



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

Vittorio BUCCI

Progetto di impianti di propulsione navale

9.11 IMPIANTI DI RAFFREDDAMENTO

Anno Accademico 2017/2018

CIRCUITI DI RAFFREDDAMENTO

Come primo approccio possiamo dividere i circuiti di raffreddamento in due famiglie:

- circuiti aperti
- circuiti chiusi

I circuiti aperti, parlando di raffreddamenti di Apparato Motore (da adesso AM) sono quelli in cui il fluido refrigerante una volta esaurito il suo compito, assorbire calore da un altro fluido caldo, è scaricato a mare.

Per cui è facile intuire che tutti i circuiti acqua mare di raffreddamento sono da intendersi come circuiti aperti.

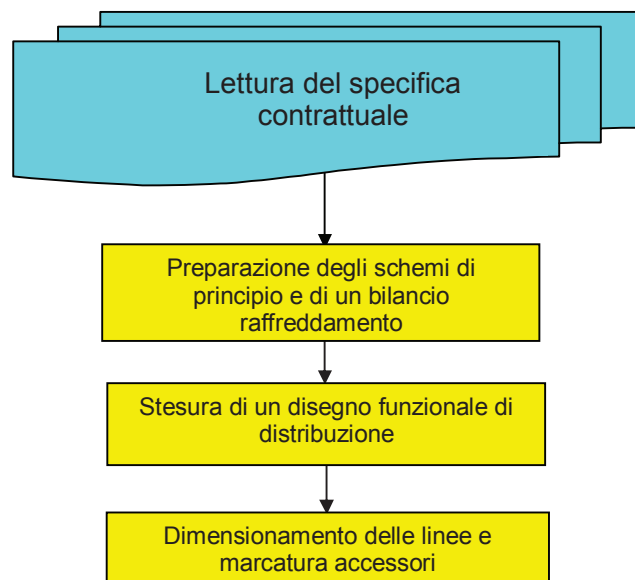
Pur non entrando nella categoria dei circuiti refrigeranti di AM, ma per centrare meglio la famiglia di questi sistemi possiamo associare a questa categoria anche la sentina, la zavorra, gli ombrinali esterni e l'acqua di circolazione ai condensatori condizionamento.

I circuiti chiusi sono quelli in cui il fluido una volta compiuto il suo ciclo di raffreddamento e quindi dopo aver assorbito quantità di calore smaltite da vari impianti/macchinari viene circolato attraverso dei refrigeranti nei quali cede il calore in eccesso ad un fluido di un circuito aperto. Come detto per i circuiti aperti si evince che in questo caso tutti i circuiti di raffreddamento che utilizzino acqua dolce o fluidi diversi dall'acqua mare sono dei circuiti chiusi.

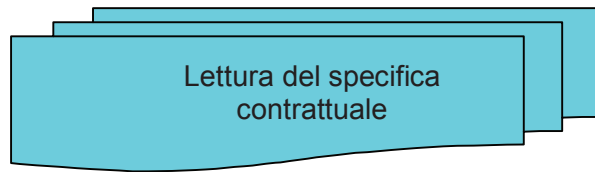
Indicazioni per la Progettazione di un Impianto di Raffreddamento

Impostazione di un Impianto

Il seguente diagramma a blocchi indica a grandi linee le varie fasi necessarie per l'impostazione ed il successivo sviluppo di un circuito di raffreddamento.



Specifica Contrattuale



Come per tutti i sistemi la attenta, accurata lettura ed interpretazione del specifica contrattuale è determinante per la valutazione del tipo di ingegneria richiesta. Infatti dalla esatta decifrazione di tale documento si possono produrre degli schemi di principio che permettono una valutazione dei desiderata per i vari impianti di raffreddamento e individuare degli eventuali intercollegamenti tra vari sistemi di raffreddamento stessi.

Oltre a quanto sopra gli schemi di principio sono utili nella stesura del bilancio di raffreddamento, documento basilare per la definizione delle caratteristiche dei macchinari (pompe, refrigeranti etc.) ed indispensabile per il dimensionamento delle prese a mare e dei relativi cross-over.

Preparazione di un bilancio di raffreddamento

Bilancio Raffreddamento

Come già detto per il bilancio vapore, quanto più pignolescamente è redatto tanto più è accurata sarà la valutazione dei dimensionamenti e lo studio preliminare di distribuzione delle linee dei vari circuiti unitamente alla definizione del tipo, quantità e caratteristiche macchinari.

Dopo aver identificato i vari circuiti di raffreddamento (es. Alta Temperatura . DD/AA, Bassa Temperatura DD/AA, Bassa Temperatura aux. etc.) si:

- verificano le condizioni per cui, specialmente per i motori, si deve progettare l' impianto (condizioni ISO o TROPICALI)
 - CONDIZIONI ISO
 - *Temperatura aria* 25 °C
 - *Pressione aria* 100 kPa
 - *Temperatura acqua raff. ingresso motore* 25 °C
 - CONDIZIONI TROPICALI
 - *Temperatura aria* 45 °C
 - *Pressione aria* 100 kPa
 - *Temperatura acqua raff. ingresso motore* 38 °C

- verificano tutti gli input da specifica contrattuale (temperatura di progetto acqua mare, temperatura max. acqua dolce di raffreddamento etc)
- elencano, circuito per circuito, tutti gli utenti che necessitano di raffreddamento avendo cura di conoscere:
 - il calore da dissipare (kW) o le temperature di ingresso/uscita dell' acqua di raffreddamento dall' utente
 - la quantità d' acqua prevista dal Fornitore per dissipare il calore di cui sopra
 - se gli utenti in parallelo, aventi la stessa funzione, sono tutti in servizio oppure uno o più sono in stand-by)
 - la perdita di carico dell' utente

Fatto quanto sopra si parte con il calcolo per trovare, circuito per circuito, le quantità teoriche del:

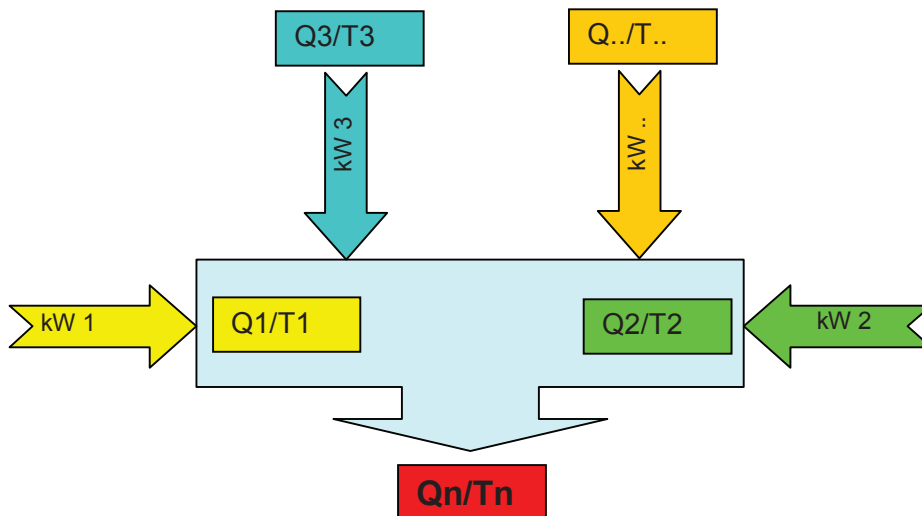
- calore totale da dissipare (kW)
- flusso totale dell' acqua dolce di raffreddamento
- la temperatura finale dell' acqua dolce di raffreddamento una volta refrigerati tutti gli utenti (ingresso acqua dolce al refrigerante).
- Perdite di carico totali degli utenti

Una volta in possesso di questi valori si può calcolare la quantità d' acqua mare necessaria a smaltire il calore accumulato dall' acqua dolce.

