

PFC: DISSENY I CÀLCUL DELS SISTEMES AUXILIARS I PROPULSIUS D'UN PETROLIER DE 100.000 DWT



Autor: Joan Arnau Bataller Sabaté

Director: Ramon Grau Mur

Enginyeria Tècnica Naval en Propulsió
i Serveis del Vaixell

Barcelona, Juny de 2014



Facultat de Nàutica de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



Índex

Pàgina

1. Introducció	4
2. Dades preliminars del projecte	5
3. Determinació de la planta propulsora	7
3.1. Estimació de la potència propulsora	7
3.2. Selecció del Motor Principal	9
3.2.1. Compliment del "Crash stop"	11
3.3. Característiques del Motor Principal	13
4. Dimensionament i distribució de la sala de màquines	15
4.1. Càlcul de l'eslora de la sala de màquines	15
4.2. Càlcul del doble fons mínim	15
4.3. Distribució dels elements principals	16
5. Sistemes Auxiliars	18
5.1. Sistema de combustible	19
5.1.1. Tipus de combustibles	19
5.1.2. Objectiu del sistema de combustible	21
5.1.3. Dimensionament dels tancs de HFO	22
5.1.3.1. Tancs de Servei Diari de HFO	23
5.1.3.2. Tancs de Sedimentació de HFO	24
5.1.3.3. Tancs Magatzem de HFO	25
5.1.3.4. Tanc col·lector de retorns	27
5.1.3.5. Tanc de vessaments de HFO	28
5.1.3.6. Tanc de llots	28
5.1.4. Dimensionament dels tancs de MDO	29
5.1.4.1. Tanc de Servei Diari de MDO	29
5.1.4.2. Tancs Magatzem de MDO	30
5.1.4.3. Tanc de vessaments de MDO	30
5.1.5. Dimensionament i selecció de bombes de combustible	31
5.1.5.1. Bombes de transvasament de HFO	31
5.1.5.2. Bombes d'alimentació de la purificadora de HFO	34
5.1.5.3. Bombes d'alimentació i circulació de combustible	35
5.1.5.4. Bomba del tanc de llots	38
5.1.5.5. Bombes de transvasament de MDO	39
5.1.6. Dimensionament i selecció de les purificadores	41
5.1.7. Dimensionament dels escalfadors	43
5.2. Sistema de lubricació	45
5.2.1. Sistema de lubricació del motor principal	45
5.2.1.1. Sistema de lubricació general	45
5.2.1.1.1. Elements del sistema de lubricació general	47
5.2.1.2. Sistema de lubricació de cilindres	56
5.2.1.2.1. Elements del sistema de lubricació de cilindres	57



5.2.2. Sistema de lubricació de motors auxiliars.....	60
5.2.2.1. Elements del sistema de lubricació general dels MM.AA.....	60
5.3. Sistema de refrigeració.....	65
5.3.1. Sistema de refrigeració centralitzat.....	66
5.3.2. Elements del circuit de baixa temperatura.....	68
5.3.3. Elements del circuit d'alta temperatura.....	71
5.3.4. Elements del circuit d'aigua salada.....	74
5.4. Sistema d'aire comprimit.....	79
5.4.1. Elements del sistema d'aire comprimit.....	80
5.5. Sistema d'exhaustació i generació de vapor.....	85
5.5.1. Dimensionament del conducte d'exhaustació.....	86
5.5.2. Caldera de recuperació de gasos d'exhaustació.....	87
5.5.3. Generadors de vapor auxiliars.....	91
5.5.4. Silenciador.....	92
5.5.5. Apaga guspines.....	94
6. Motors auxiliars i generació elèctrica.....	95
6.1. Generació elèctrica.....	96
6.1.1. Balanç elèctric.....	96
6.1.1.1. Situacions operacionals del vaixell.....	97
6.1.1.2. Categories dels consumidors.....	98
6.2. Selecció i determinació del nombre i capacitat dels generadors.....	105
6.3. Selecció i determinació del generador d'emergència.....	109
7. Conclusions.....	112
8. Bibliografia.....	114



1. Introducció

L'objecte d'estudi d'aquest projecte final de carrera és el de dissenyar i determinar mitjançant càlculs i normatives els elements que conformen una sala de màquines de un vaixell petroler de 100.000 tones de pes mort.

En concret es centrarà en la estimació calculada de la potència de la planta propulsora per tal de determinar el motor principal disponible en el mercat que millor s'adapti a les necessitats propulsives calculades.

Una vegada definit l'element principal, es realitzarà una distribució i dimensionament general de la sala de màquines per tal de determinar la ubicació òptima dels diversos elements i sistemes que es situaran en aquest espai. L'eix vertebrador serà el motor principal que en gran mesura determinarà l'espai necessari.

El següent pas serà el d'anar calculant els diversos sistemes auxiliars a la propulsió necessaris per donar servei al motor principal i a la resta de sistemes presents a la sala de màquines d'un petroler. Aquest pas inclourà el dimensionament dels tancs de combustible, oli lubricant etc. necessaris per donar un servei ininterromput a tots els equips presents a la sala de màquines durant el temps d'autonomia del vaixell en qüestió.

Cada un dels elements que conformen els sistemes auxiliars es determinarà i es seleccionarà el model més apropiat existent en el mercat tot justificant la seva elecció i principals característiques. Conjuntament amb els càlculs realitzats per a la determinació dels elements, es seguiran totes les directrius de construcció i instal·lació dels diversos sistemes, recollits en les normatives internacionals de seguretat i prevenció de la contaminació SOLAS i MARPOL. De la mateixa manera es farà servir de guia normes de la societat de classificació ABS (American Bureau of Shipping).



2. Dades preliminars del projecte

Pas previ a començar el càlcul de la potència propulsora necessària per el petrolier, es definiran les característiques bàsiques del vaixell interpolades d'altres petroliers ja construïts recentment, per tal de partir d'unes formes i característiques de disseny i construcció el màxim d'actualitzades.

- **Tipus de vaixell:** Crude Oil Tanker

- **Classe:** Aframax entre 80.000 i 120.000 t.

- **Disposició general:**

- Doble casc per protegir la zona dels tancs de càrrega.
- 12 Tancs de càrrega.
- 2 Tancs de decantació.
- 4 Tancs de llast segregats.
- Sala de bombes a popa de la zona de càrrega.
- Sala de màquines i habilitació situat a la popa.

- **Dimensions principals:**

- Eslora total (LOA): 244,60 m.
- Eslora entre perpendiculars (Lpp): 233,00 m.
- Eslora en la flotació (LwL): 235,00 m.
- Mànega de traçat (B): 42,00 m.
- Puntal: 22,20 m.
- Calat de disseny (T): 14,70 m.
- Desplaçament Δ : 117.850,40 t.
- Volum de desplaçament ∇ : 114.976 m³.
- Pes mort (DWT): 105.000 t.

**- Capacitats dels tancs:**

- Tancs de càrrega i de decantació: 125.000 m³.
- Tancs de llast segregats: 40.500 m³.
- Fuel-Oil HFO 5.000 m³.
- Dièsel-Oil MDO 400 m³.
- Aigua dolça 500 m³.
- Oli de lubricació 70 m³.

- Propulsió i velocitat:

- Motor dièsel lent (2T) acoblat directament a la línia de l'eix.
- Hèlix de pas fixe.
- Marge de mar: 15%.
- Marge de motor: 90%.
- Velocitat de disseny: 14 kn.
- Autonomia: 35.000 milles.

- Classificació i Normatives Internacionals:

- American Bureau of Shipping.
- SOLAS i MARPOL.



3. Determinació de la planta propulsora

3.1. Estimació de la potència propulsora

Per tal de fer una aproximació de la potència propulsora, una vegada definida la velocitat de disseny de 14 nusos i un desplaçament de 117.850,40 t, s'utilitzarà un model matemàtic acceptat universalment conegut com la fórmula de l'almirallat. Una vegada calculada la potència aproximada es farà la selecció del motor més adequat disponible al mercat.

L'expressió utilitzada per determinar la potència necessària relaciona el desplaçament del vaixell amb la velocitat de disseny establerta, tot dividit per un factor C_a denominat constant de l'almirallat.

$$P = \frac{\Delta^{2/3} \cdot V^3}{C_a}$$

On:

P = Potència indicada (IHP) en cavalls

Δ = Desplaçament del vaixell en "Long Tons" (1 Long Ton = 1,016 t)

V = Velocitat del vaixell en nusos

C_a = Constant de l'almirallat, factor adimensional que depèn del tipus de vaixell, la velocitat i la eslora.

Aquest coeficient C_a s'obté de taules confeccionades en canals d'experiència, segons la velocitat i la eslora del vaixell, els valors es troben entre $264 < C_a < 336$. S'agafarà el valor de 336 obtingut en vaixells de similars característiques.

$$P = \frac{(117.850,40 \cdot 1,016047)^{2/3} \cdot 14^3}{336} = 19.839,98 \text{ IHP}$$

Una vegada obtinguda la potència indicada es troba la potència efectiva (BHP) aplicant un rendiment mecànic del 90%.

$$BHP = IHP \cdot \eta_m$$

$$BHP = 19.839,98 \cdot 0,9 = 17.855,98 \text{ HP}$$



Amb la potència efectiva calculada, es necessari sobredimensionar aquesta potència per tenir en compte condicions adverses com l'augment de la resistència a l'avanç pel casc i l'hèlix bruts i/o mala mar, vent de proa etc. Per això es sobredimensiona un 15% la potència efectiva aplicant el denominat *marge de mar*.

$$BHP_{SP} = 17.855,98 \cdot 1,15 = 20.534,39 \text{ HP}$$

La potència obtinguda amb el marge de mar és la potència en règim de servei continu (SP).

Com s'ha indicat en l'apart de dades preliminars del projecte, es considerarà que el motor funcionarà en servei continu a una potència inferior i per tant s'aplicarà l'anomenat *marge de motor*, la potència resultant serà la *potència* màxima contínua (MCR). Segons les especificacions el motor funcionarà en servei continu al 90% de la potència màxima contínua.

$$BHP_{SP} = 0,9 \cdot BHP_{MCR}$$

$$BHP_{MCR} = \frac{20.534,39}{0,90} = 22.815,98 \text{ HP}$$

Amb l'aproximació de la potència calculada es buscarà en el mercat el model de motor que s'aproximi més a la potència trobada de 22.816 HP o 16.781,17 kW. Per tal de seleccionar el motor més adequat es miraran models ja instal·lats en altres petroliers de similars característiques amb una potència efectiva semblant a la obtinguda.



3.2. Selecció del motor principal

En la selecció del motor principal es tindrà en compte factors i paràmetres com la grandària, el pes, la potència i l'economia de funcionament. Com que és poc probable trobar un motor amb exactament la mateixa potència estimada, agafarem com a requeriments mínims:

- Motor lent de dos temps.
- Potència MCR: 22.816 HP (16.781,17 kW)

Buscant entre els principals fabricants i entre bases de dades de vaixells del mateix tipus, es troben dos motors amb certes diferències que s'aproximen als requeriments:

- Sèries **RTA-68** del fabricant **Wärtsila**
- Sèries **S70MC6** de el fabricant **MAN B&W**

Wärtsila ofereix diverses configuracions amb variacions de potència segons el nombre de cilindres del motor que varia entre 5 i 8:

Ø x Carrera 680 x 2.720 [mm]	5 Cilindres	6 Cilindres	7 Cilindres	8 Cilindres
Potència [kW]	15.650	18.780	21.910	25.040
Velocitat [rpm]	95	95	95	95
BSFC ¹ [g/kWh] 100% de càrrega	174	174	174	174
Mep ² [bar]	20,0	20,0	20,0	20,0
Consum d'oli per Cilindre	0,6 g/kWh	0,6 g/kWh	0,6 g/kWh	0,6 g/kWh

· *Taula 1: Característiques i configuracions del Wärtsila RTA-68. (Wärtsila)*

- ¹ "Break specific fuel consumption", consum específic al fre
- ² "Mean efective pressure", pressió mitja efectiva

En concret es seleccionaria el model de **6 cilindres** i una potència MCR de **18.780 kW**, ja que la inferior de 5 cilindres no arriba als requeriments mínims establerts.

El **RTA-68** de 6 cilindres té una longitud de 8.710 mm, una amplada de 4.320 mm i una altura de 10.400 mm. Té un pes total de 439 t. A més compleix amb la normativa de la IMO Tier II de emissions de NO_x i amb les regulacions recollides en l'annex VI del conveni MARPOL 73/78.



A l'igual que l'anterior **MAN B&W** ofereix diverses configuracions amb diverses potències segons el nombre de cilindres del motor que varia entre 5 i 8:

Ø x Carrera 700 x 2.674 [mm]	5 Cilindres	6 Cilindres	7 Cilindres	8 Cilindres
Potència [kW]	14.050	16.860	19.670	22.480
Velocitat [rpm]	91	91	91	91
BSFC ¹ [g/kWh] 100% de càrrega	169	169	169	169
Mep ² [bar]	18,0	18,0	18,0	18,0
Consum d'oli per Cilindre	0,7 g/kWh	0,7 g/kWh	0,7 g/kWh	0,7 g/kWh

· Taula 2: Característiques i configuracions del MAN B&W S70MC6. (MAN B&W)

· ¹ "Break specific fuel consumption", consum específic al fre

· ² "Mean effective pressure", pressió mitja efectiva

En aquesta sèrie es seleccionarà també la configuració de **6 cilindres** amb una potència MCR de **16.860 kW**, molt pròxima a la potència aproximada en els càlculs de l'apartat anterior de 16.781,17 kW i per tant a priori el model de motor més adequat.

El model **6-S70MC6** de **MAN B&W** té una longitud de 10.227 mm, una amplada de 4.250 mm i una altura de 8.113 mm. Té un pes total de 562 t. Compleix també amb la normativa de la IMO Tier I d'emissions de NO_x i amb les regulacions recollides en l'annex VI del conveni MARPOL 73/78.

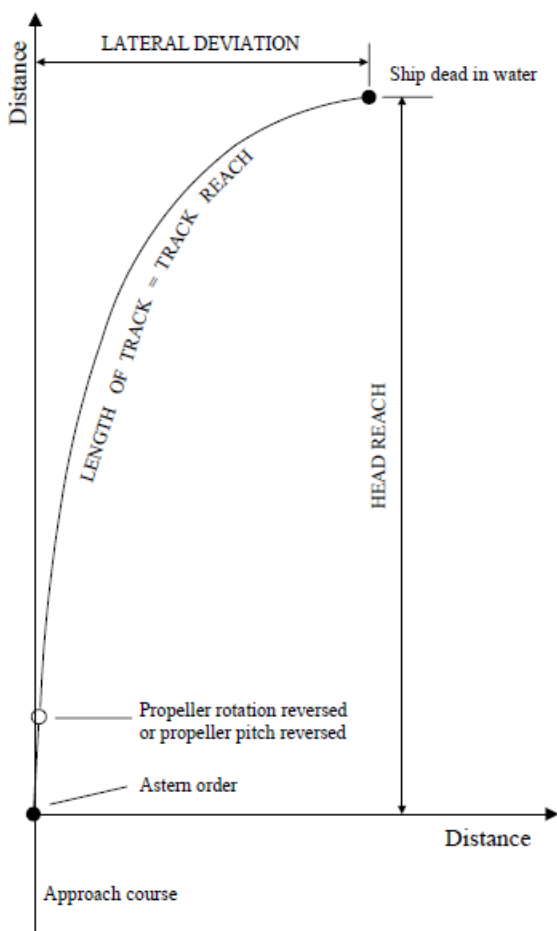
Comparant ambdues opcions el **6-S70MC6** és el que més s'aproxima a la potència calculada. Tot i ser més voluminós i més pesat en general, el **6-S70MC6** té un consum específic inferior al del **RTA-68** de Wärtsila, ja que la potència d'aquest últim és 1920 kW més gran, fet que fa que el consum sigui més elevat. Les revolucions de funcionament i les pressions mitjanes efectives són gairebé iguals, així com el consum d'oli lubricant que es lleugerament més elevat el del **6-S70MC6**.

Per tant per aquest cas en concret i vistos els resultats obtinguts s'optarà per instal·lar el model de **MAN B&W 6-S70MC6** amb una potència de **16.860 kW** i **91 rpm**.



3.2.1. Compliment del "Crash stop"

Seguint normatives internacionals de la OMI i també recollides en normatives de la Societat de Classificació ABS, el motor seleccionat ha de complir amb el test del "Crash stop". Aquest consisteix en comprovar el següent test:



· Figura 1: Test de capacitat de parada. (ABS)

- El vaixell ha d'anar a una velocitat no inferior al 90% de la velocitat màxima en una condició de càrrega del 85% de MCR.

- La màquina en condicions de navegació constant, rep l'ordre de "tot enrere" fins que la velocitat del vaixell és igual a 0 kn.

Llavors s'han de recollir les següents distàncies:

- Distància recorreguda en la direcció del rumb inicial.

- La distància total recorreguda en la trajectòria del vaixell.

- La distància recorreguda en direcció perpendicular al rumb inicial.

La distància recorreguda serà:

$$RH = 0,305 \cdot e^{(0,773 - 5 \cdot 10^{-5} \cdot PP + 0,617 \cdot \ln PP)} \cdot \Delta^{1/3}$$

On:

Δ : desplaçament del vaixell en tones

PP : paràmetre que depèn de la potència

$$PP = 0,305 \cdot V^3 \cdot \frac{\Delta}{(PBA \cdot DP)}$$



On:

V : velocitat en kn

Δ : desplaçament del vaixell en tones

PBA : màxima potència quant la càrrega és un 35-40% de MCR = $16.860 \text{ kW} \cdot (37,5/100)$
= $6.322,5 \text{ kW} = 8.596,19 \text{ HP}$

DP : diàmetre de la hèlix, es prendrà un valor de 8,5 m interpolat d'altres vaixells de similars característiques.

$$PP = 0,305 \cdot 14^3 \cdot \frac{117.850,40}{(8.596,19 \cdot 8,5)} = 1.349,86$$

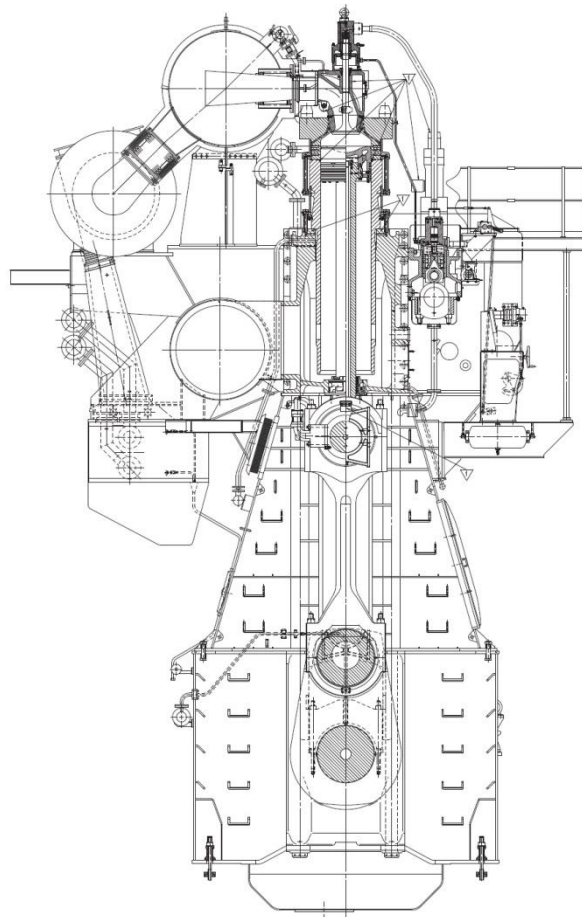
$$RH = 0,305 \cdot e^{(0,773 - 5 \cdot 10^{-5} \cdot 1.349,86 + 0,617 \cdot \ln 1.349,86)} \cdot 117.850,40^{1/3} = 2585,41 \text{ m}$$

Segons la normativa la distància recorreguda no pot ser major que 15 vegades L_{pp} .

$$15 \cdot 233 > 2.585,41 \text{ m}$$

$$3.495 > 2.585,41 \text{ m}$$

Es comprova que en efecte la distància de per parar a zero nusos és inferior al criteri fixat i per tant el motor seleccionat pel petrolier en qüestió compleix el requisit del *Crash stop*.

