante tipo TPL 73 e dell'interasse dei motori:

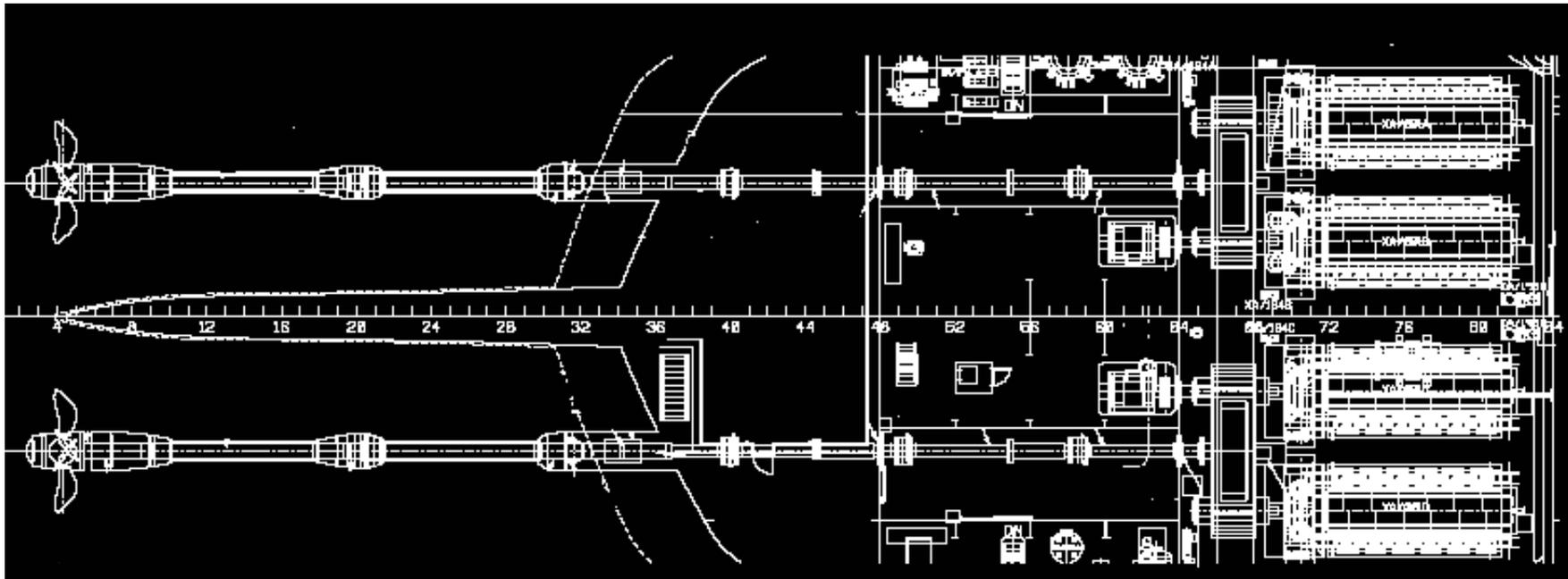
Quota	“A”	“B”
Minima	4700	200
Raccom.	4900	350



Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Confronto caratteristiche motori

- Vista in pianta della sistemazione di un impianto propulsivo con quattro motori 12V46C, due riduttori con P.T.O secondaria ed alternatore asse, due linee d'alberi ed eliche a passo variabile;
- Tale impianto sarà preso come riferimento per illustrare la documentazione tipica di un impianto propulsivo con motori diesel medium speed.



Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Dati di progetto del motore

➤ Condizioni ambientali di riferimento:

Le prestazioni e i parametri di funzionamento del motore sono determinati alle seguenti condizioni di riferimento, che sono in accordo con quelle della norma ISO 3046-1:

- ✓ Temperatura aria aspirazione : 25 °C
- ✓ Temperatura aria in sala macchine : 25 °C
- ✓ Temperatura acqua prima del refrigerante aria : 25 °C (Acqua dolce)
- ✓ Pressione barometrica : 1000 mbar
- ✓ Potere calorifico inferiore del combustibile : 42,7 MJ/kg

➤ Condizioni di progetto:

I parametri di progetto degli ausiliari sono determinati alle seguenti condizioni di riferimento definite “tropicali”:

- ✓ Temperatura aria aspirazione : 45 °C
- ✓ Temperatura aria in sala macchine : 45 °C
- ✓ Temperatura acqua prima del refrigerante aria : 38 °C (Acqua dolce)
- ✓ Pressione barometrica : 1000 mbar
- ✓ Potere calorifico inferiore del combustibile : 42,7 MJ/kg

Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Dati di progetto del motore

- **Come è stato illustrato nel capitolo relativo ai campi di utilizzazione del motore, definito il tipo di motore in base alla potenza necessaria per fare la velocità contrattuale nave, è definita in modo univoco anche la sua la potenza massima continuativa (MCR);**