E' buona norma che l' acqua mare, dopo aver assorbito il calore ceduto dall' acqua dolce, NON superi mai i 48°C per evitare, a temperature superiori, la precipitazione dei sali in essa contenuti, precipitazione che porterebbe alla formazione di incrostazioni ed alla corrosione delle tubolature di questo impianto. Per avere un margine di sicurezza è comune pratica limitare questa temperatura a 45°C.

A questo punto si possono definire le caratteristiche di pompe e refrigeranti applicando i principi e le formule di seguito indicati.

Si stabiliscono portata e temperatura del fluido da refrigerare



$$Q_n = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{..}$$

$$T_n = \frac{(Q_1 \times T_1) + (Q_2 \times T_2) + (Q_3 \times T_3) + (Q_{..} \times T_{..})}{Q_n}$$

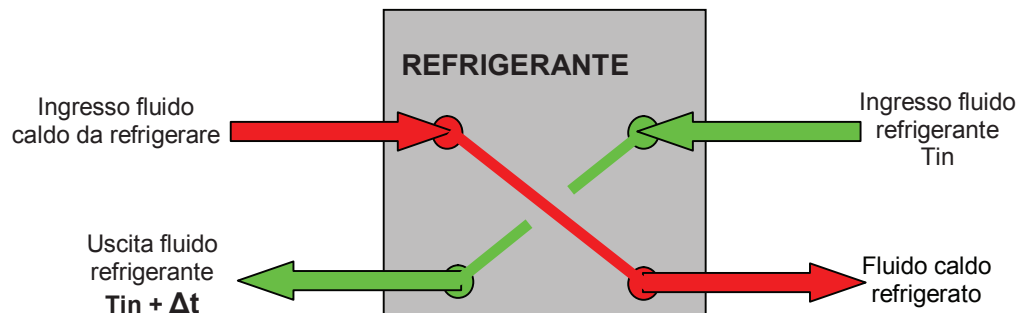
Note le caratteristiche del fluido da refrigerare e conseguentemente le caratteristiche delle pompe di circolazione, con la semplice formula sottoriportata si può determinare il flusso del fluido refrigerante Q_r , in questo caso acqua mare, e quindi stabilire le capacità delle pompe di circolazione acqua mare e dei relativi refrigeranti.

$$Q_r(m^3/h) = \frac{P(kcal/h) \times c.s \times 1000}{\Delta t (^{\circ}C)}$$

$$P(kcal/h) = (kW_1 + kW_2 + kW_3 + kW_{..}) \times 860$$

$c.s = 1 \text{ kcal/kg } ^{\circ}C$ (nel caso dell' acqua). Ovviamente per altri fluidi tale valore deve essere rivisto.

$\Delta t (^{\circ}C) = 13 ^{\circ}C$. I $13 ^{\circ}C$ sono stati assunti partendo dal concetto prima espresso che l' acqua mare di raffreddamento in entrata la troviamo sempre a $32^{\circ}C$ e che in uscita non deve superare i $45^{\circ}C$.



Un volta conosciuti i valori teorici, le pompe ed i refrigeranti sono scelti considerando le taglie esistenti in commercio che, per eccesso, più si avvicinano al nostro valore teorico.

Teniamo inoltre in considerazione:

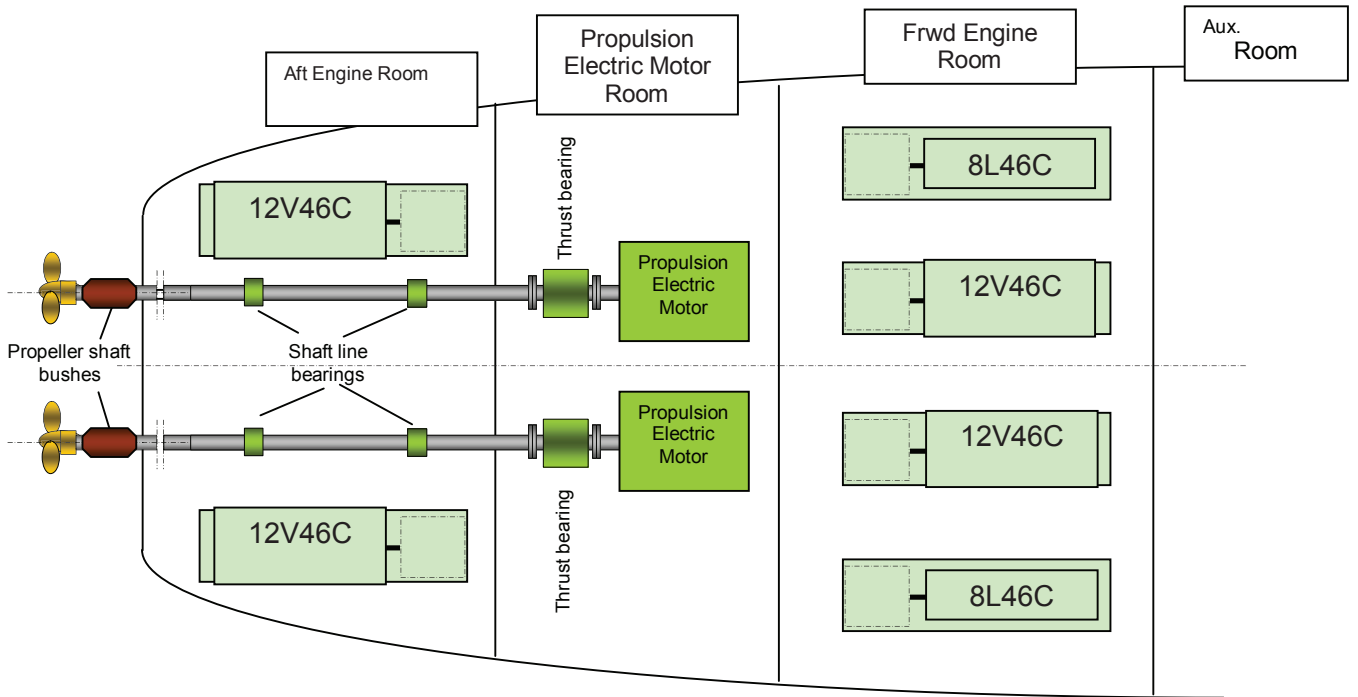
Pompe: la prevalenza deve tener conto oltre alle perdite di carico calcolate nel bilancio anche di quelle possibili nei tubi del circuito.

Refrigeranti: Il Costruttore dovrà fornirci una macchina che dia le prestazioni da richieste anche quando la sua macchina ha un certo valore di sporramento (fouling factor o duty margin) che solitamente è del 15%.

L' esempio di bilancio di seguito riportato, di una nave già in esercizio, esplicita quanto detto nelle precedenti pagine.