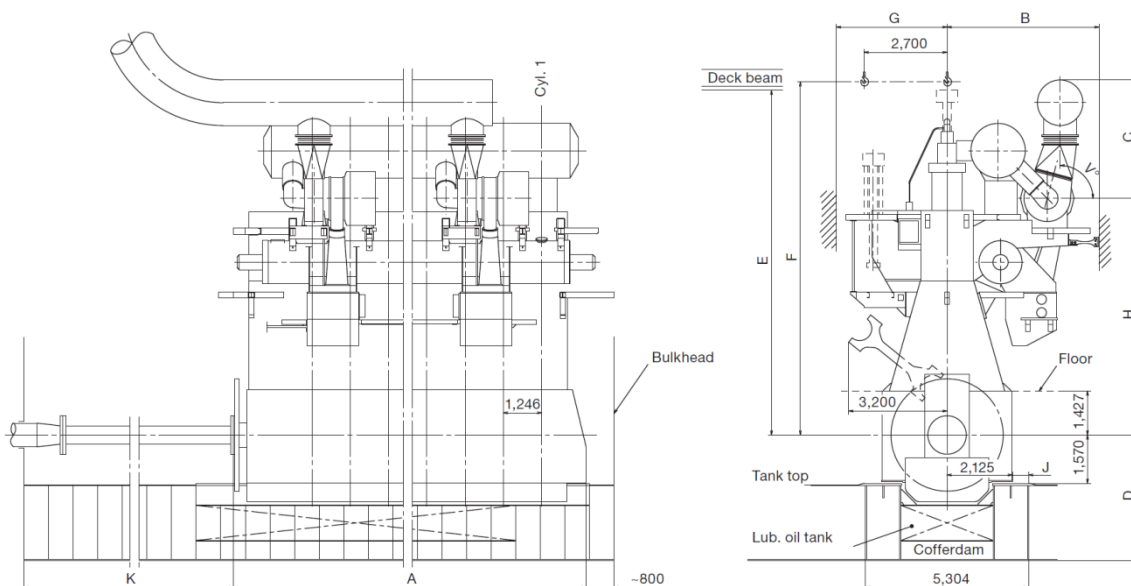


· Imatge 1: Secció del motor seleccionat 6-S70MC6. (MAN B&W)



3.3. Característiques del motor principal

A continuació es detallen els paràmetres rellevants facilitats pel fabricant sobre el funcionament del motor seleccionat en les dues condicions de càrrega contemplades, al 100 % i la potència en el punt de règim de servei continu fixat en el 90 % de la potència màxima MCR. També s'inclouran les dimensions del motor amb la configuració de 6 cilindres per tal de fer la primera aproximació de l'eslora mínima de la sala de màquines determinada per la longitud del motor.



· Imatge 2: Perfil i Alçat amb les cotes principals del 6-S70MC6. (MAN B&W)

MAN B&W 6-S70MC6	A		B	C	D	E	F	G	H	J
	min.	màx.	5.465	4.304	3.992	11.200	12.450	3.600	8.081	530
Longitud [mm]	10.227	10.490								

· Taula 3: Dimensions principals del 6-S70MC6. (MAN B&W)

A continuació s'exposen en una taula els principals paràmetres de funcionament amb els cabals, calors dissipades, temperatures i volums de: les diferents bombes necessàries pel funcionament del motor, intercanviadors de calor necessaris per dissipar el calor, escalfadors de fuel-oil, volum de gasos d'exhaustació generats i aire comprimit necessari. Tots aquest paràmetres i dades s'utilitzaran posteriorment per calcular, definir i seleccionar tots aquells elements que conformen el sistemes auxiliars a la propulsió necessaris pel funcionament del motor.



MAN B&W 6-S70MC6	Unitats		
Potència del Eix MCR		16.860 kW	14.331kW
Velocitat del Motor MCR		a 91 r/min	A 81,9 r/min
Potència al punt òptim %MCR		100%	90%
Bombes:			
Circulació Fuel-oil	m ³ /h	7,7	7,7
Alimentació Fuel-oil	m ³ /h	4,2	4,2
Aigua de refrigeració de camises	m ³ /h	125	125
Refrigeració centralitzada	m ³ /h	405	357
Aigua Salada	m ³ /h	510	443
Lubricació	m ³ /h	370	370
Intercanviadors de calor:			
<i>Intercanviador d'aire d'escombrat</i>			
Dissipació de calor	kW	6.560	5.596
Quantitat d'aigua centralitzada	m ³ /h	222	189
<i>Intercanviador d'oli de lubricació</i>			
Dissipació de calor	kW	1.340	1.229
Quantitat d'oli de lubricació	m ³ /h	370	370
Quantitat d'aigua centralitzada	m ³ /h	183	168
<i>Intercanviador d'aigua de camises</i>			
Dissipació de calor	kW	2.440	2.159
Quantitat d'aigua de camises	m ³ /h	125	125
Quantitat d'aigua centralitzada	m ³ /h	183	268
<i>Intercanviador central</i>			
Dissipació de calor	kW	10.340	8.984
Quantitat d'aigua centralitzada	m ³ /h	405	357
Quantitat d'aigua salada	m ³ /h	510	443
Escalfador de Fuel-Oil	kW	200	200
Gasos a condicions ISO			
Quantitat de gasos d'exhaustió	kg/h	157.800	134.500
Temperatura dels gasos d'exhaustió	°C	245	234,8
Consum d'aire	kg/s	43	36,7
Sistema d'aire de posta en marxa	bar	30	30
Motor reversible			
Volum de l'acumulador	m ³	2 x 7,5	2 x 7,5
Capacitat total del compressor	m ³ /h	450	450

· Taula 4: Característiques principals i capacitats del 6-S70MC6. (MAN B&W)



4. Dimensionament i distribució de la sala de màquines

4.1. Càlcul de l'eslora de la sala de màquines

La sala de màquines situada a popa del vaixell estarà compresa entre la mampara del tanc de popa i la mampara principal que separa la sala de màquines de la sala de bombes. Aquest espai inclou tancs de doble fons i tancs de costat destinats al emmagatzematge del combustible que es consumeix al motor principal i auxiliars. No obstant la zona de la sala de màquines, a diferència de la zona de càrrega, no compta amb doble casc, únicament doble fons.

Una vegada coneguda la longitud de l'element més voluminós, el motor principal amb 10.490 mm, i per tant el que dictarà l'espai mínim, es farà un càlcul aproximat de la longitud total de la càmera de màquines amb la següent fórmula:

$$L_{CM} = 2,53 \cdot L_{pp}^{0,34} + 3,87 \cdot 10^{-6} \cdot MCR^{1,5}$$

On:

L_{pp} : eslora entre perpendiculars en metres

MCR : potència màxima contínua en kW

$$L_{CM} = 2,53 \cdot 233^{0,34} + 3,87 \cdot 10^{-6} \cdot 16.860^{1,5} = 24.62 \text{ m}$$

Les dimensions seran:

- *Eslora mitja*: 25 m.
- *Màniga mitja*: 42 m (inclosos els tancs de costat).
- *Puntal*: 22,2 m (inclosos els tancs de doble fons).

4.2. Càlcul del doble fons mínim

Per tal de complir amb la normativa de seguretat recollida en el SOLAS, s'estableix una altura mínima del doble fons especialment en vaixells petrolers. Aquesta altura ha d'ésser la mínima entre aquestes expressions:



1. $d_{ab} = \text{Máx} \left(\frac{B}{15}; 1 \right) = \text{Máx} \left(\frac{42}{15}; 1 \right) = 2,8m$
2. $d_{ab} = 2m$

On:

B : mànega de traçat en m

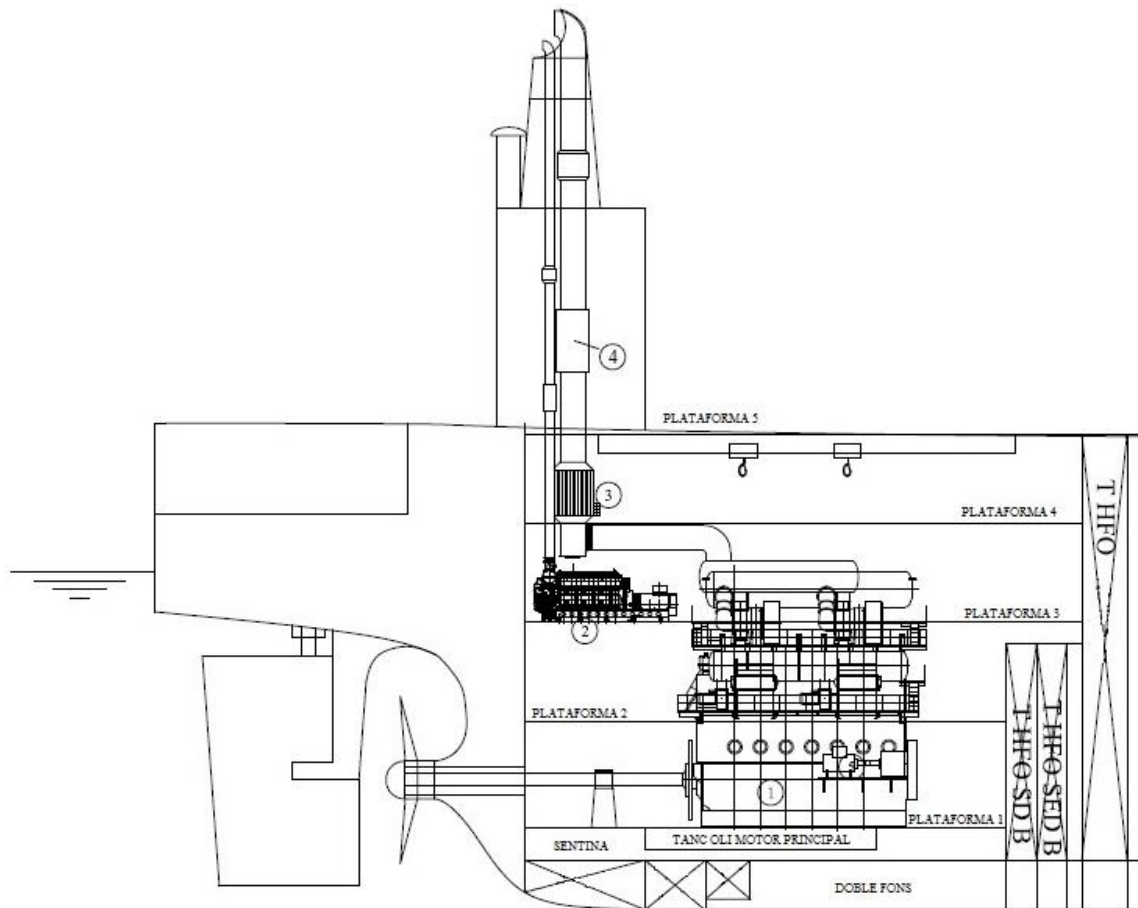
El valor mínim correspon a la segona expressió, obtenint un doble fons amb una altura mínima de 2 metres.

4.3. Distribució dels elements principals

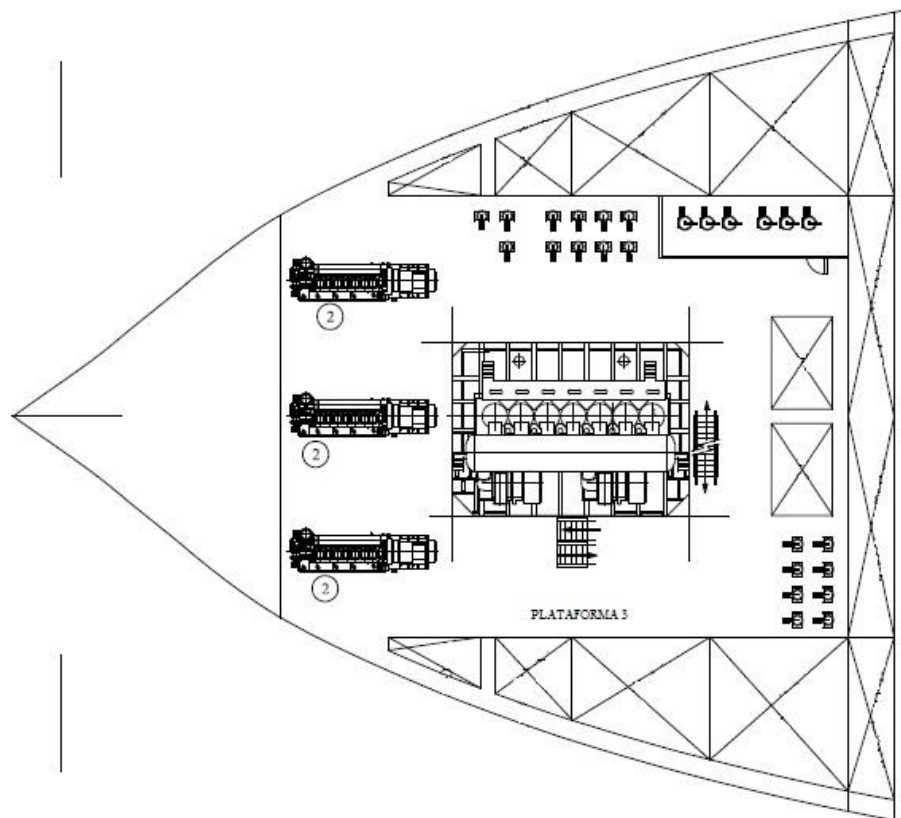
Per tal de repartir el més equilibrat possible el pes dels elements principals es distribuïran de la manera següent:

- **Motor principal (1)**: situat en la plataforma més baixa de la sala de màquines, per sobre de la sentina i els tancs de doble fons. La posició serà la més centrada possible respecte l'eslora de la sala de màquines, respectant la longitud mínima que ha de tenir l'eix de l'hèlix.
- **Motors auxiliars (2)**: s'instal·laran un total de tres motors auxiliars amb generador incorporat (es definiran i calcularan més endavant), aniran situats en la tercera plataforma coincidint amb la plataforma de culates del motor principal. Es situaran a popa del motor principal, equidistants entre ells.
- **Calderes auxiliars (3)**: es situaran a la quarta plataforma per sobre dels motors auxiliars. També a popa del motor principal. Aniran situades a la part inferior del guardacalor per on discorreran els conductes d'exhaustació del motor principal i auxiliars.
- **Caldera de recuperació de gasos d'exhaustació (4)**: es situarà ja dins el guardacalor, en la cinquena plataforma just per sobre de la calderes auxiliars.

A continuació es mostren uns plans d'una distribució de sala de màquines com la descrita amb els diferents elements repartits en les diverses plataformes.



· Imatge 3: Alçat de la distribució de la sala de màquines i elements principals.



· Imatge 4: Planta de la distribució de la sala de màquines, Plataforma 3.



5. Sistemes auxiliars

Per tal que el motor principal seleccionat funcioni amb els paràmetres establerts pel fabricant i exposats en apartats anteriors, és necessari un nombre important de sistemes auxiliars que li aportin els diferents serveis de lubricació, combustible, refrigeració etc.

A part d'ésser un motor dièsel el propulsor principal, la maquinària auxiliar és de caràcter elèctric i per tant requerirà una font de generació elèctrica per alimentar-la, en aquest cas, els tres grups de motor més generador que s'ha indicat que s'instal·larien en l'apartat de distribució d'elements. En vaixells on la maquinària principal és de vapor, aquest vapor s'utilitza també per accionar la maquinària auxiliar.

No obstant alguns dels sistemes auxiliars presents a la sala de màquines necessiten el vapor per funcionar, especialment per temes de calefacció de la càrrega i tancs de combustible pesat, que requereixen una temperatura adequada que permeti la correcta manipulació i transport. Per tal de garantir aquests serveis amb vapor, s'instal·larà per una banda dues calderes auxiliars que funcionaran durant les estades a port (una en reserva i l'altra en funcionament), i per l'altre, una caldera de recuperació de gasos d'exhaustació que aprofitarà el calor dels gasos generats pel motor principal per generar el vapor necessari per els sistemes auxiliars que el necessitin i per la calefacció dels tancs de combustible de fuel-oil.

Per tal de dissenyar cada un dels sistemes auxiliars, es seguiran els requeriments establerts per la societat de classificació del vaixell, complint amb les normes de seguretat i prevenció de la contaminació recollides en els codis SOLAS i MARPOL, així com també es seguiran totes les recomanacions proporcionades pel fabricant del motor principal facilitades en la guia de projecte.

Els sistemes auxiliars a dissenyar seran els següents:

- **Sistema de combustible**
- **Sistema de lubricació**
- **Sistema de refrigeració**
- **Sistema d'aire comprimit**
- **Sistema d'exhaustació**



5.1. Sistema de combustible

El sistema de combustible és l'encarregat de subministrar el combustible que requereixen els consumidors pel seu funcionament, amb unes característiques bàsiques d'autonomia, neteja, pressió, temperatura i viscositat adequades. Els principals consumidors són:

- **Motor Principal**
- **Motors Auxiliars**
- **Calderes Auxiliars**

5.1.1. Tipus de combustibles

El vaixell portarà a bord dos tipus de combustibles:

- **Heavy Fuel Oil (HFO) 700 cSt.**

Aquest combustible de 700 cSt de viscositat a 50 °C es consumirà al Motor principal, Motors Auxiliars i Calderes Auxiliars. Les principals característiques es mostren a continuació.

Propietats	Unitats	HFO 700 cSt
Densitat a 15 °C	kg/m ³	1.010
Viscositat cinemàtica a 50 °C	cSt	700
Punt d'inflamació	°C	60
Punt de fluidificació	°C	30
Residus Carbonosos	m/m (%)	15
Sofre	m/m (%)	1,5
Cendra	m/m (%)	0,05
Vanadi	mg/kg (ppm)	100
Alumini i Silici	mg/kg (ppm)	30
Sediments totals	m/m (%)	0,1
Aigua	v/v (%)	0,5

· Taula 5: Característiques principals del combustible HFO 700cSt. (MAN B&W)



A part d'aquestes característiques en l'annex VI del MARPOL referent a les emissions de NO_x , s'estipula que els vaixells amb motors dièsel lents, consumiran un combustible que les seves emissions tinguin un contingut màxim de Òxids de Nitrogen de 17 g/kWh.

D'igual manera en aquesta regulació s'estableix que el vaixell haurà de comptar amb dos tipus de combustibles, utilitzant un o altre segons la zona per on navegui, complint els següents paràmetres de prevenció de la contaminació per SO_x :

- El combustible utilitzat no superarà el 3,5% (massa/massa) de contingut en sofre.
- En les zones ECA (Emission Control Areas) no es pot superar el 1% (massa/massa) de contingut en sofre.

A l'haver seleccionat un combustible amb un 1,5% en massa de contingut en sofre, es compleix amb la normativa establerta a l'annex VI del MARPOL, pel que no serà necessari comptar amb dos combustibles amb l'excepció de les zones ECA que s'haurà de consumir MDO.

· Marine Diesel Oil (MDO).

Aquest s'utilitzarà principalment en estàncies en ports que la normativa limiti les emissions de SO_x per sota del 1,5% (massa/massa). Per engegar el motor principal i auxiliars, o quant l'estància en port es prevegi de llarga durada i compensi omplir els conductes de combustible dièsel, evitant així que el HFO no quedi en els conductes podent obstruir-los. En les zones ECA es consumirà també MDO.