- **Il tipo di motore deve poi essere configurato per ottenere la versione più idonea per l'impianto in progetto. I passi principali delle scelte da eseguire sono i seguenti:**
 - ✓ **Applicazione a velocità costante o variabile e definizione velocità nominale;**
 - ✓ **Senso di rotazione orario o antiorario;**
 - ✓ **Posizione turbosoffiante lato volano o estremità libera;**
 - ✓ **Combustibile LFO o HFO;**
 - ✓ **Impianto con o senza P.T.O.;**
 - ✓ **Tensione alimentazione motori elettrici e sistema di monitoraggio;**
 - ✓ **Pompe olio, acqua AT e BT trascinate o elettropompe esterne;**
 - ✓ **Connessioni per elettropompe di stand-by;**
 - ✓ **Tipo di regolatore di velocità**
 - ✓ **Collegamento alle fondazioni rigido o con sospensioni elastiche;**
 - ✓ **Dotazioni di parti di ricambio e attrezzi;**

Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Dati di progetto del motore

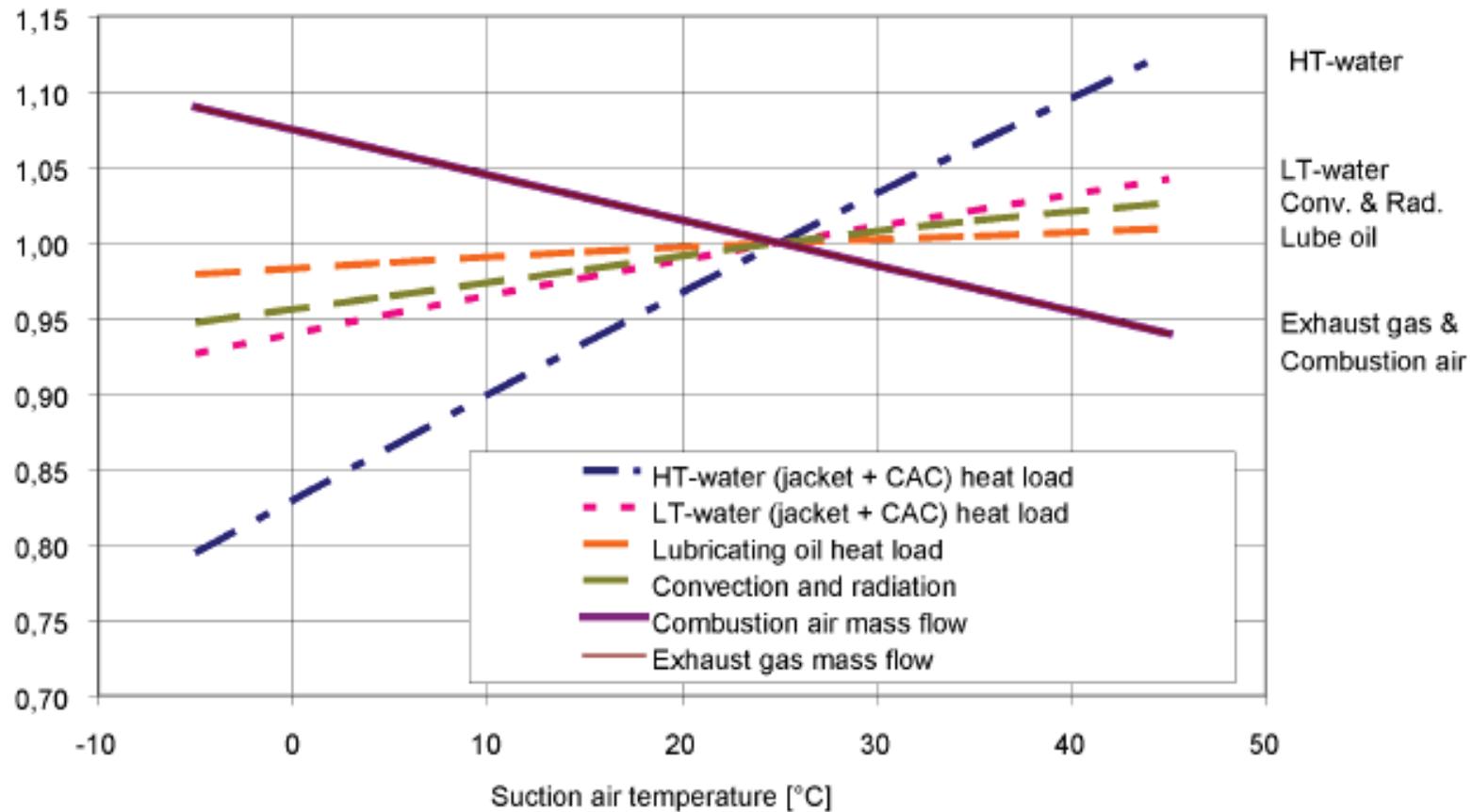
- **Il costruttore del motore fornisce normalmente tutti i dati tecnici necessari per sviluppare il progetto, tra i quali i principali sono i seguenti:**
 - ✓ **Pesi, disegni di ingombro e dati tecnici del motore e degli ausiliari;**
 - ✓ **Portate, pressioni e temperature di tutti i fluidi di servizio;**
 - ✓ **Portata e temperatura dell'aria comburente e dei gas di scarico;**
 - ✓ **Calorie da dissipare per eseguire il bilancio termico del motore;**
 - ✓ **Consumi e perdite orarie di combustibile e olio lubrificante;**
 - ✓ **Istruzioni operative per l'installazione e l'allineamento del motore;**
 - ✓ **Livelli di rumorosità aerea intorno al motore e di rumorosità allo scarico;**
 - ✓ **Schemi di tutti i circuiti dei fluidi di servizio interni ed esterni al motore;**
 - ✓ **Raccomandazioni per il disegno delle tubazioni e dei collegamenti con flessibili;**
 - ✓ **Descrizione delle funzionalità del sistema di automazione del motore;**
 - ✓ **Istruzione per la conservazione del motore e degli ausiliari;**