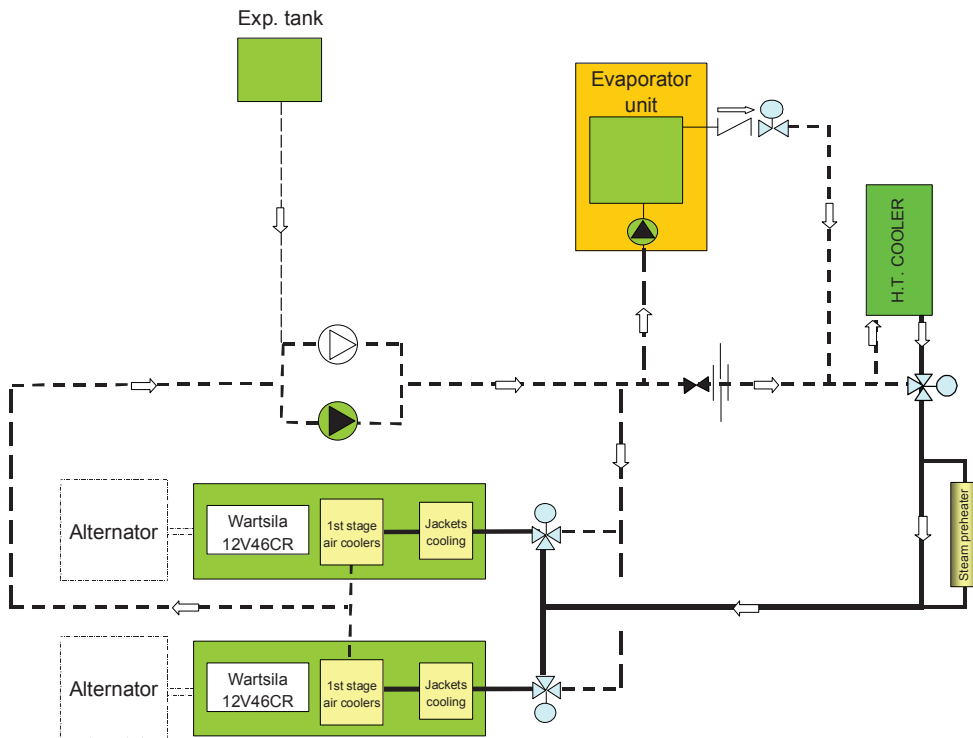
Esempio di Bilancio Raffreddamento di una Nave da Crociera

Sistemazione Apparato Motore



AFT DD/AA HIGH TEMPERATURE

Cooling system energy dissipation (two DD/AA 100% of MCR)

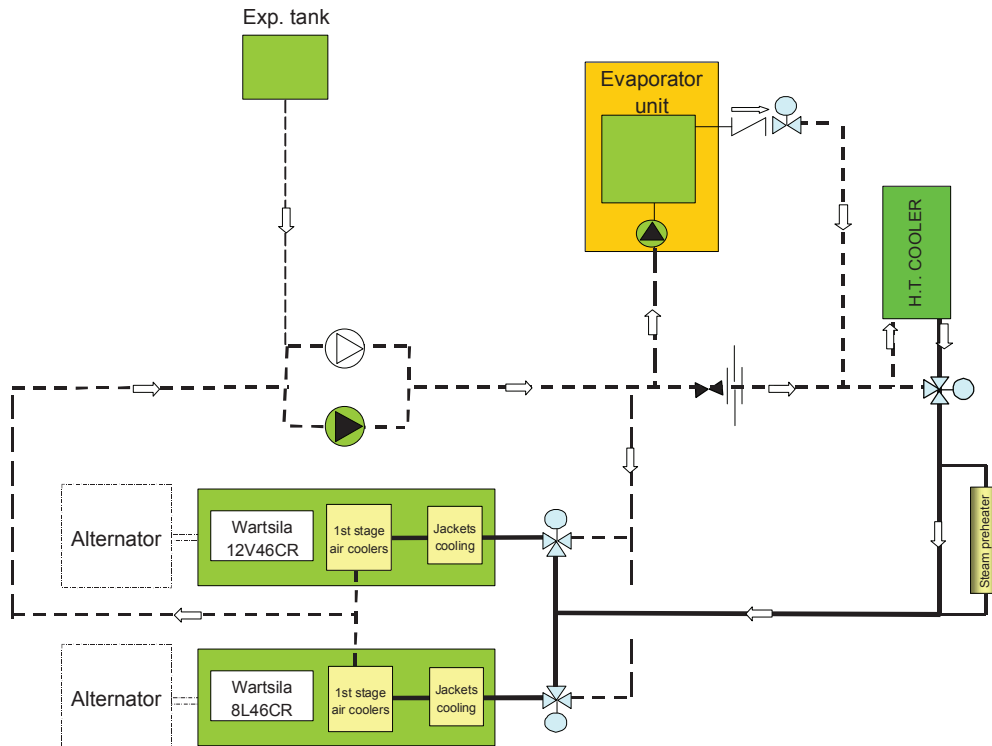


DESCRIPTION	HEAT DISSIPATION kW	FRESH WATER FLOW m ³ /h	INLET TEMP. °C.	OUTLET TEMP. °C.
DIESEL ENGINE WARTSILA 12V 46 CR				
Charge air H.T. circuit	3282			
Jacket water	1765			
H.T. system	5047	270	74,9	91
DIESEL ENGINE WARTSILA 12V 46 CR				
Charge air H.T. circuit	3282			
Jacket water	1765			
H.T. system	5047	270	74,9	91
Cooler minimum size	10093		74,9	91
Pump minimum size		540		

The dissipations take in to consideration the tropical conditions,
 45°C air suction & 32°C sea water
 WARTSILA correction factors for such conditions
 and the +10% tolerances.

FRWD DD/AA HIGH TEMPERATURE

Cooling system energy dissipation (two DD/AA 100% of MCR)
 (One system is indicated. Two systems are installed)



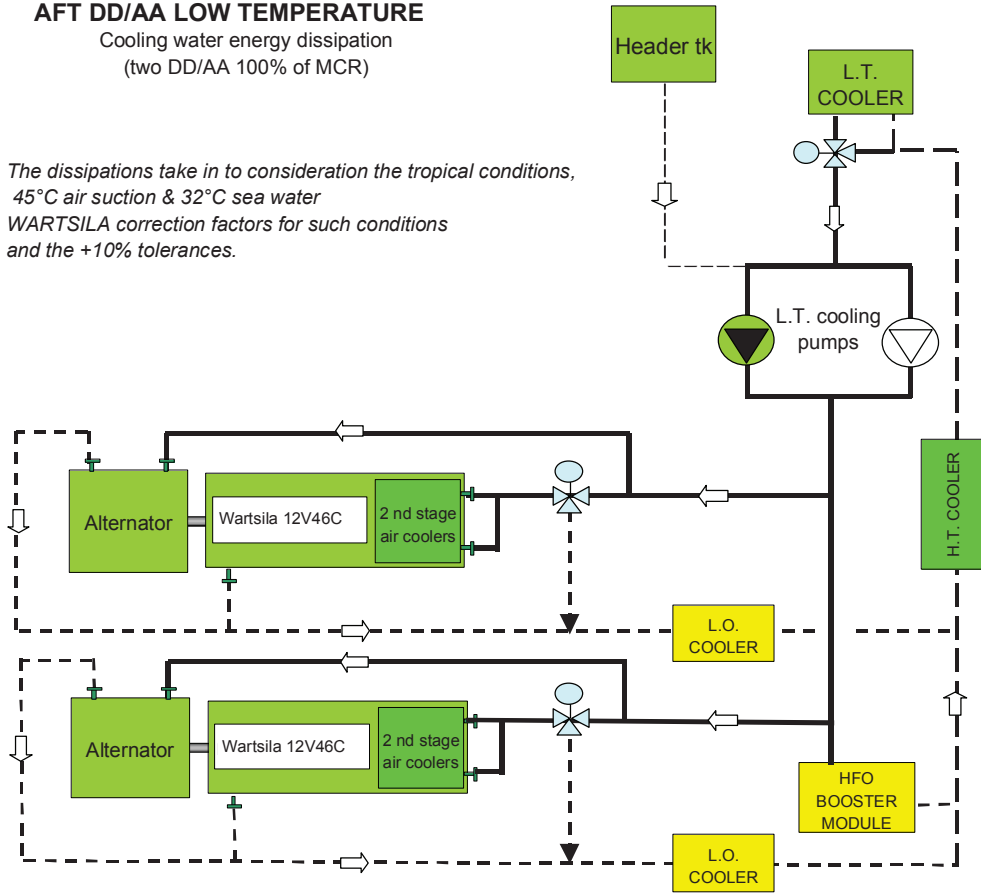
DESCRIPTION	HEAT DISSIPATION kW	FRESH WATER FLOW m ³ /h	INLET TEMP. °C.	OUTLET TEMP. °C.
DIESEL ENGINE WARTSILA 12V 46 CR				
Charge air H.T. circuit	3282			
Jacket water	1765			
H.T. system	5047	270	74,9	91
DIESEL ENGINE WARTSILA 8L 46 CR				
Charge air H.T. circuit	1973			
Jacket water	1078			
H.T. system	3050	180	76,4	91
Cooler minimum size	8097		75,5	91
Pump minimum size		450		