Es selecciona un combustible d'acord amb la norma ISO 8217, tipus MDX que és el que compleix amb un contingut de sofre inferior al 1% per tal de complir amb els requisits del MARPOL VI. Les seves característiques són les següents:

Propietats	Unitats	MDO MDX
Densitat a 15 °C	kg/m ³	890
Viscositat cinemàtica a 40 °C	cSt	60
Punt d'inflamació	°C	60
Punt de fluïdificació	°C	-6
Sofre	m/m (%)	1
Cendra	m/m (%)	0,01
Aigua	v/v (%)	0,05

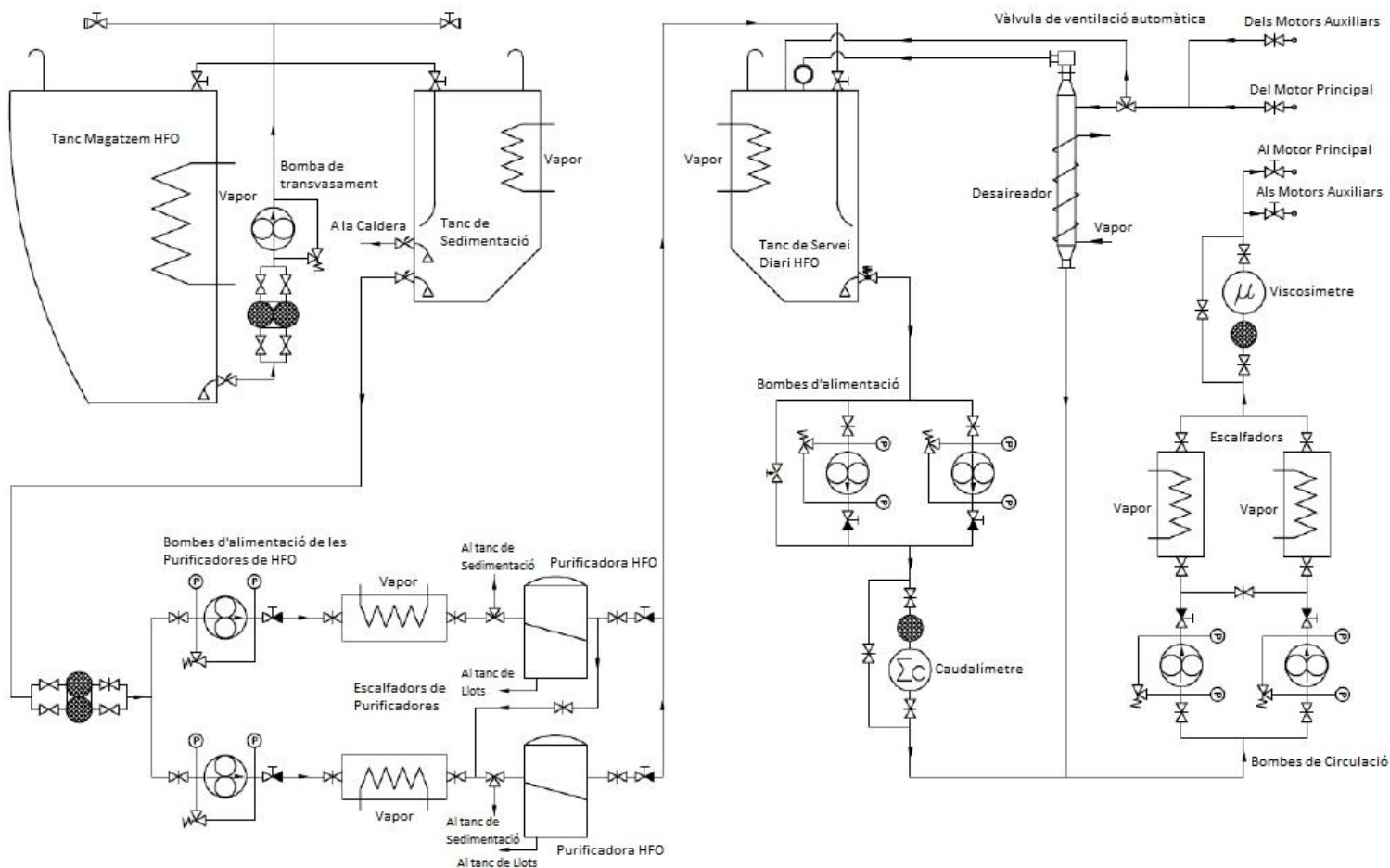
· Taula 6: Característiques principals del combustible MDO MDX. (MAN B&W)



5.1.2. Objectiu del sistema de combustible

Perquè el fuel-oil pugui ésser utilitzat directament pels diferents consumidors esmentats, es necessita un procés previ d'escalfament, sedimentació, separació i purificació. Per tant l'objectiu que ha de complir aquest sistema auxiliar es el de donar el servei adequat als consumidors amb el mínim consum energètic possible.

En primer lloc es calcularà el volum total de combustible necessari pel funcionament dels consumidors complint amb l'autonomia de 35.000 milles requerida, repartir-lo entre els diferents tancs que es detallaran més endavant, així com dimensionar els elements principal del sistema de combustible.



· *Imatge 5: Esquema del Sistema de Combustible amb els elements principals. Tots els esquemes del treball s'han extret de manuals de MAN B&W amb la simbologia pròpia del fabricant.*

En l'esquema del sistema, de combustible podem diferenciar tres subsistemes que desenvolupen diferents operacions:

- **Transvasament:** ha de ser capaç de rebre i emmagatzemar el combustible a bord, subministrar-lo al tanc de sedimentació així com també realitzar el transvasament entre els tancs magatzem.



- **Purificació:** aquest procés és l'encarregat d'eliminar les impureses i l'aigua que conté el combustible abans d'enviar-lo als tancs de servei diari.
- **Alimentació:** el combustible emmagatzemat en els tancs de servei diari s'envia al motor principal i motors auxiliars amb unes característiques determinades de pressió i temperatura aptes per la seva crema en els cilindres. Les calderes auxiliars s'abastiran directament des del tanc de sedimentació ja que no requeriran d'un tractament previ del combustible.

El sistema de combustible tindrà unes característiques determinades com que les línies de succió del combustible dels tancs s'utilitzaran també com a línies d'ompliment, les aspiracions estaran el suficientment separades del fons del tanc per prevenir l'aspiració d'aigua i dipòsits sedimentats. Els tancs de servei diari i sedimentació disposaran de purgues en la seva part inferior. Totes les bombes del sistema de combustible es podran aïllar mitjançant vàlvules de tancament.

5.1.3. Dimensionament dels tancs de HFO

Pel dimensionament dels tancs de combustible s'imposarà que la capacitat màxima de cada tanc de combustible no podrà ser superior a 2.500 m^3 , complint així amb el conveni MARPOL, Annex I sobre "*Prevenió de la contaminació per hidrocarburs*" Capítol III sobre "*Prescripcions aplicable als espais de màquines de tots els vaixells*", normativa aplicable a tots els vaixells amb una capacitat de combustible igual o superior a 600 m^3 .

Per tal de dimensionar la capacitat dels diversos tancs de combustible es llistaran els equips que es troben funcionant en les diverses condicions d'operació del vaixell.

· **Navegació:**

- Motor Principal
- Motors Auxiliars
- Les necessitats de vapor les cobrirà la caldera de gasos d'exhaustació

· **Maniobra:**

- Motor Principal
- Motors Auxiliars
- Calderes Auxiliars

· **A port:**



- Motors Auxiliars
- Calderes Auxiliars

El vaixell compta amb una caldera de recuperació dels gasos d'exhaustió per generar el vapor necessari durant la navegació. Per operar el vaixell durant les estades a port s'instal·laran dues calderes auxiliars per generar 40.000 kg/h de vapor cada una, una estarà en servei mentre l'altre estarà en reserva. La producció de vapor s'extrapola de vaixells petrolers de similars característiques. Aquestes no es tindran en compte en els càlculs dels consums ja que només estaran operatives en ocasions limitades però en cap cas durant un règim d'operació continuat. Es seleccionaran en apartats posteriors.

5.1.3.1. Tancs de Servei Diari de HFO

El combustible arriba als tancs de servei diari procedent de les purificadores de combustible on s'ha elevat la seva temperatura per sobre dels 90°C. Aquests compleixen una funció important en el tractament del combustible complementant els tancs de sedimentació, decantant amb major precisió el combustible de les impureses que encara no s'han eliminat en el tanc de sedimentació i purificadores, a més estableix tèrmicament el fuel-oil a una temperatura d'uns 90°C.

Els tancs de servei diari, han de tenir el combustible llest per ser utilitzat als motors. Aquests són omplerts contínuament amb les purificadores, si vessen el combustible anirà als tancs de sedimentació. Com s'ha comentat comptaran amb drenatges al fons del tanc per tal d'extreure impureses que seran descarregades al tanc de Llots.

Els tancs de servei diari seran un total de dos i tindran cadascun d'ells una capacitat mínima per subministrar combustible al motor principal i motors auxiliars durant 8 hores, segons recullen les normes de la Societat de Classificació ABS, no obstant es dissenyaran per un subministrament de 24 hores. A més es considerarà un 5% addicional de la seva capacitat per l'emmagatzematge de llots en el fons del tanc i un 4% per tenir en compte el volum ocupat pels reforços interns del tanc. Seran simètrics a cada costat de la línia de crugia, estaran situats una plataforma per sobre la plataforma de culates. Per facilitar el buidat els tancs estaran lleugerament inclinats.

Les dades dels consumidors que ens determinaran la capacitat dels tancs de servei diari són:

- **Motor Principal:** s'agafarà el consum a la potència MCR corresponent al 100% de càrrega 16.860 kW, sent de 169 g/kWh. La densitat del fuel utilitzat és de 1.010 kg/m³.
- **Motors Auxiliars:** tot i que s'instal·laran un total de tres, en funcionament continu n'haurà únicament dos amb una potència MCR corresponent al 100% de càrrega de 800 kW cadascun, amb un consum específic de 193 g/kWh.



El volum de cada tanc de combustible és funció del consum específic dels motors, de la potència i l'autonomia sent:

$$V_{TSD} = \frac{\text{Consum} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right) \cdot \text{Potència}_{MCR} (\text{kW})}{\rho_{HFO} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} \cdot \text{Autonomia} (h)$$

Com ja s'ha indicat anteriorment s'aplicarà un marge total del 9%, corresponent a l'acumulació de llots al fons del tanc (5%) i l'espai ocupat pels reforços interns del tanc (4%).

$$V_{TSD} = 1,09 \cdot \frac{0,169 \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 16.860 \text{ kW} + 2 \cdot \left(0,193 \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 800 \text{ kW} \right)}{1.010 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \cdot 24 \text{ h}$$

$$V_{TSD} = 81,79 \text{ m}^3 \approx 82 \text{ m}^3$$

La capacitat total dels tancs de servei diari serà de 164 m^3 , dividit en dos tancs iguals de 87 m^3 cadascun d'ells.

5.1.3.2. Tancs de Sedimentació de HFO

Aquests rebran el combustible procedent del tancs magatzem complint varies funcions en el tractament del fuel-oil. En primer lloc permeten que una gran part de l'aigua i partícules presents en el combustible sedimentin en el fons, aquest compta amb connexions pel seu drenatge per:

- Drenar el fons del tanc directament al tanc de llots.
- Buidar el tanc mitjançant les bombes de transvasament.
- Purificar el sediments del fons recirculant el combustible altre vegada al mateix tanc passant per les purificadores o enviant el combustible purificat a qualsevol dels dos tancs de servei diari.

Aquests tancs compten amb mitjans per escalfar, desairejar i estabilitzar tèrmicament el combustible. Segons normativa del ABS han d'estar dissenyats per emmagatzemar combustible amb un punt d'ignició superior a 60°C .

S'instal·laran dos tancs de sedimentació, cada un dels quals haurà de poder subministrar combustible al motor principal i els dos motors auxiliars a plena càrrega



durant 24 hores. Aquests també es situaran en una plataforma per sobre de la plataforma de culates, simètrics, un a cada costat de la línia de crugia.

Els tancs de sedimentació seran amb el fons inclinat per millorar la separació de l'aigua i els sediments. La línia per omplir el tanc de sedimentació s'instal·larà per sota de la mitat de l'altura del tanc i orientada cap a una mampara per tal de reduir esquitxos, minimitzant el perill de generació de gas combustible a l'espai buit del tanc.

Els tancs de sedimentació tindran dos línies d'aspiració una alta i una altra de baixa. Aquesta doble aspiració redueix la possibilitat de succionar aire per part de les bombes, sent l'aspiració normal la de la línia baixa, excepte quant es detecta aigua en el fons que s'utilitzarà la línia d'aspiració superior. Tindran línies de vessament en la seva part més superior que conduirà els possible vessament al tanc de vessaments de HFO.

D'igual manera que els tancs de servei diari es sobredimensionaran un 4% de la seva capacitat per tenir en compte el volum perdut pels reforços interns del tanc, i un marge major per formació de llots en el fons del tanc del 10%.

$$V_{TS} = 1,14 \cdot \frac{0,169 \text{ kg/kW} \cdot h \cdot 16.860 \text{ kW} + 2 \cdot \left(0,193 \text{ kg/kW} \cdot h \cdot 800 \text{ kW} \right)}{1.010 \text{ kg/m}^3} \cdot 24 \text{ h}$$

$$V_{TS} = 85,55 \text{ m}^3 \approx 86 \text{ m}^3$$

La capacitat total dels tancs de servei diari serà de 172 m^3 , dividit en dos tancs iguals de 91 m^3 cadascun d'ells.

5.1.3.3. Tancs Magatzem de HFO

Són els tancs de major capacitat de HFO. L'operació d'ompliment d'aquests tancs es realitza a través de connexions situades a la coberta i mitjançant un acoblament a la presa del port, gavarra etc. Aquests hauran de comptar amb vàlvules antiretorn situades a la part superior del tanc. L'emplenament es controla amb una sonda de nivell situada a cada tanc per tal d'omplir simultàniament els tancs de babord i estribord i així evitar escores. Aquests comptaran amb línies per prendre mostres per comprovar la qualitat del fuel subministrat.

A cada presa de combustible s'haurà d'instal·lar els següents elements:



- Una vàlvula de comporta de volant fixe, la seva funció serà la d'obrir o tancar el subministrament de combustible des de l'exterior.
- Dos filtres de succió independents en paral·lel, un funcionant i l'altre en reserva, la seva missió és la de protegir la bomba d'emplenament.
- Un cabalímetre de fuel-oil juntament amb un manòmetre per tal de saber en tot moment si el cabal i pressió del combustible és l'adequat.

Aquests tancs comptaran amb serpentins d'escalfament per vapor per tal de controlar la temperatura mantenint-la sobre els 50°C necessaris per una manipulació adequada del combustible.

El combustible es transvasarà dels tancs magatzem als tancs de sedimentació mitjançant les bombes de transvasament, que hauran de tenir un filtre doble automàtic, de manera que es puguin autonetejar sense interrompre el servei. Les bombes de transvasament també hauran de tenir un dispositiu de parada automàtica per quant s'arribi a alt nivell en els tancs de sedimentació.

Com dicta la normativa del ABS aquests tancs hauran de ser preferiblement part de l'estructura del vaixell ubicats a una distància prudencial del espais de màquines. Habitualment s'instal·len dos tancs o múltiples de dos, en aquest cas en particular s'instal·laran quatre tancs magatzem simètrics respecte la línia de crugia. S'ha de complir la norma establerta per MARPOL de no superar el màxim de capacitat permesa per cada tanc de 2500 m³.

La capacitat total dels tancs magatzem es calcula com la diferència entre el volum total de HFO necessari per donar subministrament al motor principal i els dos auxiliars durant l'autonomia menys el volum del combustible emmagatzemat en els tancs de sedimentació.

Segons les especificacions del projecte l'autonomia del vaixell ha de ser de 35.000 milles, a una velocitat de disseny de 14 nusos. Amb aquestes dades el número d'hores de navegació serà:

$$\frac{\text{Autonomia (milles)}}{\text{Velocitat (nusos)}} = \frac{35.000 \text{ milles}}{14 \text{ nusos}} = 2.500 \text{ hores}$$

El volum total de fuel-oil que s'haurà d'emmagatzemar en el vaixell per tal de complir amb els requisits de l'autonomia serà:



$$V_{Total\ HFO} = \frac{0,169\ kg/kW \cdot h \cdot 16.860\ kW + 2 \cdot \left(0,193\ kg/kW \cdot h \cdot 800\ kW \right)}{1.010\ kg/m^3} \cdot 2.500\ h$$

$$V_{Total\ HFO} = 7.817,17\ m^3 \approx 7.817\ m^3$$

Al volum total necessari per complir amb l'autonomia obtingut li restem el volum del combustible emmagatzemat als tancs de sedimentació. A l'igual que en els tancs de sedimentació es considerarà un marge del 4% per el volum perdut pels elements estructurals i un marge per formació de llots en el fons del 5%.

$$V_{TM} = 1,09 \cdot (V_{Total\ HFO} - V_{TS})$$

$$V_{TM} = 1,09 \cdot (7.817m^3 - 172m^3) = 8.333,05 \approx 8.333\ m^3$$

Aquest volum obtingut es repartirà entre els quatre tancs magatzem, quedant 2.083,25 m³ cada tanc magatzem, per sota del màxim establert per la normativa MARPOL que fixa aquest màxim en 2.500 m³.

5.1.3.4. Tanc col·lector de retorns

La funció del tanc col·lector de retorns és la de rebre el combustible sobrant del injectors del motor principal i motors auxiliars, a més controla les possibles gasificacions del combustible ventilant-les als tancs de servei diari.

Aquest tanc ha de tenir una capacitat igual al consum de combustible del motor principal durant 20 minuts de funcionament. Es considerarà també un marge del 4% pel volum perdut en elements estructurals interns.

$$V_{TCR} = 1,04 \cdot \frac{0,169\ kg/kW \cdot h \cdot 16.860\ kW + 2 \cdot \left(0,193\ kg/kW \cdot h \cdot 800\ kW \right)}{1.010\ kg/m^3} \cdot 1/3\ h$$

$$V_{TCR} = 1,08\ m^3$$



5.1.3.5. Tanc de vessaments de HFO

Aquest tanc recull els vessaments i sobreiximents dels diferents tancs i elements del sistema de combustible de fuel-oil. La capacitat d'aquest tanc s'estima habitualment com la quantitat de combustible necessari per fer funcionar el motor principal durant 5 hores.

$$V_{TV} = 1,04 \cdot \frac{0,169 \text{ kg/kW} \cdot h \cdot 16.860 \text{ kW}}{1.010 \text{ kg/m}^3} \cdot 5 \text{ h}$$

$$V_{TV} = 14,67 \text{ m}^3$$

5.1.3.6. Tanc de llots

En el tanc de llots s'emmagatzemen els residus de la depuració del combustible procedents dels tancs de sedimentació, servei diari i purificadoros.

Les descàrregues del tanc de llots es poden enviar a:

- Tancs de recepció a terra.
- Incinerador a bord si es disposa.
- Tancs "slop" o de residus.

El tanc de llots ha de ser capaç de connectar-se amb les instal·lacions de recepció mitjançant un conducte de descàrrega. Per això, i segons la normativa del conveni MARPOL haurà de comptar amb una connexió universal descrita en Annex 1 capítol II regla 13 d'aquest conveni.

Pel dimensionament del tanc de llots també es farà servir el conveni MARPOL, regla 17 del Annex 1. Aquest especifica que per vaixells construïts posteriorment al 31 de Desembre de 1990, i que no porten aigua de llast en tancs de fuel-oil, la capacitat mínima dels tancs de llots es calcularà amb la següent expressió:

$$V_{TLL} = k_1 \cdot C \cdot D \text{ (m}^3\text{)}$$

On:

- k_1 : és un coeficient igual a 0,015 per tractar-se de un vaixell amb un procés de depuració de fuel-oil destinat a la màquina principal.
- C : és el consum diari de fuel-oil en m^3 .