- **Le calorie da dissipare, la portata e temperatura dei gas di scarico sono normalmente forniti per una temperatura dell'aria di aspirazione di 25 °C. Per temperature differenti, tali valori devono essere corretti come indicato nei successivi grafici:**

Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Dati di progetto del motore

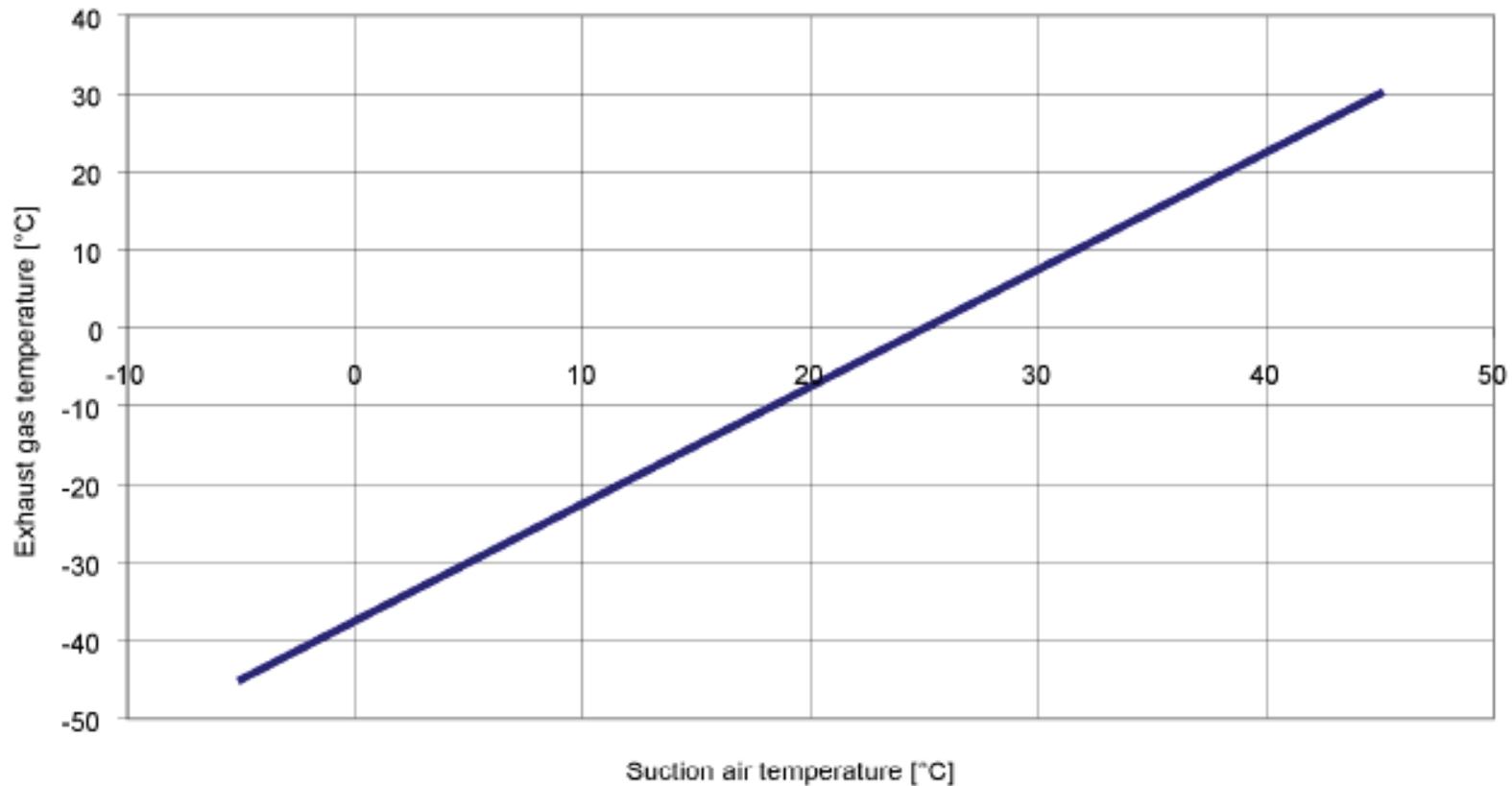
Calore da dissipare in funzione della temperatura dell'aria aspirazione



Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Dati di progetto del motore

Variazione temperatura gas di scarico in funzione temperatura aria aspirazione



Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Dati di progetto del motore

Wärtsilä 12V46

Cylinder configuration	12 V
Engine speed	500 rpm
Engine output	12600 kW
Bore	460 mm
Stroke	580 mm
Mean effective pressure	2.61 MPa
Mean piston speed	9.7 m/s

Combustion air system (Note 1)

Flow of air at 100% load	21.4 kg/s
Ambient air temperature, max	45 °C
Air temperature after air cooler, min	40 °C
Air temperature after air cooler, max	70 °C
Air temperature after air cooler, alarm	75 °C

Note 1 At ISO 3046-1 conditions (ambient air temperature 25°C, LT-water 25°C) and 100% load. Tolerance 5%.

Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Dati di progetto del motore

Exhaust gas system (Note 2)

Exhaust gas flow at 100% load	22.0 kg/s
Exhaust gas flow at 85% load	19.9 kg/s
Exhaust gas flow at 75% load	17.6 kg/s
Exhaust gas flow at 50% load	10.7 kg/s
Exhaust gas temperature after turbocharger at 100% load	380 °C
Exhaust gas temperature after turbocharger at 85% load	321 °C
Exhaust gas temperature after turbocharger at 75% load	318 °C
Exhaust gas temperature after turbocharger at 50% load	371 °C
Exhaust gas backpressure, max	3.0 kPa
Turbocharger connection diameter	600 mm
Exhaust gas pipe diameter, min	1200 mm
Calculated exhaust diameter for 35 m/s	1213 mm

Note 2 At ISO 3046-1 conditions (ambient air temperature 25°C, LT-water 25°C) and 100% load. Flow tolerance 5% and temperature tolerance 15°C.

Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Dati di progetto del motore

Heat balance (Note 3)

Jacket water	1420 kW
Charge air (HT-circuit)	2640 kW
Charge air (LT-circuit)	1190 kW
Lubrication oil	1400 kW
Radiation etc.	450 kW

Note 3 At ISO 3046-1 conditions (ambient air temperature 25°C, LT-water 25°C) and 100% load. Distribution of heat within the balance has a tolerance of 10%. Fouling factors and a margin to be taken into account when dimensioning the heat exchangers (lubricating oil cooler, central cooler).

Fuel system (Note 4)

Pressure before injection pumps, min	800.0 kPa
Viscosity before engine (MDF), min	2.8 cSt
Viscosity range before the engine (HFO)	20...24 cSt
Temperature before engine, max	135 °C
Fuel consumption at 85% load	174 g/kWh
Leak fuel quantity (MDF), clean fuel at 100% load	45.0 kg/h
Leak fuel quantity (HFO), clean fuel at 100% load	9.0 kg/h

Note 4 According to ISO 3046/1, lower calorific value 42700 kJ/kg, without engine driven pumps. Tolerance 5%. According to propeller law.

Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Dati di progetto del motore

Lubricating oil system	
Pressure before engine, nom	400 kPa
Pressure before engine, alarm	300 kPa
Pressure before engine, stop	200 kPa
Priming pressure, nom	80 kPa
Priming pressure, alarm	50 kPa
Temperature before engine, nom	63 °C
Temperature before engine, alarm	70 °C
Temperature after engine, about	78 °C
Pump capacity (main), engine driven	263 m ³ /h
Suction height of engine driven pump, max	4 m
Pump capacity (main), separate	210 m ³ /h
Priming pump capacity (50Hz)	65.0 m ³ /h
Suction height of priming pump, max	3.5 m
System oil tank volume	1.2...1.5 l/kW
Filter fineness	20 microns
Filter difference pressure alarm	80 kPa
Oil consumption at 100% load, about	0.5 g/kWh

Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Dati di progetto del motore

HT cooling water system	
Pressure at engine inlet, after pump, nom	250 (+ static kPa pressure)
Pressure at engine inlet, after pump, alarm (+ static pressure)	100 (+ static kPa pressure)
Pressure at engine inlet, after pump, max	480 kPa
Temperature before engine, about	74 °C
Temperature at the engine outlet, nom	82 °C
Temperature after cylinders, alarm	105 °C
Temperature after cylinders, stop	110 °C
Pump capacity, nom	270 m ³ /h
Pressure drop over engine	50 kPa
Water volume in engine	1.7 m ³
Pressure from expansion tank at the engine driven water pump inlet	70...150 kPa
Pressure drop over central cooler, max	60 kPa
Delivery head of stand-by pump	250 kPa

Impianti di propulsione navale

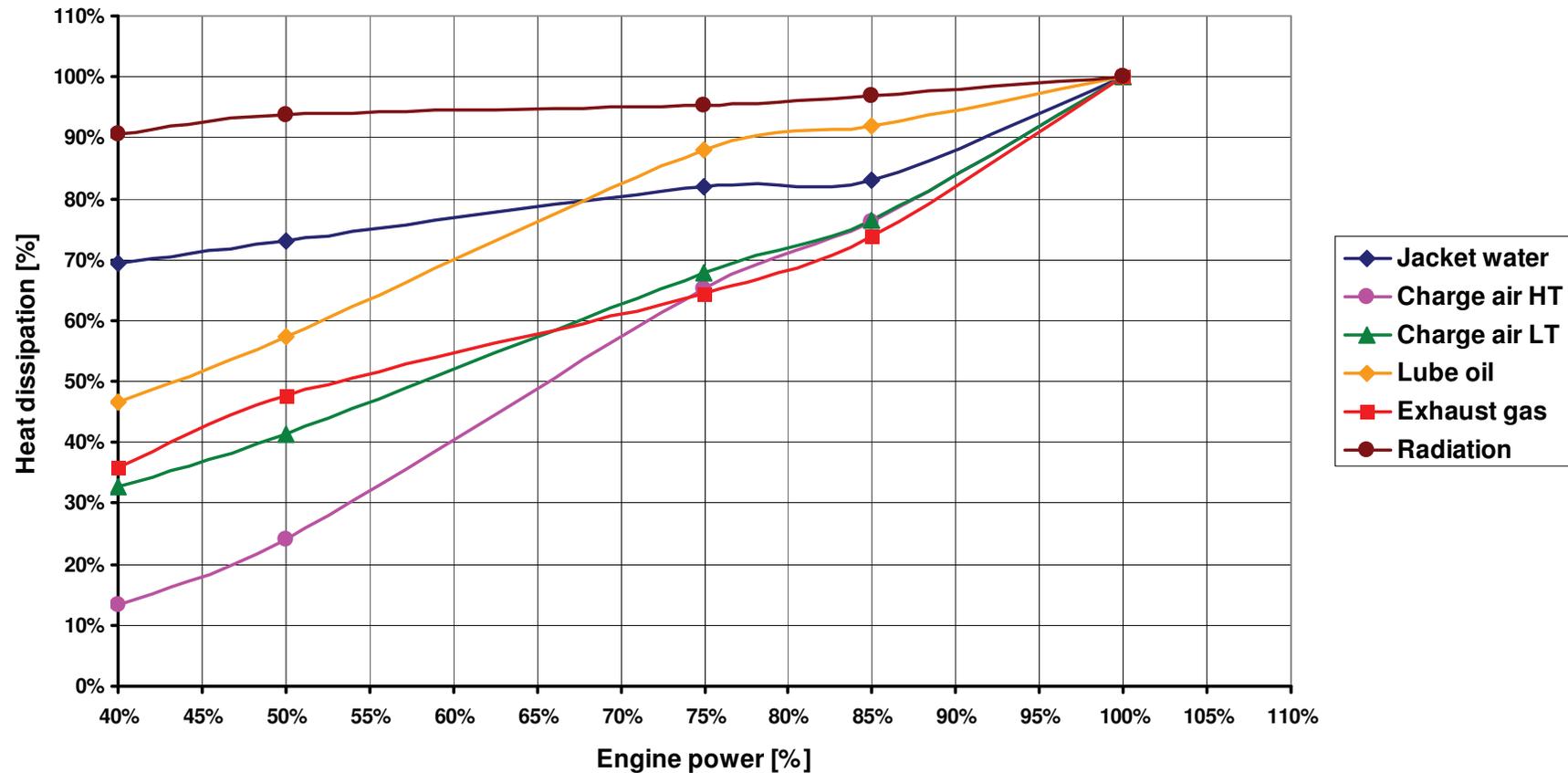
Motori diesel 4T – Dati di progetto del motore