The dissipations take in to consideration the tropical conditions,
 45°C air suction & 32°C sea water
 WARTSILA correction factors for such conditions
 and the +10% tolerances.

AFT DD/AA LOW TEMPERATURE

Cooling water energy dissipation
(two DD/AA 100% of MCR)

The dissipations take in to consideration the tropical conditions,
45°C air suction & 32°C sea water
WARTSILA correction factors for such conditions
and the +10% tolerances.

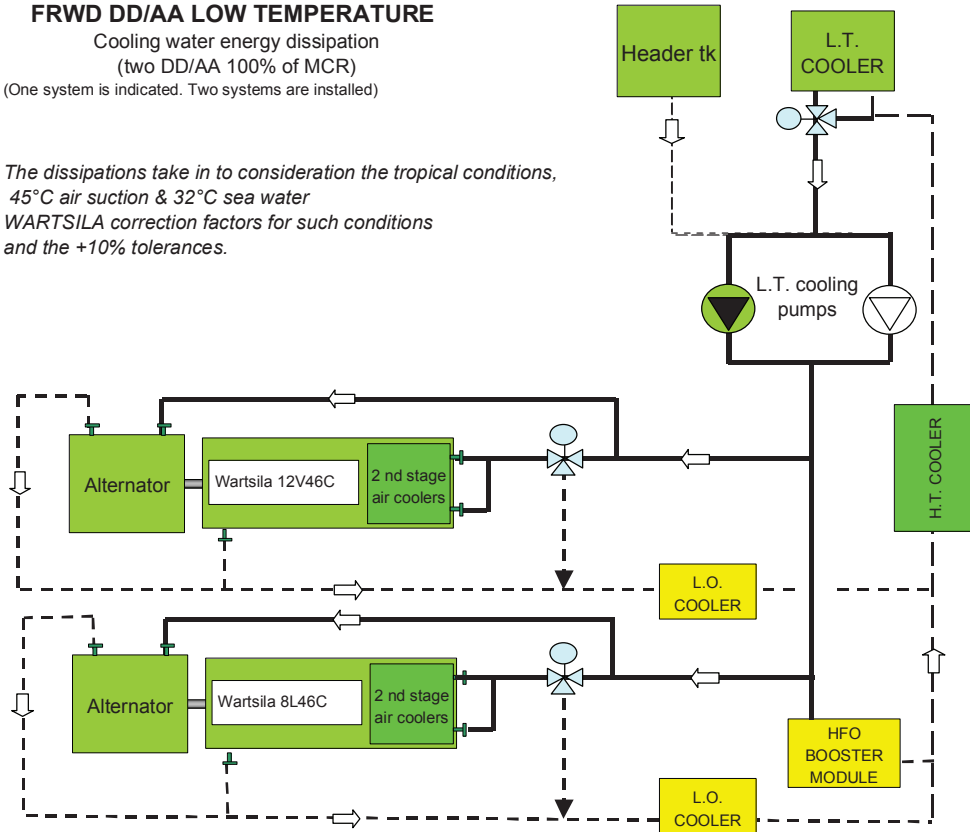


DESCRIPTION	HEAT DISSIPATION kW	FRESH WATER FLOW m ³ /h	INLET TEMP. °C.	OUTLET TEMP. °C.
DIESEL ENGINE WARTSILA 12V 46 CR				
Charge air L.T. circuit	1361	270	36	40,3
Generator air cooler	167	28	36	41,1
Generator bearing DE	10,33	1	36	45
Generator bearing NDE	3,62	0,5	36	42
H.F.O. Booster Module	187	15	36	47
Diesel lube oil cooler	1555	314,5	40,5	44,8
DIESEL ENGINE WARTSILA 12V 46 CR				
Charge air L.T. circuit	1361	270	36	40,3
Generator air cooler	167	28	36	41,1
Generator bearing DE	10,33	1	36	45
Generator bearing NDE	3,62	0,5	36	42
Diesel lube oil cooler	1555	299,5	36,5	41,0
H.T. F.W. cooler	10093	614	42,9	57,1
Cooler minimum size	16291		57	36
Pump minimum size		614		