· D : és el període màxim, amb dies, de travessa entre ports en el quals es pot descarregar els llots a terra. La interpretació unificada del conveni MARPOL recomanada agafar 30 dies per a casos similars a aquest, en el qual no es tenen dades precises.

$$V_{TLL} = 1,04 \cdot 0,015 \cdot \left(\frac{0,169 \text{ kg/kWh} \cdot 16.860 \text{ kW} + 2 \cdot (0,193 \text{ kg/kWh} \cdot 800 \text{ kW})}{1.010 \text{ kg/m}^3} \right) \cdot 24 \text{ h} \cdot 30 \text{ dies}$$

$$V_{TLL} = 35,12 \text{ m}^3$$

5.1.4. Dimensionament dels tancs de MDO

Pel sistema de combustible de Dièsel-Oil s'instal·laran dos tancs magatzem i un únic tanc de servei diari, a diferència del sistema de Fuel-Oil aquest no tindrà tanc de sedimentació. A l'igual que el sistema de tancs de Fuel-Oil es sobredimensionaran els tancs un 4% per considerar les pèrdues de capacitat. Seguint les especificacions preliminars del projecte s'ha de comptar amb una capacitat total de combustible dièsel-oil de 400 m³. Aquest volum d'MDO ens permet una navegació i estada ens zones ECA de 4,5 dies aproximadament, amb dos auxiliars i el motor principal en funcionament. Si es suposa la parada del motor principal en les estades a port, aquesta autonomia, de només amb MDO, es pot allargar més. D'igual manera es suposarà que en les zones ECA s'ompliran els tancs de MDO per garantir l'autonomia necessària.

5.1.4.1. Tanc de Servei Diari de MDO

Aquest tanc es dimensionarà per tal de poder subministrar al motor principal i els dos motors auxiliars durant 24 hores. Per tal de realitzar els càlculs s'estableix una densitat del dièsel-oil de 890 kg/m³.

$$V_{TSD_{MDO}} = \frac{\text{Consum} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right) \cdot \text{Potència}_{MCR} (\text{kW})}{\rho_{MDO} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} \cdot \text{Autonomia} (\text{h})$$

$$V_{TSD_{MDO}} = 1,04 \cdot \frac{0,169 \text{ kg/kW} \cdot \text{h} \cdot 16.860 \text{ kW} + 2 \cdot (0,193 \text{ kg/kW} \cdot \text{h} \cdot 800 \text{ kW})}{890 \text{ kg/m}^3} \cdot 24 \text{ h}$$

$$V_{TSD_{MDO}} = 88,57 \text{ m}^3 \approx 89 \text{ m}^3$$



5.1.4.2. Tancs Magatzem de MDO

La capacitat dels dos tancs magatzem de dièsel-oil s'obté restant la capacitat del tanc de servei diari a la capacitat total de combustible dièsel-oil especificada en les dades preliminars del projecte que fixa un total de 400 m³.

$$V_{TM_{MDO}} = 1,04 \cdot (V_{Total_{MDO}} - V_{TSD_{MDO}})$$

$$V_{TM_{MDO}} = 1,04 \cdot (400 \text{ m}^3 - 89 \text{ m}^3) = 323,44 \text{ m}^3 \approx 324 \text{ m}^3$$

La capacitat total dels tancs magatzem de dièsel-oil serà de 324 m³, dividits en dos tancs simètrics de 162 m³ a cada costat de la línia de crugia, estaran situats una plataforma per sobre la plataforma dels motors auxiliars. Per facilitar el buidat els tancs estaran lleugerament inclinats.

5.1.4.3. Tanc de vessaments de MDO

Aquest tanc recull els vessaments i sobreeiximents dels diferents tancs i elements del sistema de combustible de dièsel-oil. A l'igual que el tanc de vessaments de HFO la capacitat d'aquest tanc s'estimarà com la quantitat de combustible necessari per fer funcionar el motor principal durant 5 hores.

$$V_{TV_{MDO}} = 1,04 \cdot \frac{0,169 \text{ kg/kW} \cdot \text{h} \cdot 16.860 \text{ kW}}{890 \text{ kg/m}^3} \cdot 5 \text{ h}$$

$$V_{TV_{MDO}} = 16,64 \text{ m}^3$$



Taula resum de tancs de combustible

Tanc	Nº de tancs	Capacitat (m ³)	Tipus de Combustible	Autonomia per tanc	Temperatura (°C)
Magatzem HFO	4	2083,25	HFO 700 cSt	26 dies	50
Sedimentació	2	91	HFO 700 cSt	24 hores	60
Servei Diari HFO	2	87	HFO 700 cSt	24 hores	90
Col·lector de retorns	1	1,08	HFO 700 cSt	20 minuts	90
Vessaments HFO	1	14,67	HFO 700 cSt	5 hores	50
Llots	1	35,12	HFO/MDO	30 dies	50
Magatzem MDO	2	162	MDO MDX	1 dia 20hores	35
Servei Diari MDO	1	89	MDO MDX	1 dia	35
Vessaments MDO	1	16,64	MDO MDX	5 hores	35

· Taula 7: Resum de tancs de combustible a bord.

5.1.5. Dimensionament i selecció de bombes de combustible

Totes les bombes instal·lades en el sistema de combustible seran de desplaçament positiu, d'accionament elèctric, comptaran amb filtres dobles de protecció en l'aspiració, vàlvules de seguretat i línia de bypass.

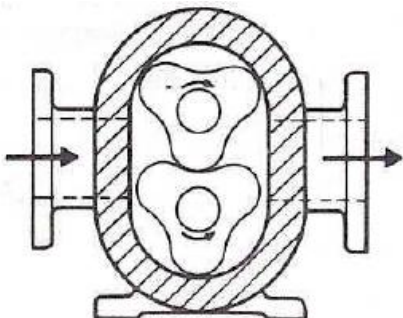
5.1.5.1. Bombes de transvasament de HFO

Per les operacions de transvasament s'instal·laran dues bombes rotatives de desplaçament positiu. Aquestes ens donaran un cabal mitjà amb pressions altes, treballen bé amb fluids viscosos. El cabal de la bomba de transvasament dependrà del consum de combustible i de la capacitat del tanc de sedimentació. Aquestes aspiraran el combustible dels tancs magatzem a través d'un filtre doble i descarregaran al tanc de sedimentació.

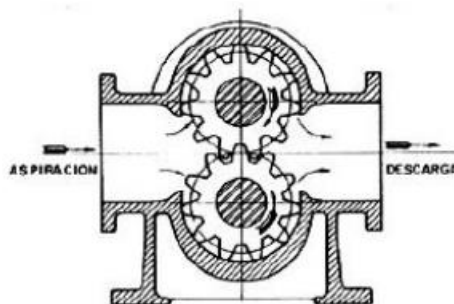


El seu funcionament consisteix en que les parts giratòries o “*impellers*” creen una succió del combustible en l’aspiració, forçant-lo, amb el seu moviment giratori, a través de la descàrrega. El principi de desplaçament consisteix en el moviment de combustible causat per la disminució del volum de una càmera.

Les més utilitzades per aquest tipus de sistemes són les bombes de lòbuls o cargol.



· Imatge 6: Bomba de lòbuls.



· Imatge 7: Bomba de cargol.

Pel dimensionament de les bombes de transvasament s’imposarà que cada una de les dues bombes instal·lades haurà de garantir un cabal deu vegades superior al consum del motor principal. També cada bomba de transvasament haurà de poder omplir un tanc de sedimentació en quatre hores per tal de garantir un temps de sedimentació mínim abans de posar-lo en servei. El cabal triat per les bombes de transvasament serà el major de les dues condicions a complir:

- Garantir un cabal igual a deu vegades el consum del motor principal:

$$Q = 10 \cdot \frac{\text{Consum} \cdot \text{Potència}_{MCR}}{\rho_{HFO}}$$

$$Q = 10 \cdot \frac{0,169 \text{ kg/kW} \cdot \text{h} \cdot 16.860 \text{ kW}}{1.010 \text{ kg/m}^3} = 28,21 \text{ m}^3/\text{h}$$

- Omplir un tanc de sedimentació en quatre hores:

$$Q = \frac{V_{TS}}{t}$$

$$Q = \frac{91 \text{ m}^3}{4 \text{ h}} = 22,75 \text{ m}^3/\text{h}$$

Veient els resultats obtenim que el major cabal i per tant el que haurà de tenir la bomba és el de garantir un cabal deu vegades major que el consum del motor principal



corresponent a 28,21 m³/h. Per determinar la potència absorbida per cada bomba, establim un salt de pressió de 4 kg/cm². Per tal d'obtenir el resultat en kW es farà l'aproximació que 1 kg·m/s = 10⁻² kW. A part s'imposarà un rendiment mecànic de la bomba del 60% i un rendiment elèctric del 80%.

$$P_{bba} = \frac{Q \left(\frac{m^3}{s} \right) \cdot \Delta p \left(\frac{kg}{m^2} \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{kW}{kg \cdot m/s} \right)}{\eta}$$

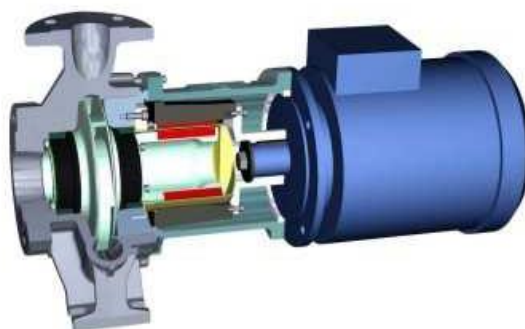
$$P_{bba} = \frac{\frac{28,21}{3600} \left(\frac{m^3}{s} \right) \cdot 4 \cdot 10^4 \left(\frac{kg}{m^2} \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{kW}{kg \cdot m/s} \right)}{0,6} = 5,22 \text{ kW}$$

$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{5,22 \text{ kW}}{0,8} = 6,53 \text{ kW} \approx 7 \text{ kW}$$

Amb les dades de cabal i potència necessaris per les condicions de disseny i funcionament, es selecciona dues bombes del fabricant ALLWEILER de la sèrie Allmag CMA. La bomba en qüestió és del tipus centrífuga amb vàlvula de by-pass incorporada. Es pot instal·lar verticalment o horitzontalment. Està dissenyada per treballar amb fluids agressius. Les seves especificacions tècniques es mostren a continuació:

	Unitats	
Cabal màxim	80	m ³ /h
Altura	55	m
Pressió	16	bar
Temperatura	150	°C

· Taula 8: Especificacions de les bombes de transvasament.



· Imatge 8: Bomba de transvasament de Fuel-Oil Allmag CMA .



5.1.5.2. Bombes d'alimentació de la purificadora de HFO

Aquestes bombes tenen la missió de transvasar el fuel-oil des del tanc de sedimentació al tanc de servei diari a través de les purificadores que es detallaran més endavant. Se n'instal·laran dues en paral·lel i en sèrie amb la separadora. Ja que la autonomia de cada tanc de servei diari és de 24 hores, la separadora haurà de ser capaç de realitzar la separació en un temps menor, en aquest cas concret la capacitat de separació de la depuradora serà de 12 hores.

Tenint en compte això, el cabal de la bomba d'alimentació de la purificadora serà funció del volum de fuel-oil que consumeixen el motor principal i els auxiliars per una autonomia de 24 i del temps de separació.

$$Q = \frac{\sum \left[\text{Consum} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right) \cdot \text{Potència (kW)} \right] \cdot \text{Autonomia (h)}}{\rho_{\text{HFO}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot t_{\text{separació}} \text{(h)}}$$

$$Q = \frac{0,169 \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 16.860 \text{kW} + 2 \cdot \left(0,193 \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 800 \text{kW} \right)}{1.010 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 12 \text{h}} \cdot 24 \text{h}$$

$$Q = 6,25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Per tal de calcular la potència absorbida per cada una d'aquestes bombes es realitzarà el mateix càlcul que per les bombes de transvasament amb un salt de pressió de 4 bar per tenir en compte les pèrdues de càrrega.

$$P_{bba} = \frac{\frac{6,25}{3600} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \cdot 4 \cdot 10^4 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{\text{kW}}{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}} \right)}{0,6} = 1,16 \text{ kW}$$

$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{1,16 \text{ kW}}{0,8} = 1,44 \text{ kW} \approx 1,5 \text{ kW}$$

Degut a la versatilitat i rangs de funcionament s'instal·laran també dues bombes ALLWEILER de la sèrie Allmag CMA iguals que les seleccionades pel sistema de transvasament de combustible, això permetrà la reducció del stock de recanvis necessaris al ser les quatre bombes del mateix fabricant i mateix model.



5.1.5.3. Bombes d'alimentació i circulació de combustible

El combustible que es troba als tancs de servei diari encara no té les condicions de pressió i temperatura necessàries pel seu consum en el motor principal i motors auxiliars, ja que s'emmagatzema a uns 90°C. Això obliga a utilitzar sistemes que elevin la temperatura fins a valors propers als 150°C per tal d'obtenir la viscositat recomanada pel fabricant a l'entrada de les bombes d'injecció del motor principal i auxiliars que normalment es troba entre 16 i 24 cSt.

El sistema d'alimentació consta de dues etapes diferenciades:

- L'etapa de baixa pressió, on les bombes d'alimentació, una en funcionament i l'altre en reserva, aspiren el combustible del tanc de servei diari i descarreguen al tanc col·lector de retorns. Per tal d'evitar la gasificació del combustible, el circuit de baixa pressió es manté a una pressió de 4 bar. Pel càlcul de la potència absorbida per la bomba d'alimentació s'agafarà un salt de pressió de 5 bar per tal de comptabilitzar les pèrdues de càrrega. El cabal de mínim que haurà de subministrar cada bomba serà de 4,2 m³/h establert pel fabricant del motor principal en els paràmetres de funcionament vistos en apartats anteriors. Pels motors auxiliars (que es veuran en apartats posteriors) s'estableix un cabal el doble del consum de cada motor en funcionament. La temperatura de treball de la bomba serà de 100°C.

- L'etapa d'alta pressió, on les bombes de circulació o "*booster pumps*" aspiren el combustible del tanc col·lector de retorns, elevant la pressió del combustible a la pressió d'alimentació del col·lector d'admissió del motor corresponent. Segons les especificacions del fabricant del motor les bombes de circulació han de subministrar el combustible a una pressió de 8 bar, si tenim en compte les pèrdues de càrrega la pressió haurà de ser d'uns 10 bar. Per tant el salt de pressió necessari serà de 6 bar, ja que aspira del circuit de baixa que es troba a 4 bar. El cabal de mínim que haurà de subministrar cada bomba serà de 7,7 m³/h establert pel fabricant del motor principal en els paràmetres de funcionament vistos en apartats anteriors. Pels motors auxiliars (que es veuran en apartats posteriors) s'estableix un de cinc vegades el consum de cada motor en funcionament. La temperatura de treball de la bomba serà de 150°C.

Per tal de garantir que els paràmetres de cabal i temperatura es compleixen s'instal·larà després de les bombes d'alimentació un cabalímetre que mesurarà en tot moment el cabal subministrat. Després de les bombes de circulació i els escalfadors de combustible s'instal·larà un viscosímetre per tal de regular l'escalfament que han de realitzar el escalfadors en qüestió.

El control de la viscositat és fonamental per aconseguir una combustió eficient i completa en el motors, contribuint a la vegada a un major rendiment i per tant reduint el consum de combustible.



Bombes d'alimentació

Com ja s'ha dit se n'instal·laran dues en paral·lel amb un cabal mínim de $4,2 \text{ m}^3/\text{h}$, per recomanació del fabricant del motor principal, i d'un cabal del doble del consum de cada motor auxiliar funcionant quedant:

$$Q_{aux} = \frac{2 \cdot 2 \cdot \left(0,193 \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 800 \text{kW}\right)}{1.010 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,61 \text{ m}^3/\text{h} \approx 0,7 \text{ m}^3/\text{h}$$

Quedant un cabal total de $4,9 \text{ m}^3/\text{h}$. La potència absorbida per cada bomba per aquest cabal i un salt de pressió de 5 bar, amb el rendiment mecànic del 60% i un rendiment elèctric del 80% serà:

$$P_{bba} = \frac{Q \cdot \Delta p \cdot 10^{-2}}{\eta} = \frac{\frac{4,9}{3600} \left(\text{m}^3/\text{s}\right) \cdot 5 \cdot 10^4 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{\text{kW}}{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}}\right)}{0,6}$$

$$P_{bba} = 1,13 \text{ kW}$$

$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{1,13 \text{ kW}}{0,8} = 1,42 \text{ kW}$$

Les dues bombes seleccionades són també del fabricant *ALLWEILER* de la sèrie *TRILUB TRF*. Es tracta d'una bomba de cargol amb vàlvula de by-pass incorporada. Compta també amb un segellament mecànic, podent-se instal·lar verticalment o horitzontalment. Està dissenyada per poder treballar amb una gran varietat de fluids. Les especificacions del fabricant són les següents:

	Unitats	
Cabal màxim	30	m^3/h
Pressió d'aspiració	5	bar
Pressió de descàrrega	10-16	bar
Pressió diferencial	16	bar
Temperatura	130	$^{\circ}\text{C}$

· Taula 9: Especificacions de les bombes d'alimentació.



· Imatge 9: Bomba d'alimentació de Fuel-Oil TRILUB TRF.

Bombes de circulació

De la mateixa manera que les bombes d'alimentació se n'instal·laran dues en paral·lel amb un cabal mínim de $7,7 \text{ m}^3/\text{h}$, per recomanació del fabricant del motor principal, i d'un cabal de cinc vegades el consum de cada motor auxiliar funcionant quedant:

$$Q_{aux} = \frac{5 \cdot 2 \cdot \left(0,193 \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 800 \text{kW} \right)}{1.010 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1,53 \text{ m}^3/\text{h} \approx 1,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

Quedant un cabal total de $9,3 \text{ m}^3/\text{h}$. La potència absorbida per cada bomba per aquest cabal i un salt de pressió de 6 bar, amb el rendiment mecànic del 60% i un rendiment elèctric del 80% serà:

$$P_{bba} = \frac{\frac{9,3}{3600} \left(\text{m}^3/\text{s} \right) \cdot 6 \cdot 10^4 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{\text{kW}}{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}} \right)}{0,6}$$

$$P_{bba} = 2,58 \text{ kW}$$

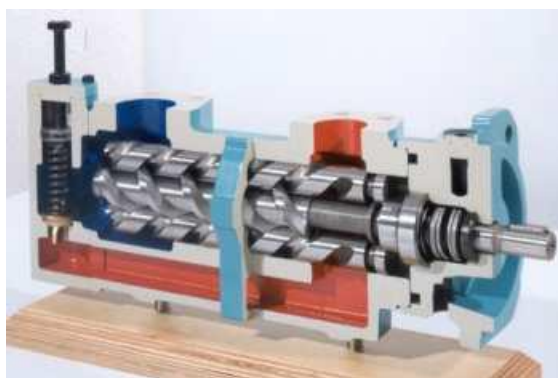
$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{2,58 \text{ kW}}{0,8} = 3,23 \text{ kW}$$

Les dues bombes seleccionades són també de fabricant ALLWEILER de la sèrie TRILUB TRL. Es tracta d'una bomba de triple cargol amb vàlvula de by-pass incorporada. Compta també amb un segellament mecànic, podent-se instal·lar verticalment o horitzontalment. Està dissenyada per poder treballar amb una gran varietat de fluids. Les especificacions del fabricant són les següents:



	Unitats	
Cabal màxim	50	m ³ /h
Pressió d'aspiració	7	bar
Pressió de descàrrega	16	bar
Pressió diferencial	16	bar
Temperatura	150	°C

· Taula 10: Especificacions de les bombes de circulació.



· Imatge 10: Bomba d'alimentació de Fuel-Oil TRILUB TRL.