LT cooling water system	
Pressure at engine inlet, after pump, nom (+ static pressure)	250 (+ static kPa pressure)
Pressure at engine inlet, after pump, alarm (+ static pressure)	100 (+ static kPa pressure)
Pressure at engine inlet, after pump, max	440 kPa
Temperature before engine, max	38 °C
Temperature before engine, min	25 °C
Pump capacity, nom	270 m ³ /h
Pressure drop over charge air cooler	30 kPa
Pressure drop over oil cooler	50 kPa
Pressure drop over central cooler, max	60 kPa
Pressure from expansion tank at the engine driven water pump inlet	70...150 kPa
Starting air system	
Air pressure, nom	3000 kPa
Air pressure, alarm	1800 kPa
Air consumption per start at 20 °C	6.0 Nm ³

Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Dati di progetto del motore

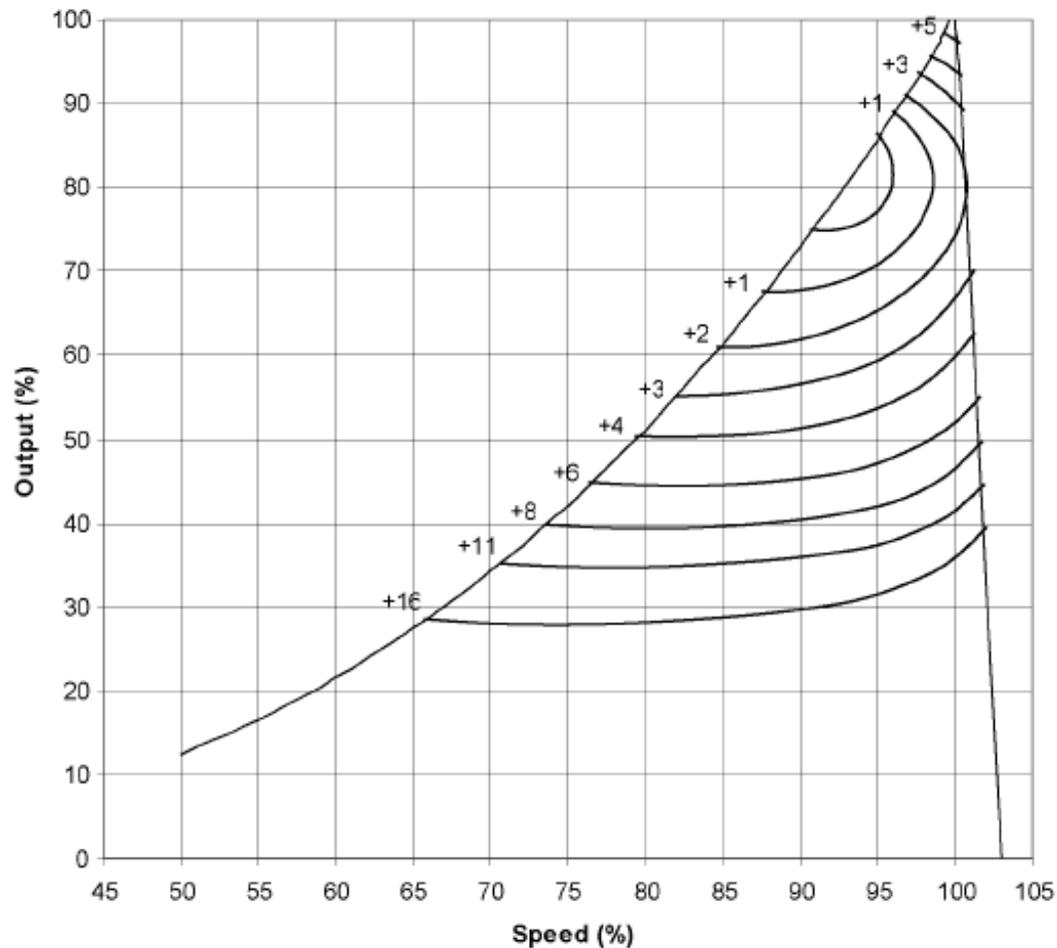
Wartsila V46C Engine - Heat dissipation versus engine power



Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Dati di progetto del motore

- **Variazione del consumo specifico di combustibile in funzione del carico per un motore propulsivo funzionante a velocità variabile;**



Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Dati di progetto del motore

- **Maggiorazione del consumo di combustibile in funzione della tipologia di pompe trascinate:**

		Engine load [%]			
		50	75	85	100
Constant speed	Lubricating oil pump	4.0	3.0	2.5	2.0
	HT- & LT-pump total	2.0	1.6	1.3	1.0
Propeller law	Lubricating oil pump	2.0	2.0	2.0	2.0
	HT- & LT-pump total	1.0	1.0	1.0	1.0

Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Accenni sugli aspetti vibratori