FRWD DD/AA LOW TEMPERATURE

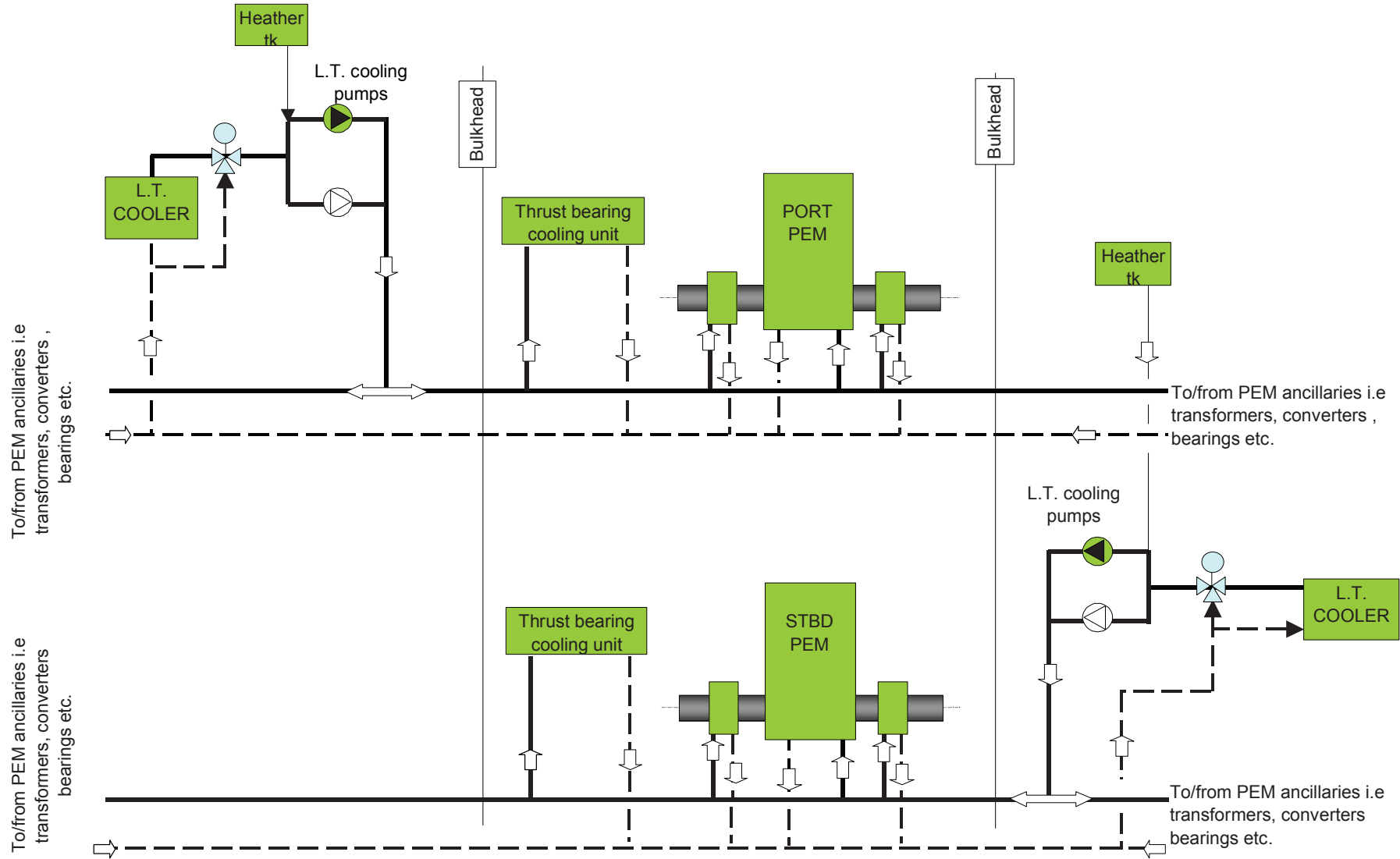
Cooling water energy dissipation
(two DD/AA 100% of MCR)
(One system is indicated. Two systems are installed)

The dissipations take in to consideration the tropical conditions,
45°C air suction & 32°C sea water
WARTSILA correction factors for such conditions
and the +10% tolerances.



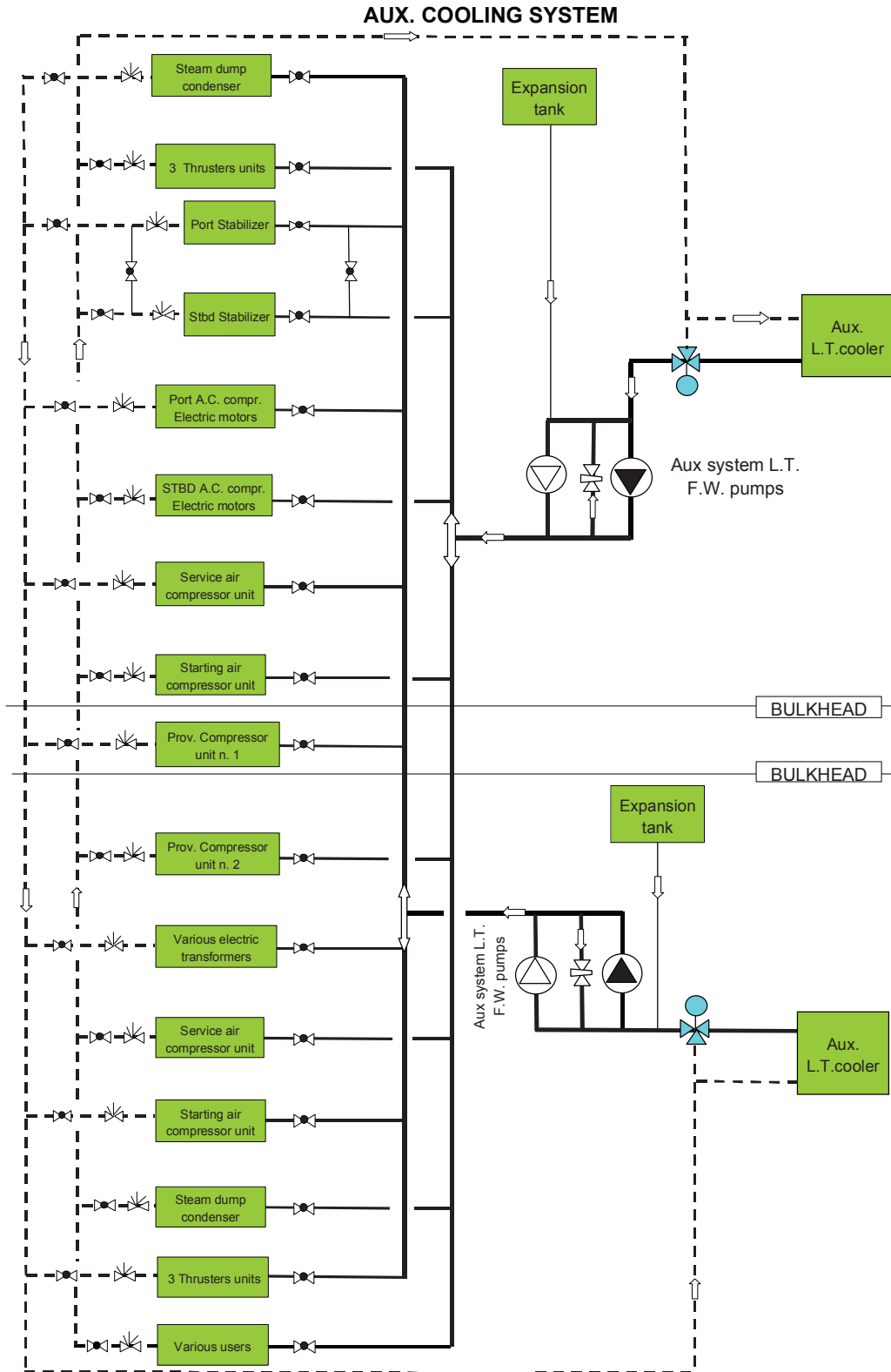
DESCRIPTION	HEAT DISSIPATION kW	FRESH WATER FLOW m ³ /h	INLET TEMP. °C.	OUTLET TEMP. °C.
DIESEL ENGINE				
WARTSILA 12V 46 CR				
Charge air L.T. circuit	1361	270	36	40,3
Generator air cooler	167	28	36	41,1
Generator bearing DE	10,33	1	36	45
Generator bearing NDE	3,62	0,5	36	42
H.F.O. Booster Module	187	15	36	47
Diesel lube oil cooler	1555	314,5	40,5	44,8
DIESEL ENGINE				
WARTSILA 8L 46 CR				
Charge air L.T. circuit	1113	180	36	41,3
Generator air cooler	127	23	36	40,7
Generator bearing DE	6,35	0,48	36	47,4
Generator bearing NDE	3,35	0,48	36	42,0
Diesel lube oil cooler	1200	230	40	44,6
H.T. F.W. cooler	8097	544,5	44,6	57,4
Cooler minimum size	13831		57,4	36
Pump minimum size		544,5		

PEM L.T. F.W. Cooling system



PEM L.T. F.W. Cooling system
(One system is indicated. Two systems are installed)