5.1.5.4. Bomba del tanc de llots

Aquesta bomba s'utilitzarà per buidar el contingut del tanc de llots per descarregar-lo a terra pel seu posterior tractament i processament. La bomba es dimensionarà perquè sigui capaç de buidar el contingut del tanc en aproximadament unes tres hores. S'estableix un salt de pressió de 5 bar per contrarestar les pèrdues de càrrega, ja que el per superar l'altura des del tanc fins la coberta principal es requerirà un salt de pressió important. A l'igual que la resta de bombes s'imposarà un rendiment mecànic del 60% i un rendiment elèctric del 80%.

$$Q = \frac{V_{TLL}(m^3)}{t(hores)} = \frac{35,12 m^3}{3 h} = 11,71 m^3/h$$

$$P_{bba} = \frac{\frac{11,71}{3600} \left(m^3/s \right) \cdot 5 \cdot 10^4 \left(kg/m^2 \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{kW}{kg \cdot m/s} \right)}{0,6}$$

$$P_{bba} = 2,71 kW$$



$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{2,71 \text{ kW}}{0,8} = 3,38 \text{ kW} \approx 3,4 \text{ kW}$$

Una vegada calculats el caudal i el salt de pressió per portar el lots fins la coberta principal per la seva descàrrega es seleccionarà la següent bomba. Serà una bomba també del fabricant *ALLWEILER* de las series *ALLMOVE AS*. És una bomba del tipus peristàtica per aplicacions que requereixen alta pressió. Pot bombejar gran varietat de fluids amb un gran ventall de viscositats, funcionant amb fluids agressius amb continguts en sòlids. És d'instal·lació horitzontal, les seves principals característiques són les següents:

	Unitats	
Cabal màxim	60	m ³ /h
Pressió d'aspiració	-0,95	bar
Pressió de descàrrega	16	bar
Pressió diferencial	16	bar
Temperatura	80	°C
Viscositat màxima	100.000	mm ² /s
Contingut en sòlids admissible	50	Volum %
Mida del gra	33	mm

· Taula 11: Especificacions de la bomba de llots.



· Imatge 11: Bomba de llots ALLMOVE ASH.

5.1.5.5. Bombes de transvasament de MDO

S'instal·laran dues bombes de transvasament de dièsel-oil que transvasarà el combustible des dels dos tancs magatzem de MDO fins el tanc de servei diari de MDO. Cada bomba haurà d'omplir el tanc de servei diari en tres hores, s'imposarà un salt de pressió de la bomba de 4 bar per tenir en compte les pèrdues de càrrega.



$$Q = \frac{V_{TSD_{MDO}} (m^3)}{t(\text{hores})} = \frac{89 m^3}{3 h} = 29,67 m^3/h$$

$$P_{bba} = \frac{\frac{29,67}{3600} \left(m^3/s \right) \cdot 4 \cdot 10^4 \left(kg/m^2 \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{kW}{kg \cdot m/s} \right)}{0,6}$$

$$P_{bba} = 5,49 kW$$

$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{5,49 kW}{0,8} = 6,87 kW$$

Les dues bombes seleccionades són també de fabricant *ALLWEILER* de la sèrie *TRILUB TRQ*. Es tracta d'una bomba de triple cargol amb vàlvula de by-pass incorporada, utilitzada per cabals mitjans. Compta també amb un segellament mecànic, podent-se instal·lar únicament en vertical. Està dissenyada per poder treballar amb una gran varietat de fluids però sense components abrasius o components químics que puguin atacar el material de bomba. Les especificacions del fabricant són les següents:

	Unitats	
Cabal	144 - 450	m ³ /h
Pressió d'aspiració	3	bar
Pressió de descàrrega	13	bar
Pressió diferencial	10	bar
Temperatura	90	°C

· Taula 12: Especificacions de les bombes de transvasament de MDO.



· Imatge 12: Bomba de transvasament *TRILUB TRQ*.



Taula resum de bombes de combustible

Servei	Nº Bombes	Cabal (m ³ /h)	Pot. Nominal (kW)	Pot. Absorbida (kW)	Salt de Pressió (bar)
Transvasament HFO	2	28,21	5,22	7	4
Purificadora	2	6,25	1,16	1,50	4
Alimentació	2	4,90	1,13	1,42	5
Circulació	2	9,30	2,58	3,23	6
Tanc de llots	1	11,71	2,71	3,40	5
Transvasament MDO	2	29,67	5,49	6,87	4

· Taula 13: Resum de bombes de combustible a bord.

5.1.6. Dimensionament i selecció de les purificadores

El combustible utilitzat en el motor principal i auxiliars conté nombroses impureses i contingut en aigua cosa que pot ser molt perjudicial pel seu funcionament, per això s'instal·laran dues purificadores abans que el combustible s'emmagatzemi als tancs de servei diari. Després que el fuel-oil s'hagi decantat durant un temps en el tanc de sedimentació, separant part del sòlids i líquids del fuel per efecte de la diferència de gravetat específica, haurà de continuar el seu procés de purificació passant per aquestes unitats de separació i clarificació.

El fabricant dels motors imposa que les purificadores instal·lades siguin del tipus auto-netejables, hauran de tenir una capacitat mínima cada una del 115-120% del consum del motor principal i dels dos motors auxiliars.

Aquestes purificadores realitzen un procés de separació per acció de la força centrífuga, separant per efecte de la diferència de densitats la fase lleugera (fuel-oil) de les altres fases que pugui contenir, més pesades com l'aigua o les partícules sòlides. El procés de separació es porta a terme fent rotar un tambor a gran velocitat, s'introdueix per la seva part inferior el fuel-oli a purificar, aquest va ascendint a través d'una pila de discs que actuen com a superfície de sedimentació de les impureses que el fuel-oil conté. Per efecte de força centrífuga les partícules són desplaçades fora de la pila on continua el procés de sedimentació quedant en el centre del tambor el fuel-oil més pur, una interfase a la pila de discs i a la perifèria del tambor trobem l'aigua que també s'ha separat i les partícules sòlides en el perímetre del tambor.

Aquest procés el sol portar a terme a una velocitat de rotació del tambor d'unes 1.500 rpm i amb una temperatura d'entre 90 i 95°C per tal d'afavorir el procés de separació.

El sistema de separació del fuel-oil format per les dues purificadores pot treballar en sèrie, una com a purificadora eliminant l'aigua i l'altre com a clarificadora eliminant les



partícules sòlides, o en paral·lel on ambdues realitzaran els processos de purificació i clarificació.

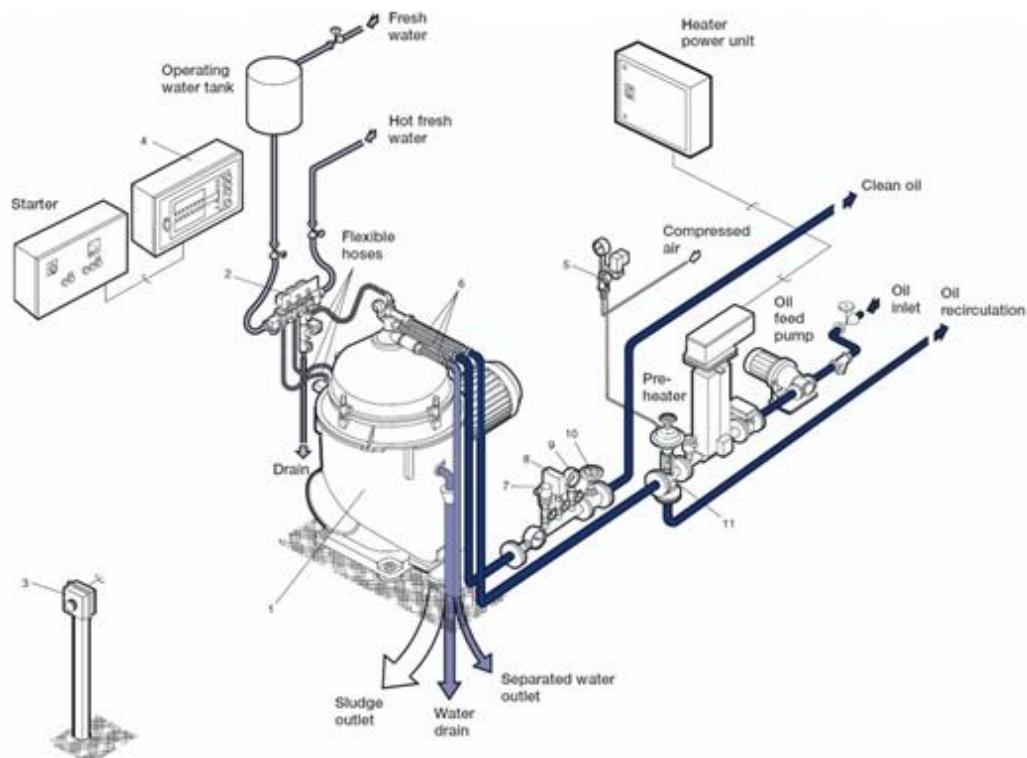
La capacitat de les purificadores a l'igual que la de les bombes que les precedeixen (anteriorment dimensionades i seleccionades) dependrà del cabal de fuel-oil consumit pel motor principal i els auxiliars per una autonomia de 24 hores, imposant un temps de separació de 12 hores.

$$Q = \frac{\sum \left[\text{Consum} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right) \cdot \text{Potència} (\text{kW}) \right] \cdot \text{Autonomia} (\text{h})}{\rho_{\text{HFO}} (\text{kg}/\text{m}^3) \cdot t_{\text{separació}} (\text{h})}$$

$$Q = \frac{0,169 \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 16.860 \text{kW} + 2 \cdot \left(0,193 \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \cdot 800 \text{kW} \right)}{1.010 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 12 \text{h}} \cdot 24 \text{h}$$

$$Q = 6,25 \text{ m}^3/\text{h}$$

El sistema seleccionat de dues purificadores haurà de tenir un cabal mínim de tractament de combustible de 6,25 m³/h. S'ha seleccionat el model MOPX 310 del fabricant ALFA LAVAL amb les següents característiques.



· Imatge 13: Esquema del sistema de purificació ALFA LAVAL MOPX 310.



Model	Pes (kg)	Volum (m ³)	Capacitat màxima (m ³ /h)	Temperatura de treball (°C)	Viscositat màxima (cSt)
MOPX 310	1.330	3,88	14	89 – 95	700 a 50°C

· Taula 14: Característiques i paràmetres de funcionament de la purificadora MOPX 310.

5.1.7. Dimensionament dels escalfadors

Per tal de garantir una bona separació en el sistema de purificació s'haurà d'eleva la temperatura del fuel provinent del tanc de sedimentació (a uns 60°C) a una temperatura de uns 95°C per tal que les dues purificadores realitzin una separació el màxim d'optimitzades. S'instal·laran dos escalfadors, un per cada purificadora, de tubs de flux creuat vertical, de pas múltiple.

A més s'instal·laran uns altres dos escalfadors en paral·lel en el sistema d'alimentació just després de les bombes de circulació. Tal i com ens indica el fabricant del motor principal, aquests escalfadors hauran d'eleva la temperatura del fuel-oil fins el 150°C necessaris per ser cremat dintre dels cilindres. Just després d'aquests escalfadors i tal com s'ha indicat anteriorment s'instal·larà un viscosímetre que mesurarà la viscositat del fuel-oil per controlar la vàlvula termostàtica de pas de vapor als escalfadors, la viscositat del fuel-oil a la temperatura de 150°C haurà d'estar entre 10 i 15 cSt segons recomanacions del fabricant.

Potència calorífica dels escalfadors de les purificadores

Per tal de determinar la potència calorífica dels escalfadors de les purificadores s'estableix una temperatura del fuel-oil abans del escalfador de 60°C i una temperatura després dels escalfadors òptima per la separació de 95°C.

$$Q = C \cdot \rho \cdot C_e \cdot (T_s - T_e)$$

On:

Q: calor necessari en kcal/h

C: cabal de combustible a escalfar en m³/h (6,25 m³/h el de les bombes)

ρ : pes específic del combustible 1010 kg/m³

C_e: calor específic del combustible 0,5 kcal/kg °C

T_s - T_e: diferència de temperatura del combustible entre l'entrada i la sortida en °C



$$Q = 6,25 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1010 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 0,5 \text{ kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (95 - 60) = 110.468,75 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Potència calorífica dels escalfadors del sistema d'alimentació

Es repetirà el mateix càlcul amb el cabal obtingut per la bomba de circulació de 9,30 m³/h i la diferència de temperatures corresponent suposant que del tanc col·lector de retorns surt el fuel-oil a 90°C.

$$Q = 9,3 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1010 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 0,5 \text{ kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (150 - 90) = 281.790 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

El sistema d'escalfament del combustible comptaran amb els mitjans de control de temperatura necessaris i per tal d'evitar el sobreescalfament del combustible, s'haurà d'instal·lar també una alarma d'alta temperatura per tal d'avisar si s'arriba a una temperatura massa alta.

Per evitar la possible contaminació de l'aigua d'alimentació de les calderes, el vapor condensat obtingut en el serpentins utilitzats per l'escalfament del combustible dels tancs i els serveis d'escalfament descrits, s'haurà de conduir fins un dipòsit d'observació o a través d'altres mitjans, per detectar fugues de combustibles en el sistema de vapor.

És important destacar que degut a les recents regulacions de la OMI, respecte el contingut en sofre dels combustibles utilitzats, el vaixell que s'està dissenyant sofriria un canvi en el combustible pesant consumit majoritàriament a bord, havent de consumir a partir del 1 de Gener del 2020 un combustible, fora de les zones ECA, amb un contingut en sofre igual o inferior al 0,50% en massa. Dins de les zones ECA a partir del 1 de Gener de 2015 serà obligatori consumir un combustible amb un percentatge igual o inferior al 0,10 % en massa. Aquests canvis normatius implicaran un canvi en el combustible utilitzat per tots els motors i calderes del vaixell, aquest canvi podrà ser a un MDO de baix contingut en sofre o bé a un altre combustible com el gas natural suposant que els motors puguin convertir-se per cremar aquest tipus de combustible. Si s'optés per utilitzar únicament MDO de baix contingut en sofre a bord, permetria prescindir de tots els mitjans d'escalfament per la manipulació del combustible ja que el MDO no requereix escalfament per ser cremat en els motors. Aquest fet faria reduir dràsticament el consum de vapor dels diversos serveis de la màquina com les purificadores, mòduls de combustible, calefacció dels tancs de combustible etc. Podent prescindir de tots aquests elements, així com dels aïllaments dels conductes, aprofitant el vapor generat en la caldera de recuperació de gasos d'exhaustió durant la situació de navegació, en un turbina acoblada a un alternador per generar la potència elèctrica necessària per donar servei a tots els sistemes i elements del vaixell, desacoblant motors generadors innecessaris amb l'estalvi de combustible corresponent.



5.2. Sistema de lubricació

El sistema de lubricació és fonamental per tal de garantir la vida del motor principal i motors auxiliars. Realitza diverses funcions, entre les que destaquen reduir el fregament entre els diversos elements en contacte amb moviment relatiu entre ells, participa també en la funció de refredament del motor, redueix el desgast de les parts de motor, té la funció d'ajudar en el segellament dels cilindres, manté net el motor d'agents externs com són els residus generats en la combustió.

A continuació es desenvoluparan el sistemes de lubricació dels elements més destacats de la càmera de màquines, sent el motor principal i els motors auxiliars.

5.2.1. Sistema de lubricació del motor principal

El fabricant del motor principal *MAN B&W* ha dissenyat el motor seleccionat *6-S70MC6* amb un sistema integrat de lubricació, que rep l'oli de lubricació de la línia de subministrament i el distribueix per una **lubricació general** que inclou els següents elements:

- Coixinets principals
- Coixinets de biela
- Creueta
- Eix de lleves
- Actuadors de les vàlvules d'exhaustió
- Turbocompressor
- Refrigeració dels pistons

Des d'una altra línia independent es subministrarà oli per la **lubricació del cilindres**.

5.2.1.1. Sistema de lubricació general

Segons especificacions del fabricant del motor aquest compta amb una bomba de combustible que mitjançant una vàlvula de retenció tipus "paraigües", elimina el risc que el fuel-oil penetri en el sistema de lubricació del eix de lleves. Això fa que no es requereixi un sistema separat per la lubricació del eix de lleves. Aquest sistema permet que els costos d'instal·lació manteniment i espai siguin més petits que en sistemes



separats ja que els tancs, filtres, bombes i conductes pel sistema de lubricació del eix de lleves s'eliminen.

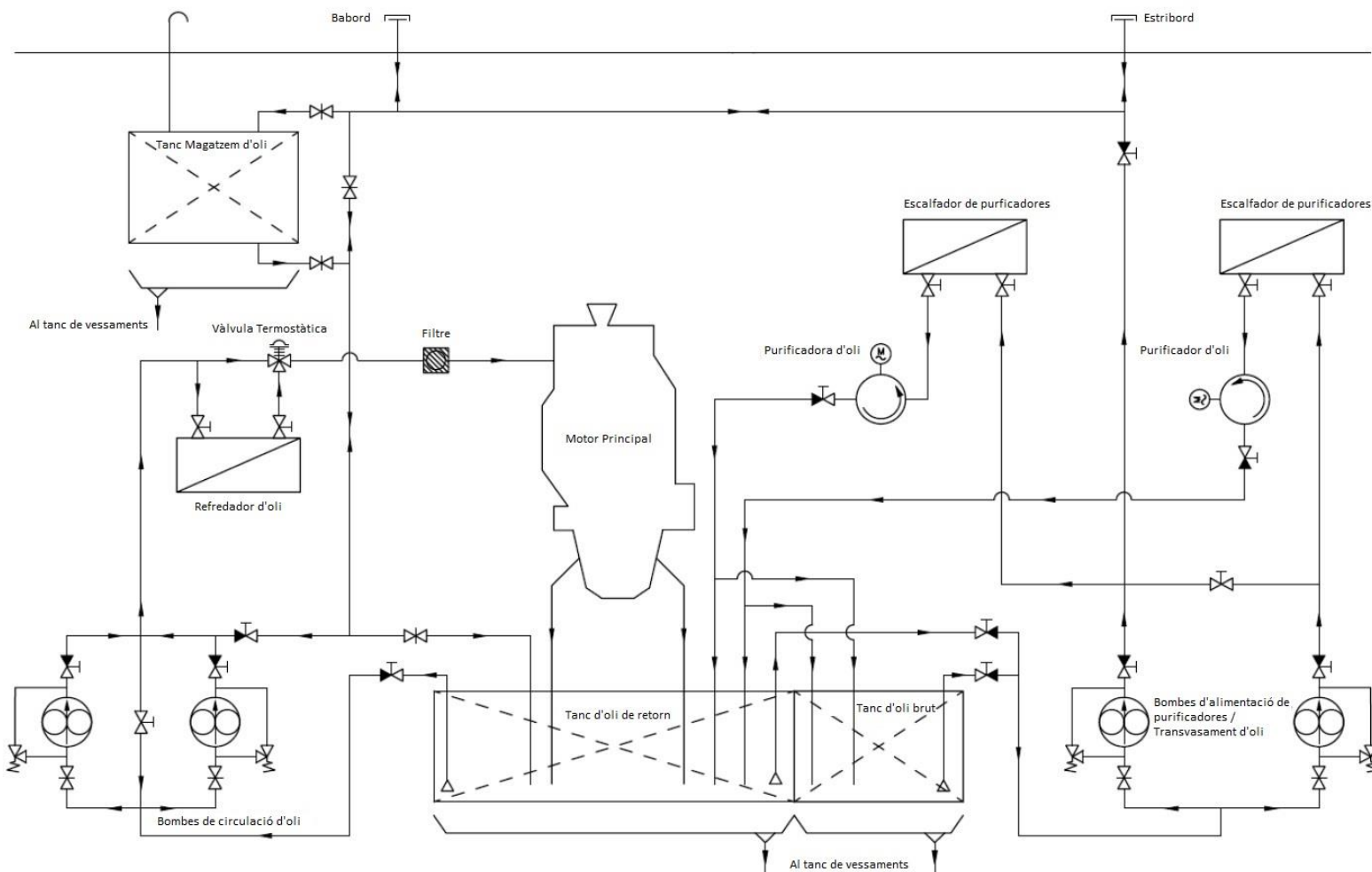
En l'interior del motor, l'oli s'acumula en el càrter, des d'allà s'envia al tanc de retorns per gravetat, situat just per sota en el doble fons de la sala de màquines, aquest tanc de retorns estarà protegit per un cofferdam. Situat també en el doble fons anirà el tanc d'oli brut per tal d'emmagatzemar una possible càrrega contaminada. La disposició tipus es veurà en el esquema que hi ha més endavant.