- I motori 4T installati su navi crociera e su traghetti sono sempre montati su sospensione elastica, che ha il duplice obiettivo di:
 - ✓ Attenuare la trasmissione della rumorosità strutturale dal motore alle strutture di scafo;
 - ✓ Separare il motore dalle strutture di scafo ed evitare la trasmissione di sollecitazioni indotte dalle deformazioni di scafo generate da variazioni di carico o da mare molto mosso;
- Un motore sospeso elasticamente trasmette meno vibrazioni ma come corpo rigido vibra, con 6 gradi di libertà, più di un motore installato rigido sulle fondazioni;
- Tali vibrazioni sono eccitate dagli inevitabili squilibri generati dalle tolleranze di peso e dai momenti esterni, che sono significativi solo per il 9 e il 18 cilindri, come indicato nella seguente tabella;

Engine	Speed [rpm]	Frequency [Hz]	M _Y [kNm]	M _Z [kNm]	Frequency [Hz]	M _Y [kNm]	M _Z [kNm]	Frequency [Hz]	M _Y [kNm]	M _Z [kNm]
9L46	500	8.3	–	–	16.7	80.7	–	33.3	4.0	–
	514	8.6	–	–	17.1	85.3	–	34.3	4.2	–
18V46	500	8.3	293.8	293.8	16.7	141.4	58.6	33.3	–	4.1
	514	8.6	310.5	310.5	17.1	149.4	61.9	34.3	–	4.4

– couples are zero or insignificant

- Conseguenza di tale maggiore vibrazione è anche la necessità di collegare con elementi flessibili, tubi e compensatori, tutti i terminali delle tubazioni dei fluidi di servizio, inclusa la condotta gas di scarico;

Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Accenni sugli aspetti vibratori

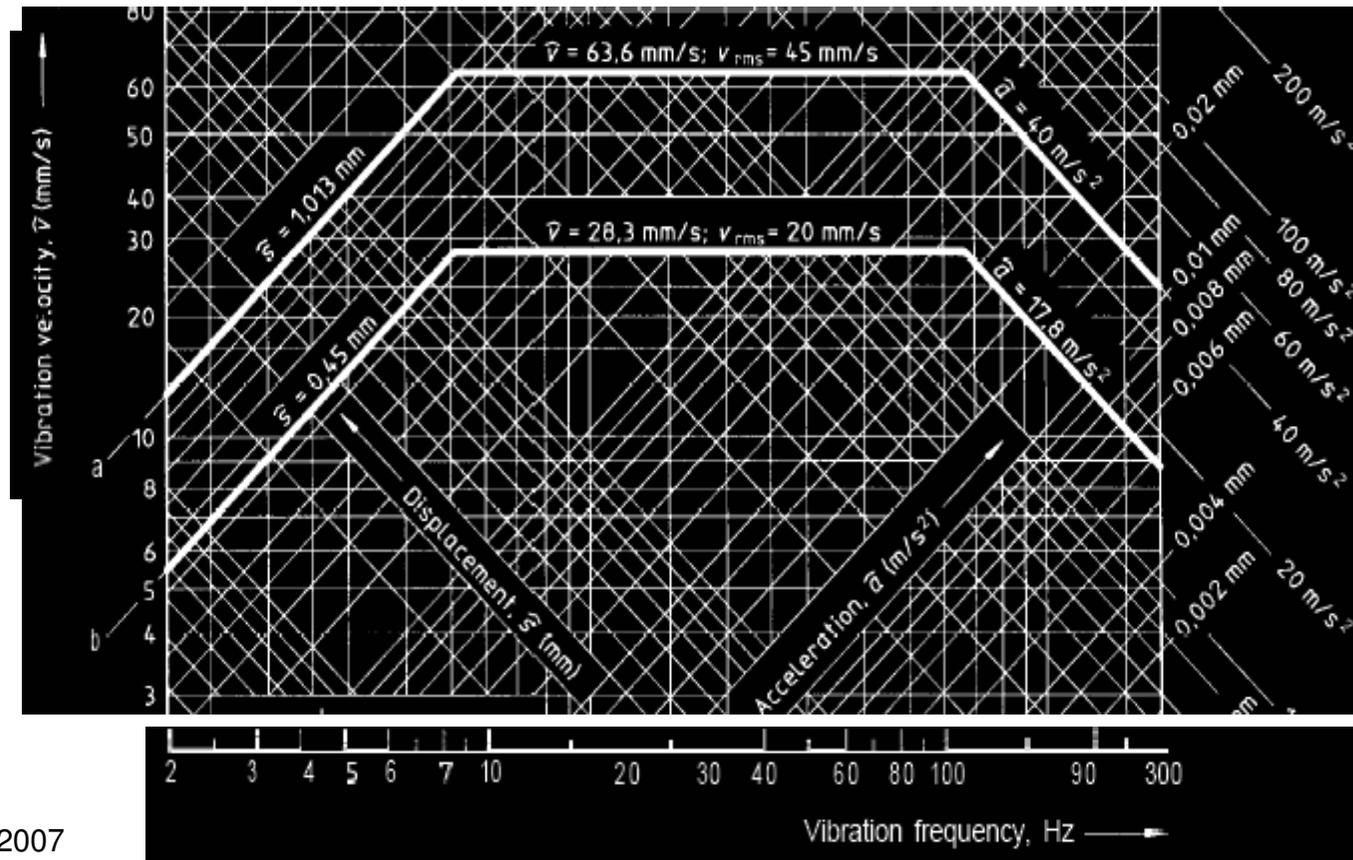
- La coppia di reazione, uguale e contraria a quella motrice, per un motore sospeso elasticamente genera:
 - ✓ uno spostamento statico che deve essere considerato per l'allineamento del motore;
 - ✓ una vibrazione di rollio, rotazione intorno all'asse "X", con frequenza dipendente dal numero di cilindri e dalla configurazione in linea o a "V" del motore;
- La seguente tabella riporta per il motore a 12 cilindri le componenti armoniche di 3°, 6° e 9° ordine della fluttuazione della coppia motrice a pieno carico e a vuoto:

Engine	Speed [rpm]	Frequency [Hz]	M _x [kNm]	Frequency [Hz]	M _x [kNm]	Frequency [Hz]	M _x [kNm]
12V46	500	25.0	77.4	50.0	70.2	75.0	17.1
	514	25.7	71.9	51.4	70.7	77.1	17.7
12V46, idle	500	25.0	53.4	50.0	17.0	75.0	5.6
	514	25.7	58.0	51.4	17.1	77.1	5.6

Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Livelli di vibrazioni ammissibili

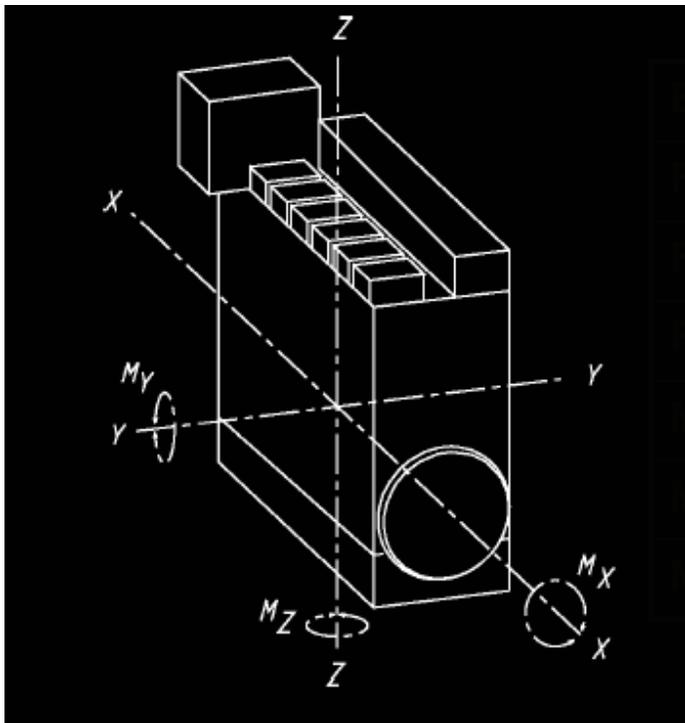
- In generale, se non specificato diversamente, i livelli vibratori di un motore devono essere inferiori a quelli raccomandati dalla norma ISO 8528-9, della quale è riportato un estratto del grafico riepilogativo che indica un valore limite di velocità media efficace (V_{rms}) di 45 e 20 mm/s rispettivamente per il motore e il generatore;



Impianti di propulsione navale

Motori diesel 4T – Livelli di vibrazioni ammissibili

- Tuttavia, considerando che i livelli di velocità di vibrazione tendono ad aumentare con il tempo, in un impianto nuovo si dovrebbero avere valori sensibilmente inferiori a quelli raccomandati dalla normativa. Un obiettivo ragionevole è di avere livelli pari a circa il 60% di quelli raccomandati, cioè circa un $V_{rms} = 27$ mm/s per il motore nel campo di frequenza tra 10 e 100 Hz;
- Le forze eccitanti, gli spostamenti e le rotazioni sono correlate come segue:



Eccitazione	Spostamento	Rotazione
Forza direzione "X"	Lungo "X"	Intorno "Y" / "Z"
Forza direzione "Y"	Lungo "Y"	Intorno "X" / "Z"
Forza direzione "Z"	Lungo "Z"	Intorno "X" / "Y"
Momento " M_x "	Lungo "Y" / "Z"	Intorno "X"
Momento " M_y "	Lungo "X" / "Z"	Intorno "Y"
Momento " M_z "	Lungo "X" / "Y"	Intorno "Z"