DESCRIPTION	HEAT DISSIPATION kW	FRESH WATER FLOW m ³ /h	INLET TEMP. °C.	OUTLET TEMP. °C.
Frequency converter 1	140	16	43,5	36
Frequency converter 2	140	16	43,5	36
D.C. link reactors	30	10	38,6	36
Prop. Transformer 1	70	14	40,3	36
Prop. Transformer 2	70	14	40,3	36
Prop. Transformer 3	70	14	40,3	36
Prop. Transformer 4	70	14	40,3	36
Motor air cooler 1	120	65	37,6	36
Motor air cooler 2	120	65	37,6	36
Motor fore bearing	3	0,46	41,6	36
Motor aft bearing	3	0,46	41,6	36
Thrust bearing	15	4	39,2	36
Shaf line bearing 1	1	0,3	38,9	36
Shaf line bearing 2	1	0,3	38,9	36
Shaf line bearing 3	1	0,3	38,9	36
Cooler minimum size	854		40	36
Pump minimum size		234		



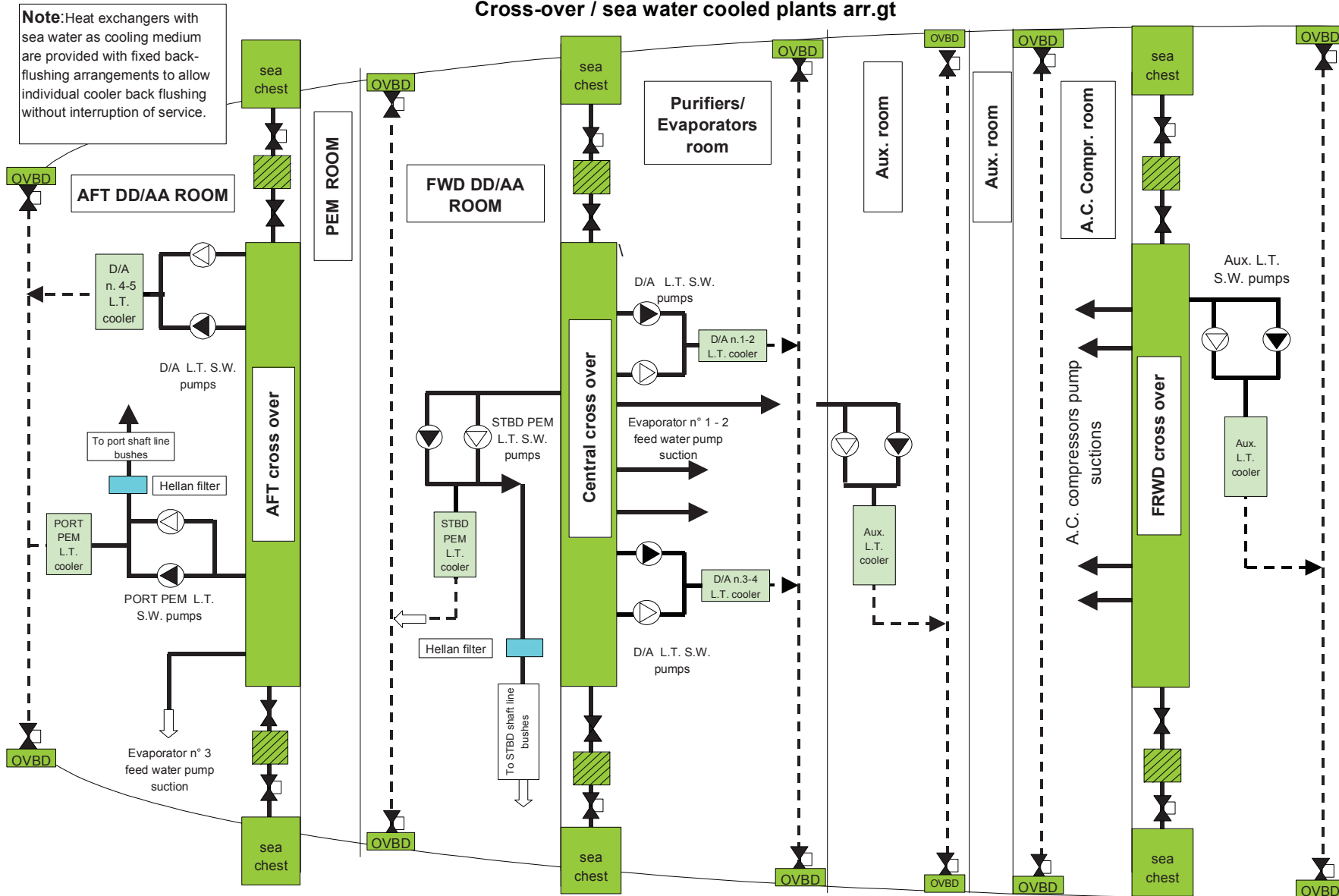
PORT AUX. LOW TEMPERATURE

DESCRIPTION	Quantity	Unit energy dissipation kW	Working units	Total energy dissipation kW	Unit flowrate m ³ /h	Total flowrate m ³ /h	Equipment Inlet temp. ° C.	Equipment Outlet temp. ° C.
A.C. compressor el. motor cooling	2	62	2	124	15	30	36	39,6
Freon compressor	1	6	1	6	0,5	1	36	46,3
Distribution Transformer	3	70	3	210	9	26	36	42,9
Thrusters(n° 1aft-3aft-2frwd)	3	250	3	750	17	51	36	48,6
Thr. Hydr. Units(n° 1aft-3aft-2frwd)	3	50	3	150	8	24	36	41,4
Fin stabilizers	1	17	1	17	5,5	6	36	38,7
Steering gear L.O. cooling	2	30	2	60	3	6	36	44,6
Starting air compressor	1	25	1	25	3	3	36	43,2
Topping up air compressor	1	10	1	10	2	2	36	40,3
L.P. air compressor	1	10	1	10	2,5	3	36	39,4
Prov. Ref. Condenser	1	1100	1	1100	200	200	36	40,7
Prov. Ref. Condenser L.O. cooler	1	120	1	120	15	15	36	42,9
Incinerator shredder Incinerator densifier Incinerator hydr. Unit Incinerator system	1	260	1	260	12	12	36	54,6
Stm dumping atm. Condenser	1	6500	1	6500	400	400	36	50,0
Dirty drain cooler	1	600	1	600	35	35	36	50,7
						813		
Cooler minimum size				9942			46,5	37
Pump minimum size						813		

STBD AUX. LOW TEMPERATURE

DESCRIPTION	Quantity	Unit energy dissipation kW	Working units	Total energy dissipation kW	Unit flowrate m ³ /h	Total flowrate m ³ /h	Inlet temp. °C.	Outlet temp. °C.
A.C. compressor el. motor cooling	2	62	2	124	16	32	36	39,3
Distribution Transformer	3	70	3	210	9	26	36	42,9
Thrusters(n° 1frwd-3frwd-2aft)	3	250	3	750	17	51	36	48,6
Thr.Hydr.Units (n° 1frwd-3frwd-2aft)	3	50	3	150	8	24	36	41,4
Fin stabilizers	1	17	1	17	5,5	6	36	38,7
Steering gear L.O. cooling	2	30	2	60	3	6	36	44,6
Starting air compressor	1	25,0	1	25	3	3	36	43,2
Topping up air compressor	1	10	1	10	2	2	36	40,3
L.P. air compressor	1	10	1	10	2,5	3	36	39,4
Prov. Ref. Condenser	1	1100	1	1100	200	200	36	40,7
Prov. Ref. Condenser L.O. cooler	1	120	1	120	15	15	36	42,9
Incinerator shredder Incinerator densifier Incinerator hydr. Unit Incinerator system	1	260	1	260	12	12	36	54,6
Stm dumping atm. Condenser	1	6500	1	6500	400	400	36	50,0
Dirty drain cooler	1	600	1	600	35	35	36	50,7
						814		
Cooler minimum size				9936			46,5	36
Pump minimum size						814		

Cross-over / sea water cooled plants arr.gt



Main DD/AA L.T. F.W. Systems coolers & pumps sizing

AFT DD/AA

F.W. Flow	m3/h	614
Heat rejected by F.W. and gained by S.W.	kW	16291
Temp. drops for F.W.	°C	22.8
Temp. rises for S.W.	°C	16
S.W. Flow	m3/h	876

2 x 100% L.T. F.W. pumps are installed having each one the following characteristics: **700 m3/h@ 30 m.w.g.**

2 x 100% S.W. pumps are installed having each one the following characteristics: **m3/h@ 20 m.w.g. 900**

1 x 100% L.T. cooler is installed having a capacity of **16300 kW**. The cooler is supplied with a duty margin of 15%.