Des del tanc de retorns o de servei, aspiraran les bombes de circulació. Aquestes seran de cargol o engranatges, per tal de complir amb la normativa del ABS se'n instal·laran dues en paral·lel quedant una en funcionament i l'altre en repòs.

A l'igual que el fuel-oil l'oli de lubricació ha de tenir unes condicions de neteja viscositat i temperatura adequades per al seu us en el motor. La temperatura de servei recomanada pel fabricant és de 45°C. Per tal de refredar l'oli el sistema de lubricació comptarà amb un refredador, a on descarrega la bomba de circulació així com una vàlvula termostàtica. L'objectiu d'aquesta vàlvula termostàtica de tres vies és la de regular el pas de més o menys cabal d'oli de lubricació pel refredador, que posteriorment es mesclarà de nou amb el cabal d'oli no refrigerat, complint així amb la temperatura a l'entrada del motor de 45°C. A part per tenir les condicions òptimes de neteja i eliminar les possible partícules que pugui tenir l'oli es posarà un filtre d'oli el màxim de aprop del motor.

Uns altres elements fonamentals per garantir la correcta neteja d'oli són les purificadores d'oli que de la mateixa manera que en el sistema de fuel-oil faran un tractament de separació de contaminants i purificació d'aigua que pot resultar una contaminació molt perillosa per l'oli que treballa en el motor.

Com qualsevol motor, el seleccionat té un consum determinat de 0,7 g/kWh pel que s'instal·larà un tanc magatzem d'oli de lubricació que reomplirà per gravetat el tanc de retorn a mesura que aquest es vagi buidant pel consum propi del motor. El tanc magatzem s'abastirà d'oli a través de dos acoblaments disposats a la coberta principal a ambdós costats, babord i estribord. Comptarà també amb dues bombes de transvasament que transvasaran l'oli entre els diversos tancs i els acoblaments de coberta, a més tindran la funció d'alimentar les purificadores.



· Imatge 14: Esquema del sistema de lubricació general amb els elements principals.

5.2.1.1.1. Elements del sistema de lubricació general

Per tal de seleccionar i dimensionar els diversos elements que conformen el sistema de lubricació general es farà servir de guia les recomanacions del fabricant *MAN B&W* que indica en el seu manual de projecte i instal·lació del motor principal seleccionat.

· Oli lubricant

És el fluid que realitzarà tot el cicle de lubricació i refrigeració, el fabricant del motor principal recomana un oli lubricant amb un grau SAE 30, l'oli seleccionat haurà de tenir propietats contra l'oxidació i formació de rovell. S'especifica també que per tal de mantenir nets els espais de refrigeració dels pistons i el càrter haurà de tenir propietats de dispersió i detergents. En aquest últim aspecte el olis lubricants alcalins són millors per aquesta última funció. Pel motor seleccionat s'elegeix un oli SAE 30/TBN 5-10 del fabricant *CASTROL CDX 30*, té una viscositat cinemàtica a 100°C de 11,5 cSt i una densitat a 15°C de 890 kg/m³.



· Tanc de retorn

Aquest com ja s'ha comentat anirà situat en el doble fons de la sala de màquines, just per sota del motor principal, anirà protegit per un cofferdam per tal d'evitar contaminacions. El volum d'aquest tanc ve recomanat pel fabricant que fixa un volum mínim de 30 m³. Com s'ha fet ja en el dimensionament del tancs de combustible es sobredimensionarà un 4% per tal de tenir en compte el reforços interns de tanc, per tant quedarà un volum total de 32 m³ aproximadament.

· Tanc magatzem

Aquest tanc té la funció d'abastir i reomplir l'oli consumit pel motor principal. Per tal de dimensionar el seu volum s'agafarà el mateix valor que el del tanc de retorn d'oli lubricant igual a 32 m³, ja que el fabricant no fixa un volum mínim per aquest tanc.

· Tanc d'oli brut

Com també s'ha mencionat en apartats anteriors tindrà la missió de emmagatzemar una possible càrrega d'oli contaminat. Anirà situat també en el doble fons de la sala de màquines. Es dimensionarà amb la mateixa capacitat que el tanc de retorn d'oli, tindrà per tant un volum total de 32 m³ de capacitat.

· Bombes d'alimentació de purificadores i de transvasament d'oli

S'instal·laran dues bombes d'alimentació per subministrar l'oli brut a les dues purificadores d'oli que s'instal·laran en el sistema. A part aquestes dues bombes hauran de tenir suficient capacitat per transvasar l'oli lubricant entre els tancs o descarregar-lo al exterior. Normalment no s'utilitzaran per aquest ús però han d'estar dimensionades perquè en casos de necessitat o emergència puguin ser utilitzades per aquesta funció. El salt de pressió necessari per aquestes bombes serà de 2,5 bar. Els dos requeriments operacionals de les bombes han de complir amb les següents especificacions:

· Per tal de realitzar l'operació de transvasament, les bombes hauran de poder passar el contingut íntegre d'un tanc a l'altre en una hora. S'agafarà llavors el volum màxim a transvasar de 35 m³ corresponent al tanc magatzem, obtenint un cabal de 35 m³/h.

· Per la funció d'alimentació d'oli brut a les purificadores, les bombes hauran de poder subministrar el cabal necessari per la purificació. Aquest cabal l'estableix el fabricant del motor principal que recomana en el seu manual de projecte que cada purificadora tingui una capacitat de 0,136 l/kW·h a la potència MCR de 16.860 kW.

$$Q = 0,136 \frac{l}{kW} \cdot h \cdot 16.860 kW = 2.292,96 l/h \approx 2,3 m^3/h$$



Degut que el cabal obtingut per la operació de transvasament és bastant superior que el cabal per l'alimentació d'oli brut a les purificadores s'optarà per dues bombes d'alimentació de les purificadores de 2,3 m³/h i una bomba de transvasament d'oli de 35 m³/h. Aquesta elecció es fa per tal d'evitar instal·lar dues bombes d'alimentació de purificadores que treballarien molt per sota de la seva capacitat nominal, ja que la operació de transvasament seria eventual a diferència de la operació d'alimentació que és contínua.

Per tal d'obtenir la potència absorbida per les tres bombes s'establirà un rendiment mecànic de 0,6 i un rendiment elèctric de 0,8.

- Bombes d'alimentació de purificadores

$$P_{bba} = \frac{\frac{2,3}{3600} \left(\frac{m^3}{s} \right) \cdot 2,5 \cdot 10^4 \left(\frac{kg}{m^2} \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{kW}{kg \cdot m/s} \right)}{0,6}$$

$$P_{bba} = 0,27 \text{ kW}$$

$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{0,27 \text{ kW}}{0,8} = 0,33 \text{ kW}$$

Les dues bombes seleccionades són del fabricant *ALLWEILER* de la sèrie *TRILUB TRE*. Es tracta d'una bomba de triple cargol. Compta amb un segellament mecànic, podent-se instal·lar verticalment o horitzontalment. Està dissenyada per poder treballar amb una gran varietat de fluids no agressius amb el material de la bomba, especialment dissenyada per treballar amb olis lubricants. Les especificacions són:

	Unitats	
Cabal màxim	7,8	m ³ /h
Pressió d'aspiració	7	bar
Pressió de descàrrega	16	bar
Pressió diferencial	16	bar
Temperatura	-20 - 155	°C

· Taula 15: Especificacions de les bombes d'alimentació de les purificadores d'oli.



· Imatge 15: Bomba d'alimentació TRILUB TRE.



- Bombes de transvasament

$$P_{bba} = \frac{\frac{35}{3600} \left(\frac{m^3}{s} \right) \cdot 2,5 \cdot 10^4 \left(\frac{kg}{m^2} \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{kW}{kg \cdot m/s} \right)}{0,6}$$

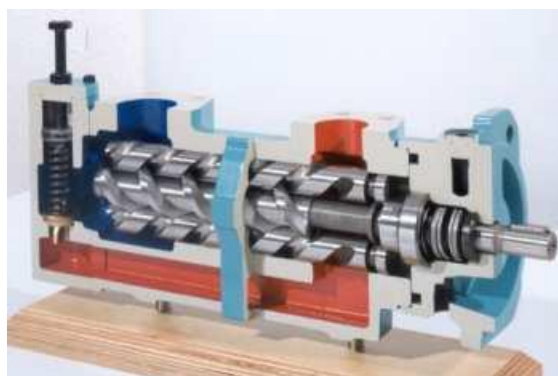
$$P_{bba} = 4,05 \text{ kW}$$

$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{4,05 \text{ kW}}{0,8} = 5,06 \text{ kW}$$

La bomba seleccionada és també de fabricant *ALLWEILER* de la sèrie *TRILUB TRL*. Es tracta d'una bomba de triple cargol amb vàlvula de by-pass incorporada. Compta també amb un segellament mecànic, podent-se instal·lar verticalment o horitzontalment. Està dissenyada per poder treballar amb una gran varietat de fluids. Les especificacions del fabricant són les següents:

	Unitats	
Cabal màxim	50	m ³ /h
Pressió d'aspiració	7	bar
Pressió de descàrrega	16	bar
Pressió diferencial	16	bar
Temperatura	150	°C

· Taula 16: Especificacions de la bomba de transvasament d'oli lubricant.



· Imatge 16: Bomba de transvasament d'oli lubricant *TRILUB TRL*.



· Bombes de circulació d'oli lubricant

Aquestes bombes també seran un total de dues i el seu cabal s'especifica en el manual del fabricant del motor que estableix un cabal de 370 m³/h, aquest cabal s'ha d'incrementar un 12% per la tolerància establerta. Per tant seguint les recomanacions i especificacions obtenim un cabal de les bombes de circulació de 414 m³/h.

Aquestes bombes tindran un salt de pressió de 4,4 bar per tenir en compte les pèrdues de càrrega en el refredador i el filtre d'oli, establertes en 1 bar. La potència absorbida per la bomba serà:

$$P_{bba} = \frac{\frac{414}{3600} \left(\frac{m^3}{s} \right) \cdot 4,4 \cdot 10^4 \left(\frac{kg}{m^2} \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{kW}{kg \cdot m/s} \right)}{0,6}$$

$$P_{bba} = 84,33 \text{ kW}$$

$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{84,33 \text{ kW}}{0,8} = 105,42 \text{ kW}$$

Les dues bombes seleccionades són també de fabricant *ALLWEILER* de la sèrie *TRILUB TRQ*. Es tracta d'una bomba de triple cargol amb vàlvula de by-pass incorporada, utilitzada per cabals mitjans. Compta també amb un segellament mecànic, podent-se instal·lar únicament en vertical. Està dissenyada per poder treballar amb una gran varietat de fluids però sense components abrasius o components químics que puguin atacar el material de bomba. Les especificacions del fabricant són les següents:

	Unitats	
Cabal màxim	450	m ³ /h
Pressió d'aspiració	3	bar
Pressió de descàrrega	13	bar
Pressió diferencial	10	bar
Temperatura	90	°C

· Taula 17: Especificacions de les bombes de circulació d'oli de lubricació.



· *Imatge 17: Bomba de circulació d'oli TRILUB TRQ.*

· Refredador d'oli

El refredador que s'instal·larà serà del de plaques, construït amb materials no fèrrics. Les recomanacions del fabricant del motor principal per el refredador d'oli són les següents:

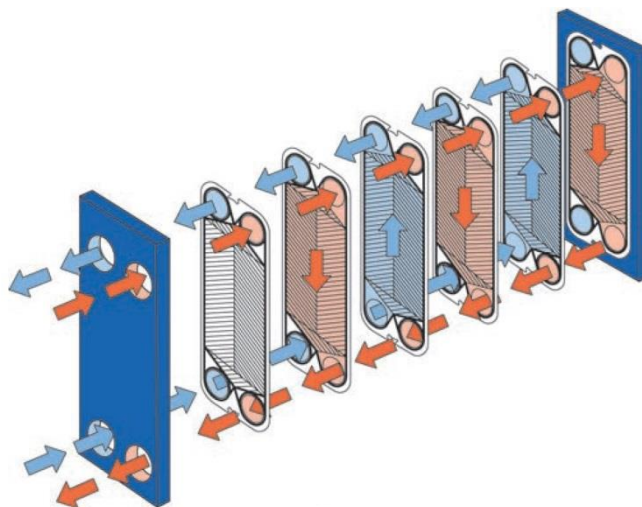
- La pèrdua de càrrega màxima acceptada és de 0,5 bar.
- El cabal d'oli serà de 414 m³/h.
- La pressió de treball de l'oli ha de ser de 4,4 bar.
- El calor dissipat en el refredador és de 1.390 kW a la potència MCR de 16.860 kW.

El refredador elegit és del fabricant *ALFA LAVAL* de la sèrie *T20*. És un intercanviador de calor format per plaques corrugades, això augmenta les turbulències dels fluids que intercanvien el calor en aquest cas l'aigua i l'oli, i augmenta també la superfície d'intercanvi. Aquestes plaques estan unides per pressió mitjançant uns pernns, aconseguint el tancament hermètic amb unes juntes de goma. Per una cara de la placa passa el flux d'aigua dolça i per l'altre cara passa el flux d'oli a contraflux.

El refredador seleccionat pot treballar amb fluids diferents de l'aigua amb temperatures fins a 180°C. Pot refredar cabals de fins a 810 m³/h complint de llarg amb el cabal calculat de 450 m³/h. La pressió màxima de treball del refredador és de 16 bar.



· Imatge 18: Refredador d'oli ALFA LAVAL T20.



· Imatge 19: Principi del funcionament del refredador d'oli ALFA LAVAL T20.

· Vàlvula termostàtica de control de temperatura de l'oli

Com s'ha comentat anteriorment la temperatura de l'oli abans d'introduir-lo en el motor, es controlarà amb una vàlvula termostàtica de tres vies, aquesta controlarà el flux d'oli que ha de passar pel refredador per tal d'aconseguir que la temperatura de l'oli es mantingui en el rang especificat pel fabricant del motor fixant entre 40 i 47°C, la viscositat de l'oli haurà de ser de 75 cSt a 50°C.

· Filtre d'oli de lubricació

Es tracta d'un element indispensable en el sistema de lubricació ja que a mesura que l'oli s'usa en el motor, aquest es va contaminant gradualment amb diverses partícules de ferritja, carbonissa i d'altres contaminants fruits del desgast del materials o restes de la combustió. Si les peces del motor en moviment estiguessin en contacte amb aquest oli contaminat, el seu desgast seria perillosament ràpid podent arribar a la situació que el motor gripés. Per tal d'evitar aquest punt catastròfic s'ha d'instal·lar un filtre d'oli autonetejable, just a l'entrada del motor, la funció d'aquest dispositiu serà de evitar l'entrada d'aquestes partícules. A l'igual que el refredador d'oli el fabricant del motor estableix les següents característiques pel filtre d'oli:

- La pèrdua de càrrega màxima acceptada és de 0,5 bar.
- El cabal d'oli serà de 414 m³/h.
- La pressió de treball de l'oli ha de ser de 4,4 bar.



- La temperatura de treball del filtre serà de 45°C.
- La finesa del filtra ha de ser de 50 micres.

Es selecciona un filtre automàtic del fabricant *BOLLFILTER* model 6.46 amb la configuració de diàmetre nominal major per permetre el cabal màxim. Aquest tipus de filtre té la capacitat de netejar-se automàticament, tot i que amb el pas de temps s'ha d'efectuar una neteja dels elements filtrants interiors. Aquest filtre conté un imant central en el seu interior que va des de la base fins a la part superior, ajudant a retenir les partícules metàl·liques que hi puguin haver en l'oli.

El grau de filtració màxim del filtre és de 25µm complint amb les especificacions del fabricant del motor principal. L'element filtrant és un conjunt de cilindres de malla metàl·lica. El cos del filtre és de fundació de grafit esferoïdal. Aquest filtre té un funcionament constant i compta amb una protecció contra el fregament de de les seves parts mòbils allargant la seva vida útil.



Entre les seves principals característiques destaquen una pressió d'operació d'entre 2 i 10 bar estant dintre també de les especificacions demandades, una temperatura d'operació màxima de 100°C, el fabricant recomana la seva instal·lació per filtratge exclusiu de fluids del tipus oli lubricant de motors dièsel marins.

· *Imatge 20: Filtre automàtic d'oli BOLLFILTER 6.46.*

· Purificadores d'oli de lubricació

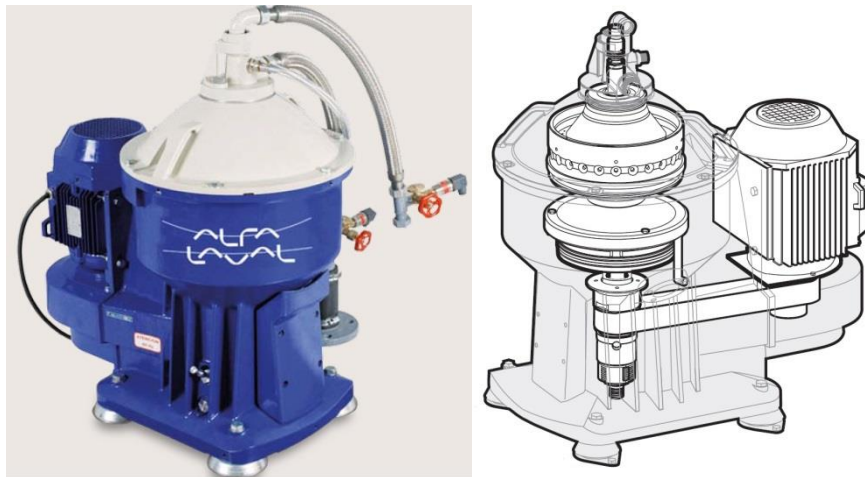
Per realitzar el procés de neteja, purificació i clarificació s'instal·laran dues purificadores autonetajables, una de dels dues en funcionament i l'altre en reserva. Per recomanacions del fabricant aquestes hauran de purificar totalment l'oli del sistema de lubricació de 2 a 2,5 vegades al dia.

A l'igual que les bombes d'alimentació de les purificadores d'oli, el fabricant recomana que cada purificadora comptin amb una capacitat de 0,136 l/kW·h a la potència nominal MCR de 16.860 kW. Aquest càlcul realitzat anteriorment donava un cabal de les purificadores de 2,3 m³/h.

Les separadores seleccionades són també del fabricant *ALFA LAVAL* model *P-Separator 626*. És una purificadora especialment dissenyada per la separació de destil·lats i d'olis lubricants de motors marins. Pot purificar olis i fuel-oils de densitats fins a 991 kg/m³ i



de viscositats màximes de 700 cSt a 50°C. La purificadora *P-Separator 626* en concret pot purificar cabals d'oli lubricant de fins a 2,8 m³/h el que la fa la purificadora més indicada per la seva capacitat de tractament d'oli seguint les especificacions imposades pel fabricant.



· Imatge 21: Purificadora d'oli lubricant ALFA LAVAL P-626 .

· Escalfadors de les purificadores d'oli lubricant

Tot i que els mòduls de purificació ja compten amb aquests dispositius es calcularà al igual que en el sistema de fuel-oil el escalfadors pel sistema de purificació d'oli lubricant. Com ja s'ha explicat per un correcte procés de purificació l'oli lubricant ha de tenir una temperatura determinada en aquest cas d'un 80°C, per tal d'assolir una viscositat adequada per la purificadora que durà a terme el procés. L'oli en el sistema de lubricació abans de les purificadores es troba a uns 40 °C, el qual serà aspirat per les bombes de les purificadores, per tant l'escalfador haurà d'eleva en 40 °C la temperatura de l'oli abans d'entrar a la purificadora.

S'utilitzarà la següent fórmula pel càlcul del calor necessari per elevar la temperatura de l'oli 40 °C:

$$Q = C \cdot \rho \cdot C_e \cdot (T_s - T_e)$$

On:

Q: calor necessari en kcal/h

C: cabal d'oli a escalfar en m³/h (2,3 m³/h el de les bombes d'alimentació)

ρ : pes específic de l'oli 890 kg/m³

C_e: calor específic de l'oli 0,5 kcal/kg °C

T_s - T_e: diferència de temperatura de l'oli entre l'entrada i la sortida en °C



$$Q = 2,30 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 890 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 0,5 \text{ kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (80 - 40) = 40.940 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

5.2.1.2. Sistema de lubricació de cilindres

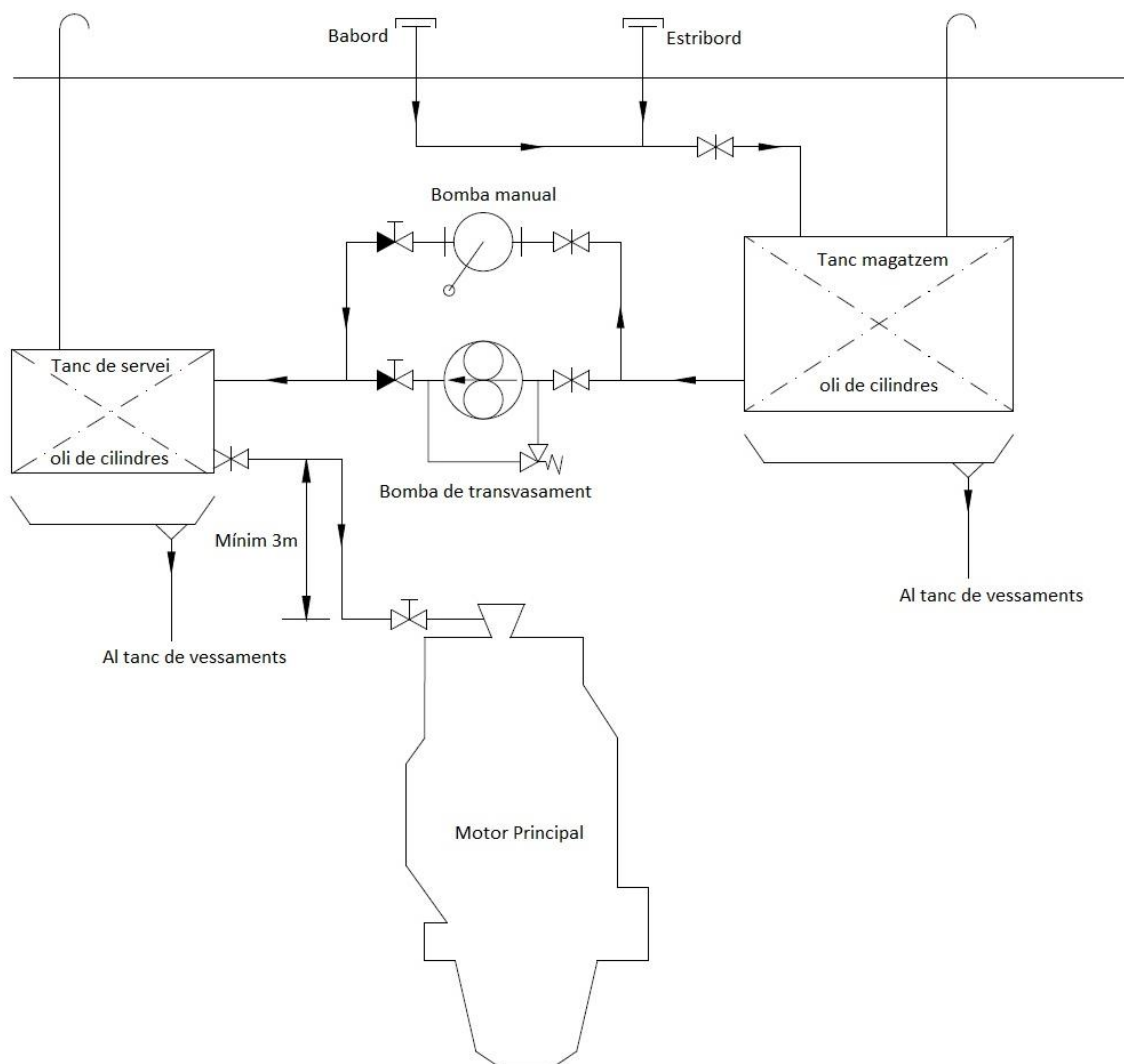
El sistema de lubricació de cilindres és un sistema clau pel bon funcionament del motor i representa juntament amb la despesa de combustible una gran part dels costos operatius del motor principal. L'elecció de un tipus d'oli o un altre pot tenir una gran influència en l'estat del cilindre, així com també sobre el manteniment programat i els seus costos.

Aquest sistema injecta l'oli sobre la superfície de les camises dels cilindres a través d'uns orificis. L'oli arriba fins el orificis distribuïts sobre la superfície dels cilindres mitjançant un sistema electrònic de lubricació incorporat en el motor. Els objectius principals de la lubricació de les camises són:

- Reduir la fricció i el desgast entre els anells del pistó i la camisa.
- Ajudar en l'estanquitat que formen els anells el pistó i el cilindre..
- Protegir les camises de la corrosió.

El sistema compta amb un tanc magatzem d'oli de cilindres, des d'aquest tanc l'oli passa al tanc de servei d'oli de cilindres mitjançant una bomba de transvasament. A continuació es veurà un esquema del sistema de lubricació de cilindres.

En aquest l'oli cau per gravetat al motor provinent del tanc de servei d'oli de cilindres, segons especificacions del fabricant aquest tanc haurà d'anar situat a un mínim de 3 metres per sobre de la brida de connexió del motor. Una vegada l'oli arriba al motor, entra en el sistema intern de lubricació, aquest injectarà l'oli en els cilindres mitjançant bombes d'injecció. De la mateixa manera que el sistema de lubricació general, el sistema de lubricació de cilindres també inclourà un filtre que separarà les possibles partícules perjudicials pel motor i l'objectiu de la lubricació que pugui portes l'oli.



· Imatge 22: Esquema del sistema de lubricació de cilindres amb els elements principals.

5.2.1.2.1. Elements del sistema de lubricació de cilindres

Per tal de seleccionar i dimensionar els diversos elements que conformen el sistema de lubricació general es farà servir de guia les recomanacions del fabricant *MAN B&W* que indica en el seu manual de projecte i instal·lació del motor principal seleccionat.

· Oli lubricant

És el fluid que realitzarà tot el cicle de lubricació, el fabricant del motor principal recomana un oli lubricant amb un grau SAE 50. Pel motor seleccionat s'elegeix un oli SAE 50/BN 70 del fabricant *CASTROL Cylthec 70*, té una viscositat cinemàtica a 100°C de 19,5 cST i una densitat a 15°C de 940 kg/m³. És un oli de nova generació per motors lents de dos temps amb creueta, és un oli de millors característiques que l'oli utilitzat per la lubricació general degut als residus de la combustió i els compostos perjudicials dels combustibles pesats.



Aquest oli compta amb l'alcalinitat adequada per poder neutralitzar l'àcid sulfúric que es forma a la càmera de combustió degut als alts nivells de sofre present en els combustibles residuals. També incorpora un seguit d'additius amb propietats detergents a més de un dispersant de cendres que manté netes les llumbreres del cilindre, anells i pistons. La seva particular formulació evita la ruptura de la pel·lícula d'oli a altes temperatures.

· Tanc magatzem d'oli de cilindres

Aquest tanc a l'igual que el tanc magatzem d'oli de lubricació general té la funció d'abastir i reomplir l'oli consumit pel motor principal. La capacitat del tanc dependrà del consum d'oli de cilindres del motor principal i de l'autonomia del vaixell. Per tal de dimensionar el seu volum es farà un càlcul del consum d'oli lubricant durant l'autonomia establerta en les especificacions del projecte de 35.000 milles a 14 nusos, sent un total de 2.500 hores de navegació. La dada facilitada pel fabricant sobre el consum d'oli de cilindres és de 0,7 g/kWh.

$$C_{OCMP} = C_{eOC} \cdot P_{MP} \cdot Autonomia = \left(\frac{0,70 \frac{g}{kWh} \cdot 16.860 kW}{10^6} \cdot 2.500h \right) = 29,51 t_{OC}$$

Quedant un volum amb el sobredimensionat del 4% :

$$V_{TMOc} = \frac{C_{OCMP}}{\rho_{OC}} = 1,04 \cdot \frac{29,51t}{0,940 \frac{t}{m^3}} = 32,64 m^3_{OC} \approx 33 m^3_{OC}$$

· Tanc de servei d'oli de cilindres

Aquest tanc emmagatzemarà l'oli necessari per l'operació del motor principal sense interrupcions durant al menys 24h. Com que no hi ha especificació en el manual del fabricant es dimensionarà per major seguretat amb una capacitat equivalent a dos dies de consum d'oli de cilindres. També aplicarem el sobredimensionat del 4% per tenir en compte els reforços interns del propi tanc.

$$C_{OCMP} = C_{eOC} \cdot P_{MP} \cdot Autonomia = \left(\frac{0,70 \frac{g}{kWh} \cdot 16.860 kW}{10^6} \cdot 48h \right) = 0,57 t_{OC}$$

$$V_{TSOC} = \frac{C_{OCMP}}{\rho_{OC}} = 1,04 \cdot \frac{0,57t}{0,940 \frac{t}{m^3}} = 0,63 m^3_{OC} \approx 1 m^3_{OC}$$

· Bombes de transvasament d'oli de cilindres

Per tal de transvasar l'oli del tanc magatzem al tanc de servei a mesura que aquest es va consumint al motor s'instal·larà una bomba de transvasament. Serà de cargols o



engranatges. Complirà amb el requeriment de poder omplir el tanc de servei d'oli de cilindres en 30 minuts. A part i per motius de seguretat s'instal·larà en paral·lel una bomba d'accionament manual d'emergència per si l'altre bomba fallés, tindrà la mateixa capacitat que la d'accionament elèctric.

$$Q = \frac{V_{TSoc} (m^3)}{t(hores)} = \frac{1 m^3}{1/2 h} = 2 m^3/h$$

La potencia absorbida per la bomba amb un salt de pressió de 3 bar, un rendiment mecànic de 0,6 i un rendiment elèctric de 0,8:

$$P_{bba} = \frac{\frac{2}{3600} \left(m^3/s \right) \cdot 3 \cdot 10^4 \left(kg/m^2 \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{kW}{kg \cdot m/s} \right)}{0,6}$$

$$P_{bba} = 0,28 kW$$

$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{0,28 kW}{0,8} = 0,35 kW$$

La bomba seleccionada és del fabricant *ALLWEILER* de la sèrie *TRILUB TRD*. Es tracta d'una bomba de triple cargol de poc cabal. Compta amb un segellament mecànic, podent-se instal·lar verticalment o horitzontalment. Està dissenyada per poder treballar amb una gran varietat de fluids no agressius amb el material de la bomba, especialment dissenyada per treballar amb olis lubricants. Les especificacions són:

	Unitats	
Cabal màxim	2,1	m ³ /h
Pressió d'aspiració	7	bar
Pressió de descàrrega	7	bar
Pressió diferencial	7	bar
Temperatura	-20 - 90	°C

· Taula 18: Especificacions de la bomba de transvasament d'oli de cilindres.



· Imatge 23: Bomba transvasament d'oli de cilindres TRILUB TRD.



5.2.2. Sistema de lubricació de motors auxiliars

Tot i que els motors auxiliars es defineixen en punts posteriors del treball juntament amb el balanç elèctric per determinar la seva potència, ja s'ha preseleccionat el model i fabricant per poder desenvolupar els sistemes auxiliars. El sistema de lubricació del motor auxiliar és similar al del motor principal, no obstant el sistema de lubricació de cilindres o intern té incorporat els següents elements:

- Bomba de circulació d'oli.
- Refredador d'oli.
- Vàlvula termostàtica pel control de la temperatura.
- Filtre d'oli.

Com que el sistema de lubricació de cilindres ja té aquest elements, el sistema de lubricació general o extern serà similar al circuit de purificació i transvasament d'oli del sistema de lubricació general del motor principal.

5.2.2.1. Elements del sistema de lubricació general dels MM.AA.

Per tal de seleccionar i dimensionar els diversos elements que conformen el sistema de lubricació general es farà servir de guia les recomanacions del fabricant *WÄRTSILÄ* que indica en el seu manual de projecte i instal·lació dels motors auxiliars.

· Oli lubricant

És el fluid que realitzarà tot el cicle de lubricació, el fabricant dels motors auxiliars recomana un oli lubricant amb un grau SAE 40, i alcalinitat d'entre BN 50-55, per motors que operin normalment amb fuel-oil amb contingut en sofre superior al 1,5%. Pel motor seleccionat s'elegeix un oli SAE 40/BN 55 del fabricant *CASTROL TLX Plus 554*, té una viscositat cinemàtica a 100°C de 14,5 cST i una densitat a 15°C de 920 kg/m³. És un oli de nova generació per motors generadors dièsel de mitja velocitat.

Aquest oli compta amb l'alcalinitat adequada, aquest model en concret té un nombre bàsic de 55 per poder neutralitzar l'àcid sulfúric que es forma a la càmera de combustió degut als alts nivells de sofre present en els combustibles residuals. També incorpora un seguit d'additius amb propietats detergents a més de un dispersant de cendres que manté netes les llumbreres del cilindre, anells i pistons. La seva particular formulació evita la ruptura de la pel·lícula d'oli a altes temperatures.



· Tanc magatzem d'oli

Aquest tanc al igual que el tanc magatzem d'oli de lubricació general del motor principal té la funció d'abastir i reomplir l'oli consumit pels motors auxiliars. La capacitat del tanc dependrà del consum d'oli dels motors auxiliars i de l'autonomia del vaixell. Per tal de dimensionar el seu volum es farà un càlcul del consum d'oli lubricant durant l'autonomia establerta en les especificacions del projecte de 35.000 milles a 14 nusos, sent un total de 2.500 hores de navegació. La dada facilitada pel fabricant sobre el consum d'oli lubricant és de 0,5 g/kWh.

$$C_{OLMM.AA.} = C_{eOL} \cdot P_{MM.AA.} \cdot Autonomia$$

$$C_{OLMM.AA.} = \frac{0,50 \frac{g}{kWh} \cdot 760 kW \cdot 3}{10^6} \cdot 2.500h = 2,85 t_{OL}$$

Quedant un volum amb el sobredimensionat del 4% :

$$V_{TM_{MM.AA.}} = \frac{C_{OLMM.AA.}}{\rho_{OL}} = 1,04 \cdot \frac{2,85t}{0,920 \frac{t}{m^3}} = 3,22 m^3_{OL} \approx 3,5 m^3_{OL}$$

· Tanc de retorn d'oli

El dimensionament d'aquest tanc ve donat en les especificacions del motor seleccionat en el manual de projecte del fabricant. Aquest estableix que el tanc de retorn d'oli de cada motor auxiliar haurà de tenir un capacitat de 0,76 m³.

· Purificadora d'oli lubricant de MM.AA.

El fabricant dels motors auxiliars estableix que si el nombre de dièsel-generadors no és superior a tres, com és el cas, únicament caldrà instal·lar una unitat de separació comuna pels tres motors. De la mateixa manera el fabricant WÄRTSILÄ dona la formula per calcular el cabal de la purificadora.

$$Q_{POL_{MM.AA.}} = \frac{1,35 \cdot P \cdot n}{t}$$

On:

Q: cabal l/h

P: potència del motor en kW

n: nombre de recirculacions del tanc per dia, 5 si es tracta de HFO

t: temps d'operació h/dia



$$Q_{POL_{MM.AA.}} = \frac{1,35 \cdot (3 \cdot 760kW) \cdot 5}{24} = 641,25 \text{ l/h} = 0,64 \text{ m}^3/\text{h}$$

La purificadora seleccionada serà la mateixa que les purificadores instal·lades pel sistema de lubricació general del motor principal. Del fabricant *ALFA LAVAL* model *P-Separator 626*. És una purificadora dissenyada per la separació de destil·lats i d'olis lubricants de motors marins. Pot purificar olis i fuel-oils de densitats fins a 991 kg/m^3 i de viscositats màximes de 700 cSt a 50°C . La purificadora *P-Separator 626* en concret pot purificar cabals d'oli lubricant de fins a $2,8 \text{ m}^3/\text{h}$. Al ser de cabal petit fa que sigui la més adequada pels motors auxiliars.

· Bomba d'alimentació de la purificadora i transvasament d'oli

De la mateixa manera que en el sistema de purificació de l'oli de lubricació general del motor principal, s'instal·larà una bomba d'alimentació per subministrar l'oli brut a la purificadora d'oli que s'instal·larà en el sistema de motors auxiliars. A part aquesta bomba haurà de tenir suficient capacitat per transvasar l'oli lubricant entre els tancs o descarregar-lo al exterior. Normalment no s'utilitzarà per aquest ús però haurà d'estar dimensionada perquè en casos de necessitat o emergència pugui ser utilitzada per aquesta funció. El salt de pressió necessari per aquesta bomba serà de $2,5 \text{ bar}$. Els dos requeriments operacionals que la bomba ha de complir són els següents:

- Per tal de realitzar l'operació de transvasament, la bomba haurà de poder passar el contingut íntegre d'un tanc a l'altre en una hora. S'agafarà llavors el volum màxim a transvasar de $3,5 \text{ m}^3$ corresponent al tanc magatzem, obtenint un cabal de $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Per la funció d'alimentació d'oli brut a la purificadora, la bomba haurà de poder subministrar el cabal necessari per la purificació. Aquest cabal és el que s'ha calculat en l'apartat anterior de $0,64 \text{ m}^3/\text{h}$.

Degut que el cabal obtingut per la operació de transvasament és bastant superior que el cabal per l'alimentació d'oli brut a la purificadora, s'optarà per una bomba d'alimentació de la purificadora de $0,64 \text{ m}^3/\text{h}$ i una bomba de transvasament d'oli de $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Aquesta elecció es fa per tal d'evitar instal·lar una bomba d'alimentació de la purificadora que treballi molt per sota de la seva capacitat nominal, ja que la operació de transvasament seria eventual a diferència de la operació d'alimentació que és contínua.

Per tal d'obtenir la potència absorbida per les tres bombes s'establirà un rendiment mecànic de $0,6$ i un rendiment elèctric de $0,8$.

- Bomba d'alimentació de la purificadora



$$P_{bba} = \frac{\frac{0,64}{3600} \left(\frac{m^3}{s} \right) \cdot 2,5 \cdot 10^4 \left(\frac{kg}{m^2} \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{kW}{kg \cdot m/s} \right)}{0,6}$$

$$P_{bba} = 0,074 \text{ kW}$$

$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{0,074 \text{ kW}}{0,8} = 0,093 \text{ kW} \approx 0,1 \text{ kW}$$

La bomba seleccionada és del fabricant *ALLWEILER* de la sèrie *TRILUB TRD*. Es tracta d'una bomba de triple cargol de poc cabal. És la mateixa bomba que la seleccionada pel transvasament d'oli de cilindres del motor principal, que ja s'ha especificat les seves característiques en apartats anteriors.

- *Bomba de transvasament d'emergència*

$$P_{bba} = \frac{\frac{3,5}{3600} \left(\frac{m^3}{s} \right) \cdot 2,5 \cdot 10^4 \left(\frac{kg}{m^2} \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{kW}{kg \cdot m/s} \right)}{0,6}$$

$$P_{bba} = 0,41 \text{ kW}$$

$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{0,41 \text{ kW}}{0,8} = 0,506 \text{ kW} \approx 0,51 \text{ kW}$$

La bomba seleccionada és del fabricant *ALLWEILER* de la sèrie *TRILUB TRE*. Es tracta d'una bomba de triple cargol. També és una bomba seleccionada anteriorment de la qual ja s'ha especificat les seves característiques en la selecció de les bombes d'alimentació de purificadores d'oli de lubricació general del motor principal.