FRWD DD/AA

(One system is indicated.Two systems are installed)

F.W. Flow	m3/h	544.5
Heat rejected by F.W. and gained by S.W.	kW	13831
Temp. drops for F.W.	°C	21.8
Temp. rises for S.W.	°C	16
S.W. Flow	m3/h	743

2 x 100% L.T. F.W. pumps are installed having each one the following characteristics: **600 m3/h@ 30 m.w.g.**

2 x 100% S.W. pumps are installed having each one the following characteristics: **m3/h@ 20 m.w.g. 800**

1 x 100% L.T. cooler is installed having a capacity of **14700 kW**. The cooler is supplied with a duty margin of 15%.

Main DD/AA H.T.. F.W. systems

AFT DD/AA

F.W. Flow	m3/h	540
Heat rejected by H.T. F.W. and gained by L.T. F.W.	kW	10093
Temp. drops for H.T. F.W.	°C	16.1
Temp. rises for L.T. F.W.	°C	14.1

2 x 100% H.T. F.W. pumps are installed having each one the following characteristics: **550 m3/h@ 50 m.w.g.**

1 x 100% H.T. cooler is installed having a capacity of **10100 kW**. The cooler is supplied with a duty margin of 15%.

FRWD DD/AA

(One system is indicated.Two systems are installed)

F.W. Flow	m3/h	450
Heat rejected by H.T. F.W. and gained by L.T. F.W.	kW	8097
Temp. drops for H.T. F.W.	°C	15.5
Temp. rises for L.T. F.W.	°C	12.8

2 x 100% H.T. F.W. pumps are installed having each one the following characteristics: **480 m3/h@ 50 m.w.g.**

1 x 100% H.T. cooler is installed having a capacity of **9000 kW**. The cooler is supplied with a duty margin of 15%.

PEM L.T. F.W. system

(One system is indicated. Two systems are installed)

F.W. Flow	m3/h	234
Heat rejected by F.W and gained by S.W.	kW	854
Temp. drops for F.W.	°C	3.1
Temp. rises for S.W.	°C	5.1
S.W. Flow	m3/h	144

2 x 100% L.T. F.W. pumps are installed having each one the following characteristics: **230 m3/h@ 30 m.w.g.**

2 x 100% S.W. pumps are installed having each one the following characteristics: **m3/h@ 20 m.w.g. : 230**
(15 m3/h delivered to S.L. bushes).

1 x 100% L.T. cooler is installed having each one a capacity of **1400 kW**.
The cooler is supplied with a duty margin of 15%.

PORT L.T. F.W. Aux. system

F.W. Flow	m3/h	813
Heat rejected by F.W and gained by S.W.	kW	9942
Temp. drops for F.W.	°C	10.5
Temp. rises for S.W.	°C	12
S.W. Flow	m3/h	713

2 x 100% L.T. F.W. pumps are installed having each one the following characteristics: **1000 m3/h@40 m.w.g.**

2 x 100% S.W. pumps are installed having each one the following characteristics: **m3/h@ 20 m.w.g.: 800**

1 x 100% L.T. cooler is installed having a capacity of **11000 kW**.
The cooler is supplied with a duty margin of 15%.

STBD L.T. F.W. Aux. system

F.W. Flow	m3/h	814
Heat rejected by F.W and gained by S.W.	kW	9936
Temp. drops for F.W.	°C	10.5
Temp. rises for S.W.	°C	12
S.W. Flow	m3/h	712

2 x 100% L.T. F.W. pumps are installed having each one the following characteristics: **1000 m3/h@ 40 m.w.g.**

2 x 100% S.W. pumps are installed having each one the following characteristics: **m3/h@ 20 m.w.g. : 800**

1 x 100% L.T. cooler is installed having a capacity of **11000 kW**.
The cooler is supplied with a duty margin of 15%.

Prese a Mare – Cross Over/Traversa

Per finire dobbiamo ricordare che bisogna alimentare (idraulicamente) tutte le pompe acqua mare esistenti a bordo, non solamente quelle dedicate ai raffreddamenti, ma tutte quelle che devono alimentare impianti che usano acqua mare come fluido operativo quali, zavorra, piscine, evaporatori per produrre acqua distillata, incendio etc.

Tutte queste pompe aspirano da dei "cross-over (casse strutturali sistemate nei doppi fondi) che a loro volta sono alimentati dalle casse prese a mare (sea chest). La presa, a mare al di là della sua forma fisica, non è altro che una comunicazione diretta, intercettata da valvole, con il mare. Normalmente una presa a mare è intercettata mentre l' altra è aperta.

Per evitare che nel cross-over possano entrare detriti, alghe, piccoli pesci etc che potrebbero intasare le tubolature, incatastare le valvole o danneggiare le giranti delle pompe, immediatamente dopo le valvole di intercettazione sono sistemati dei filtri a cestello (cestello con fori da 5-6 mm di diametro) che prevengono questi inconvenienti. Poiché questi filtri non possono prevenire l' ingresso di spore o di larve nel circuito, vengono sistemati anche impianti antivegetativi.

Questi impianti per elettrolisi o per iniezione di cloro, prevengono la formazione di vegetazione o addirittura di fauna.

Nel caso di impianti ad iniezione di cloro, il cloro iniettato è ricavato dall' acqua mare stessa.

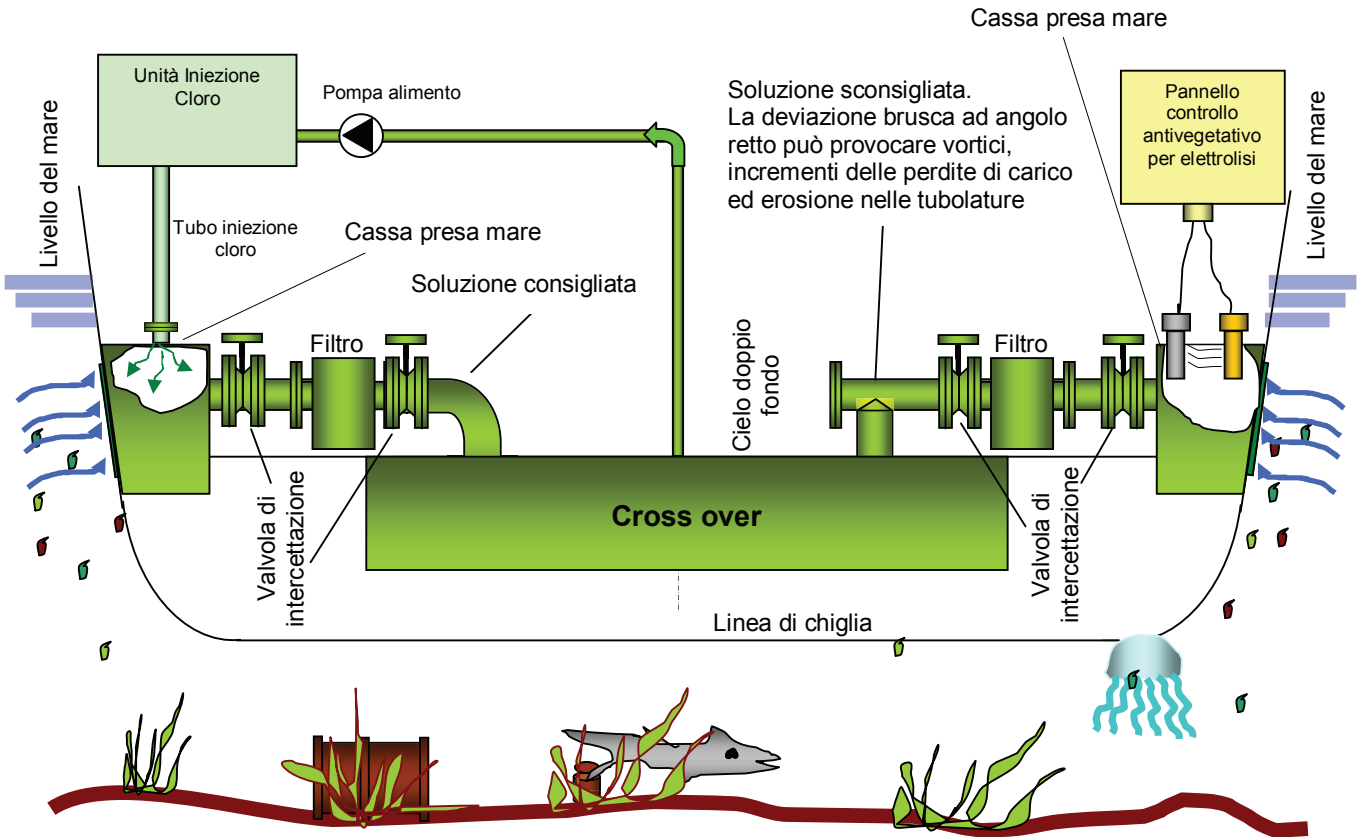
Una soluzione alternativa a quanto sopra descritto è l' uso di una traversa (tubo) al posto della cassa cross-over.

Questa applicazione non viene quasi più usata a meno che l' altezza del doppio fondo sia così ridotta da non consentire, per motivi costruttivi, la sistemazione del cross-over.

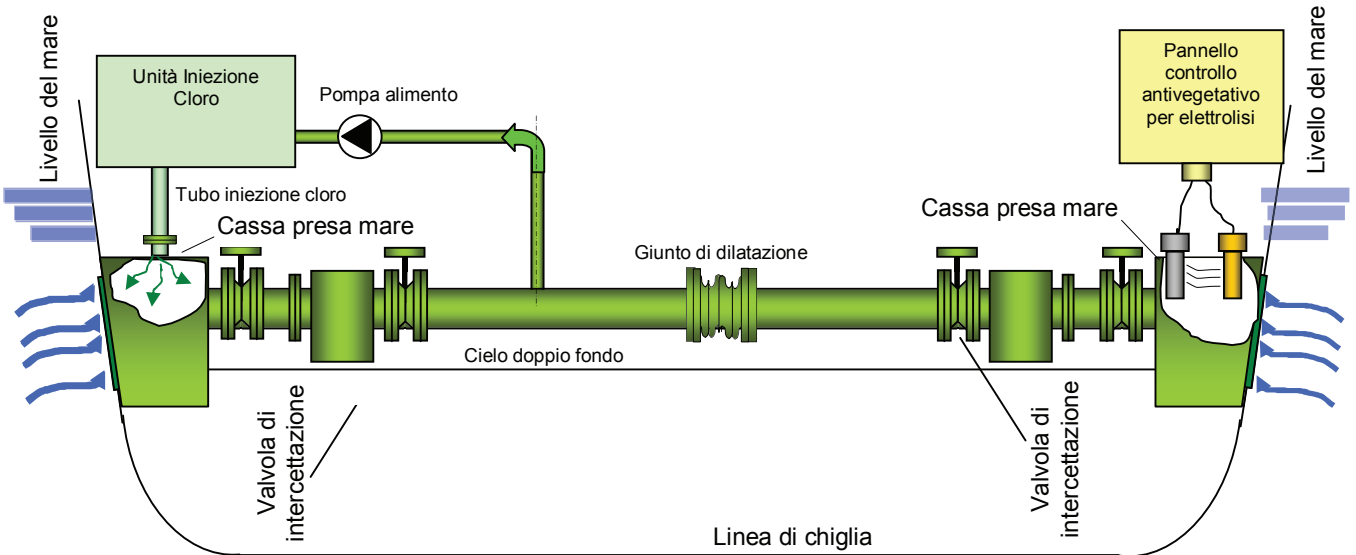
Lo svantaggio maggiore della traversa è che, correndo praticamente da murata a murata, crea uno sbarramento che rende particolarmente difficoltosa la stesura dei tubi che transitano longitudinalmente alla nave.

Bisogna inoltre tenere in considerazione che, a causa delle dilatazioni lineari dovute al cambiamento di temperatura, la traversa deve essere provvista di giunto od addirittura di Ω di dilatazione.

Prese a mare con cross-over



Prese a mare con traversa



Cross over sizing*AFT cross-over*

Equipment	Q.ty	Capacity - m3/h
Evaporator S.W. Feed pump	1	500
Evaporator S.W. Eject. pump	1	100
DD/AA L.T. Sea W. Pump	1	850
PEM sea W. Pump	1	230
Various not continuous users	1	130
Total flow		1810
Designed flow velocity	m/sec	1,5
Calculated pipe inner dia	mm	653
Installed pipe dia	mm	
Flow working velocity	m/sec	
Design flow velocity	m/sec	2,0
Calculated pipe internal diameter	mm	566
Installed pipe diameter	mm	600
Flow velocity	m/sec	1,78

Central cross over

Equipment	Q.ty	Capacity - m3/h
Evaporator S.W. Feed pump	2	1000
Evaporator S.W. Eject.pump	2	200
DD/AA L.T. Sea W. Pump	2	1400
PEM sea W. Pump	1	230
Aux. System sea W. Pump	1	800
Various not continuous users	1	400
Total flow		4030
Design flow velocity	m/sec	2,0
Calculated pipe internal diameter	mm	844
Installed pipe diameter	mm	900
Flow velocity	m/sec	1,76

FWD cross-over

Equipment	Q.ty	Capacity - m3/h
A.C. condenser S.W. Pumps	3	3000
Aux. System sea W. Pump	1	800
Various not continuous users		200
Total flow		4000
Design flow velocity	m/sec	2,0
Calculated pipe internal diameter	mm	841
Installed pipe diameter	mm	900
Flow velocity	m/sec	1,75

A questo punto abbiamo tutti gli elementi per poter partire con la stesura di un disegno funzionale (da adesso schema) con indicati i diametri, valvole ed accessori vari dell' impianto.

Stesura di un disegno funzionale di distribuzione

Dimensionamento delle linee e marcatura accessori