· Escalfador de la purificadora d'oli

Es calcularà a l'igual que en el sistema de lubricació del motor principal, l'escalfador pel sistema de purificació d'oli lubricant dels motors auxiliars. Per un correcte procés de purificació l'oli lubricant ha de tenir una temperatura determinada en aquest cas d'uns 95°C, per tal d'assolir una viscositat adequada per la purificadora que durà a terme el procés. L'oli, en el sistema de lubricació abans de la purificadora, es troba a uns 40 °C, el qual serà aspirat per la bomba de la purificadora, per tant l'escalfador haurà d'eleva a 55 °C la temperatura de l'oli abans d'entrar a la purificadora.

S'utilitzarà la següent fórmula pel càlcul del calor necessari per elevar la temperatura de l'oli 55 °C:

$$Q = C \cdot \rho \cdot C_e \cdot (T_s - T_e)$$



On:

Q : calor necessari en kcal/h

C : cabal d'oli a escalfar en m^3/h (0,64 m^3/h el de la bomba d'alimentació)

ρ : pes específic de l'oli 920 kg/m^3

C_e : calor específic de l'oli 0,5 kcal/kg °C

$T_s - T_e$: diferència de temperatura de l'oli entre l'entrada i la sortida en °C

$$Q = 0,64 \frac{m^3}{h} \cdot 920 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,5 \frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (95 - 40) = 16.192 \frac{kcal}{h}$$



5.3. Sistema de refrigeració

No menys important que el sistema de lubricació, és el sistema de refrigeració. Aquest no només ha de refrigerar equips vitals com el motor principal o motors auxiliars sinó que hi ha nombrosos equips a la sala de màquines que necessiten refrigeració pel seu bon funcionament.

La funció de refrigeració de tots aquest elements és indispensable per diverses raons entre les que destaquen que a elevades temperatures la resistència dels materials disminueix. La viscositat dels olis lubricants és molt sensible a la temperatura, si aquesta disminueix molt a causa de un augment de la temperatura les propietats d'aquest oli lubricant es poden veure perjudicades no complint amb la seva funció. Per cas contrari si la temperatura de l'oli o el combustible és excessivament baixa, per un excés de refrigeració, la viscositat d'aquest augmentarà provocant problemes de lubricació incorrecta o formació excessiva d'àcid sulfúric durant la combustió del fuel-oil provocant excessiva corrosió en el motor i les seves parts.

El mitjà principal per portar a terme la refrigeració, i del qual se'n disposa a bord en gran quantitat il·limitada i gratuïta és l'aigua de mar. Aquesta aigua és ideal per refrigerar els elements d'intercanvi de calor com els refredadors d'oli i altres fluids que no requereixen una refrigeració a alta temperatura. No obstant per elements amb nivells de temperatura molt elevats com els cilindres i d'altres parts del motor pot suposar un gran risc degut a l'agressivitat del fluid refrigerant.

Consumidors de refrigeració com els cilindres necessiten que la temperatura del aigua de refrigeració sigui més alta que la d'altres consumidors, pel seu correcte funcionament. El cilindres al treballar a temperatures molt altes no poden refrigerar-se a temperatures excessivament baixes en comparació, podent provocar efectes negatius ja comentats com l'augment de la viscositat de l'oli i conseqüentment el fregament entre les parts mòbils del motor.

Per tal de complir amb els requeriments adequats de refrigeració per cada un dels sistemes i elements de la màquina, existeixen varies configuracions disponibles pel sistema de refrigeració. La més estesa és el sistema de refrigeració centralitzat.

Aquest sistema té l'avantatge que al tenir els intercanviadors d'aigua destil·lada en lloc d'aigua de mar, es redueixen els costos de manteniment. Aquest sistema únicament necessita un intercanviador de calor en contacte directe amb l'aigua de mar, reduint el manteniment respecte altres sistemes que utilitzen més d'un intercanviador amb aigua de mar.

Relacionat amb l'anterior els costos de compra i instal·lació d'un intercanviador circulat per aigua destil·lada, són clarament inferiors als d'un intercanviador circulat



per aigua de mar. Els materials utilitzats en l'intercanviador d'aigua de mar són més cars augmentant el seu preu de fabricació. De la mateixa manera l'extensió de canonades per les quals circula l'aigua salada serà inferior, reduint també els costos d'instal·lació i compra, ja que les canonades d'alta residència a la corrosió són notablement més cares que les canonades estàndard per aigua destil·lada.

El fet de treballar amb aigua de mar per l'intercanviador centralitzat, aigua destil·lada d'intercanvi amb l'aigua de mar i aigua de refrigeració pels cilindres, implica la instal·lació de tres grups de bombes que hauran d'estar duplicades havent d'instal·lar un mínim de sis bombes, dues de refrigeració d'aigua de mar, dues més pel circuit d'aigua destil·lada centralitzat i dues més pel sistema de refrigeració dels cilindres.

Això implicarà un major cost inicial degut al major nombre de bombes, un sistema de canonades més complex, però a la llarga un manteniment menor ja que els elements sotmesos a la corrosió de l'aigua de mar són molt menors.

5.3.1. Sistema de refrigeració centralitzat

Aquest sistema de refrigeració centralitzat, compta únicament amb un intercanviador circulat per aigua de mar. Tota la resta d'intercanviadors estan circulats per aigua destil·lada del sistema central de refrigeració.

El sistema centralitzat compta amb un circuit d'aigua salada que té la funció de refredar l'aigua destil·lada del circuit central, està format també per un altre sistema de circulació forçada d'aigua destil·lada de doble circuit tancat.

El circuit central, també anomenat de baixa temperatura, és l'encarregat de refrigerar els elements del motor principal i motors auxiliars que es troben a una temperatura relativament baixa. També refrigerarà l'intercanviador de calor del sistema d'oli de lubricació.

Per l'altre costat tenim el circuit d'alta temperatura, aquest va lligat amb l'anterior a través d'un intercanviador de calor. Aquest circuit serà l'encarregat de refrigerar els elements del motor principal sotmesos a altes temperatures com el turbocompressor, les camises etc. Aquest últims consumidors necessiten que la temperatura de l'aigua de refrigeració sigui més alta que la dels altres elements, fet que fa necessari que ambdós circuits de alta i baixa temperatura estiguin interconnectats.

Un element essencial en el circuit de refrigeració central, és el tanc d'expansió. La necessitat d'aquest element ve donada per l'augment del volum específic de l'aigua a mesura que s'escalfa al passar pels diferents equips a refrigerar, per tal de compensar l'augment de pressió degut a l'augment de volum específic s'instal·larà aquest tanc



d'expansió. Serà comú per tot el sistema de refrigeració, aquest ens permetrà a més, reomplir el tanc per compensar les possibles pèrdues d'aigua al llarg del circuit, cosa bastant habitual.

Igual que en el circuit de combustible, en aquest sistema també s'instal·larà un desaïreador juntament amb un dispositiu d'alarma, per tal de expulsar el possible vapor d'aigua que es pugui formar en el circuit. Segons especificacions del fabricant del motor principal aquest tanc d'expansió haurà d'instal·lar-se al menys cinc metres per sobre de la canonada de sortida d'aigua de refrigeració del motor principal. El fet d'instal·lar el tanc d'expansió en el punt més alt del sistema permetrà eliminar possibles bosses d'aire acumulades en el circuit.

El circuit centralitzat comptarà amb una connexió entre els motor auxiliars i el motor principal per pre-escalfar el motor principal abans de la seva posta en marxa, amb l'aigua de refrigeració procedent del motors auxiliars.

El dimensionament de cada un dels elements del sistema de refrigeració dependrà de les necessitats dels consumidors en cada situació en la que es troba el vaixell. Per tal de determinar millor les necessitats dels consumidor es farà un balanç d'aigua de refrigeració seguint les especificacions del fabricant del motor principal i motors auxiliars. El balanç d'aigua de refrigeració mostra per cada situació d'operació del vaixell el cabal d'aigua destil·lada central i el calor que s'ha de dissipar per cada un dels elements del sistema, s'especifica el nombre d'elements de cada tipus i la simultaneïtat de cada un d'aquests que indicarà el grau d'utilització de cada element en les diferents situacions del vaixell.

Intercanviador	Unitats	Cabal m ³ /h	Calor kW	Navegació			Maniobra			Port		
				*S	m ³ /h	kW	S	m ³ /h	kW	S	m ³ /h	kW
Oli Lubricant M.P.	1	183	1.390	1	183	1.390	1	183	1.390	0	0	0
Aigua Cilindres M.P	1	183	2.440	1	183	2.440	1	183	2.440	0	0	0
Aire escombrat M.P	1	222	6.560	1	222	6.560	1	222	6.560	0	0	0
Circuits MM.AA.	3	63	572	0,33	63	572	0,67	126	1.144	0,67	126	1.144
Equips varis	1	155	3.500	0,74	120	2.600	0,66	110	2.300	0,11	90	400
Total					588	13.562		641	13.834		216	1.544

· Taula 19: Balanç d'aigua central de refrigeració. *S: simultaneïtat dels elements a refrigerar.



Veient les diferents condicions del vaixell el balanç de refrigeració més desfavorable és el de la situació de *maniobra*. Per tant s'agafarà aquesta situació del vaixell pel dimensionament de cada un dels elements del sistema de refrigeració.

Aquestes són les necessitats de dissipació de calor dels equips treballant al 100% de la seva capacitat nominal. Són els valors que s'utilitzaran pel dimensionament dels elements del sistema de refrigeració, no obstant s'ha comptat que aquest equips no funcionaran al 100% de la seva capacitat nominal. El fabricant proporciona aquestes dades a la màxima capacitat per donar un marge de deteriorament i envelliment del equips i elements que el conformen.

Les dades i informació proporcionada pel fabricant del motor principal en el manual de projecte es basen en condicions tropicals, tenint en compte una temperatura màxima de l'aigua del mar de 32°C i temperatura ambient de 45°C.

5.3.2. Elements del circuit de baixa temperatura

Aquest es el circuit en el qual les bombes de circulació fan circular l'aigua destil·lada de refrigeració a través del intercanviador central (intercanvia el calor amb l'aigua de mar), per alimentar posteriorment al intercanviador d'oli lubricant, l'intercanviador d'aigua de cilindres, a l'intercanviador d'aire d'escombrat que està incorporat al motor principal, i als motors auxiliars. Els intercanviadors amb els altres dos circuits, de alta temperatura i d'aigua sala es dimensionaran en punts posteriors.

El circuit de baixa temperatura a l'igual que el circuit d'oli de lubricació del motor principal comptarà amb una vàlvula termostàtica de tres vies, aquesta anirà situada després del intercanviador centra i mesclarà l'aigua refrigerada en l'intercanviador amb l'aigua no refrigerada garantint que la temperatura de l'aigua que entra en el circuit no sigui inferior a 10°C, no obstant la temperatura de disseny del circuit de refrigeració centralitzat està fixada en 36°C coincidint amb una temperatura màxima de l'aigua de mar de 32°C.

També a la sortida d'aigua de refrigeració de cada motor auxiliar s'instal·larà una vàlvula termostàtica de tres vies per garantir que la temperatura en aquest punt no sigui inferior a 80°C, segons especificacions del fabricant dels motors auxiliars.

· Bombes de circulació d'aigua destil·lada central

Tal i com s'indica en la taula del balanç dels elements a refrigerar, aquestes bombes hauran de poder proporcionar un cabal de 641 m³/h, corresponents a la situació més desfavorable de *maniobra*. Tot i el marge que s'agafa de no treballar mai a la capacitat nominal el manual del projecte recomana incrementar aquesta capacitat fins un 10%,



quedant un cabal de les bombes de 705 m³/h. Per calcular la potència absorbida s'establirà un salt de pressió de 2,5 bar un rendiment mecànic del 0,7 i un rendiment elèctric del 0,8.

$$P_{bba} = \frac{\frac{705}{3600} \left(\frac{m^3}{s} \right) \cdot 2,5 \cdot 10^4 \left(\frac{kg}{m^2} \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{kW}{kg \cdot m/s} \right)}{0,7}$$

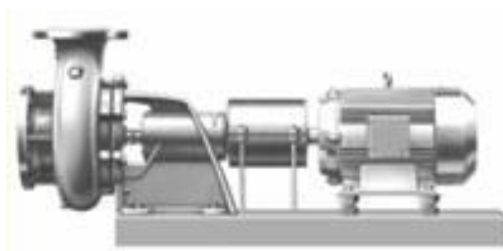
$$P_{bba} = 69,94 \text{ kW}$$

$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{69,94 \text{ kW}}{0,8} = 87,43 \text{ kW} \approx 88 \text{ kW}$$

S'instal·laran dues bombes centrífugues d'accionament elèctric, amb una capacitat mínima de 705 m³/h i 88 kW de potència, amb capacitat per treballar amb aigua de temperatura fins a 80°C. Les bombes seleccionades seran del fabricant ALLWEILER de la sèrie NS. És una bomba centrífuga dissenyada per treballar sobretot amb aigua destil·lada, té capacitat per treballar amb fluids a temperatures mitges. És d'instal·lació horitzontal. Les especificacions són les següents:

	Unitats	
Cabal màxim	780	m ³ /h
Altura	145	m
Pressió de descàrrega	10/16	bar
Temperatura	140	°C

· Taula 20: Especificacions de les bombes de circulació d'aigua destil·lada central.



· Imatge 24: Bomba de circulació d'aigua destil·lada central NS.

Al ser unes bombes de gran cabal fa que en la situació de port aquestes haurien de treballar molt per sota de la seva capacitat nominal. S'optarà doncs per instal·lar una única bomba de menor caudal, en concret 216 m³/h, sumant el 10% de marge de



seguretat queda una bomba de 238 m³/h, per la situació de port. La potència absorbida serà:

$$P_{bba} = \frac{\frac{238}{3600} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \cdot 2,5 \cdot 10^4 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{\text{kW}}{\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}} \right)}{0,7}$$

$$P_{bba} = 23,61 \text{ kW}$$

$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{23,61 \text{ kW}}{0,8} = 29,51 \text{ kW} \approx 30 \text{ kW}$$

Les bomba seleccionada serà del fabricant *ALLWEILER* de la sèrie *ALLHEAT NBWH*. És una bomba centrífuga dissenyada per treballar amb aigua destil·lada i de refrigeració, té capacitat per treballar amb fluids a temperatures mitges/altres. És d'instal·lació horitzontal o vertical. Les especificacions són les següents:

	Unitats	
Cabal màxim	270	m ³ /h
Altura	92	m
Pressió de descàrrega	16	bar
Temperatura	350	°C

· Taula 21: Especificacions de la bomba de circulació d'aigua destil·lada central a port.



· Imatge 25: Bomba de circulació d'aigua destil·lada central a port ALLHEAT NBWH.

· Refredador d'oli lubricant

Aquest intercanviador ja s'ha dimensionat anteriorment. Es tracta d'un refredador de plaques, construït amb materials no fèrrics del fabricant *ALFA LAVAL* de la sèrie *T20*. És un intercanviador de calor format per plaques corrugades, això augmenta les turbulències dels fluids que intercanvien el calor en aquest cas l'aigua i l'oli, i



augmenta també la superfície d'intercanvi. Les especificacions del fabricant són les següents:

	Unitats	
Cabal d'aigua central necessària	183	m ³ /h
Calor a dissipar	1.390	kW
Temperatura d'entrada de l'aigua	36	°C
Pèrdua de pressió en el circuit d'aigua	≈ 0,2	bar

· Taula 22: Especificacions del refredador d'oli lubricant ALFA LAVAL T20.

· Refredador d'aire d'escombrat

Aquest intercanviador està incorporat en el motor principal, les especificacions venen donades en el manual del fabricant que és el que instal·la l'intercanviador dins el motor. Le seves característiques són les següents:

	Unitats	
Cabal d'aigua central necessària	222	m ³ /h
Calor a dissipar	6.560	kW
Temperatura d'entrada de l'aigua	36	°C
Pèrdua de pressió en el circuit d'aigua	≈ 0,5	bar

· Taula 23: Especificacions del refredador d'aire d'escombrat.

5.3.3. Elements del circuit d'alta temperatura

Com s'ha comentat anteriorment en la descripció del sistema centralitzat de refrigeració, el circuit d'alta temperatura és l'encarregat de refrigerar aquelles parts del motor que es troben sotmeses a alta temperatura, turbocompressor, camises de cilindres principalment.

Aquestes parts del motor requereixen una refrigeració a una temperatura superior a la del circuit de baixa temperatura, ja que al estar sotmeses a temperatura de funcionament molt elevades, si es refrigeressin a temperatures relativament baixes podrien produir-se efectes negatius de canvis en la viscositat de l'oli, i conseqüentment augmentar el fregament. En les especificacions del fabricant, aquest recomana una temperatura de l'aigua destil·lada per la refrigeració dels cilindres d'un 80°C a la sortida del motor.

De la mateixa manera que en el circuit de baixa temperatura, s'instal·larà una vàlvula termostàtica de tres vies a la sortida dels intercanviadors d'aigua de cilindres que



controlarà el pas d'aigua per aquest en funció de la temperatura obtinguda per el sensor situat a la sortida del motor principal. Una operació habitual que s'ha de realitzar abans de l'engegada del motor principal és el preescalfament, aquest es realitzarà amb aigua provinent del motor auxiliars en funcionament.

Les bombes de circulació d'aigua de cilindres aspiraran l'aigua del tanc desaireador fent-la circular a través del motor principal, per arribar després al refredador i tornant de nou al tanc desaireador. Aquest tanc com ja s'ha comentat, evita l'acumulació de gasos en el sistema i a la vegada fa de dipòsit acumulador. Hi haurà un sistema d'alarma connectat entre el tanc desaireador i el tanc d'expansió, que avisarà d'un possible excés de alliberació de gasos, aquest fet pot denotar un mal funcionament del motor principal.

Un ús molt habitual a bord de l'aigua de alta temperatura és utilitzar el seu calor residual a la sortida del motor principal per escalfar i portar a l'ebullició aigua de mar en l'anomenat evaporador. En aquest element podem generar aigua quasi destil·lada sense aportació tèrmica addicional a la subministrada per la pròpia aigua de refrigeració d'alta temperatura. No obstant no es tractarà el seu dimensionament ni selecció en el present projecte.

· Bombes de circulació d'aigua destil·lada de cilindres

Seguint les recomanacions i indicacions del manual de projecte del motor principal, aquest marca que les bombes instal·lades han de tenir suficient capacitat per poder subministrar un cabal de 125 m³/h, amb un salt de pressió de 3 bar. Igual que les demás bombes del sistema de refrigeració, es recomana augmentar un 10% la capacitat d'aquestes bombes per temes de desgast i envelliment. Quedant un cabal de 138 m³/h. La potència absorbida per aquestes bombes amb els rendiments establerts anteriorment de 0,7 el rendiment mecànic i 0,8 el rendiment elèctric serà:

$$P_{bba} = \frac{\frac{138}{3600} \left(\frac{m^3}{s} \right) \cdot 3 \cdot 10^4 \left(\frac{kg}{m^2} \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{kW}{kg \cdot m/s} \right)}{0,7}$$

$$P_{bba} = 16,43 \text{ kW}$$

$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{16,43 \text{ kW}}{0,8} = 20,54 \text{ kW} \approx 21 \text{ kW}$$

S'instal·laran dues bombes centrífugues d'accionament elèctric, amb una capacitat mínima de 138 m³/h i 21 kW de potència, amb capacitat per treballar amb aigua de temperatura mínima de 80°C. Les bombes seleccionades seran del fabricant ALLWEILER de la sèrie ALLHEAT NIWH. És una bomba centrífuga dissenyada per treballar sobretot amb aigua de refrigeració, té capacitat per treballar amb fluids a



temperatures mitges. És d'instal·lació horitzontal o vertical. Les especificacions són les següents:

	Unitats	
Cabal màxim	220	m ³ /h
Altura	92	m
Pressió de descàrrega	16	bar
Temperatura	350	°C

· Taula 24: Especificacions de les bombes de circulació d'aigua destil·lada de cilindres.



· Imatge 26: Bomba de circulació d'aigua destil·lada de cilindres ALLHEAT NIWH.

· Refredador d'aigua de cilindres

El refredador que s'instal·larà serà de plaques, construït amb materials no fèrrics. Les recomanacions del fabricant del motor principal per el refredador d'aigua de cilindres són les següents:

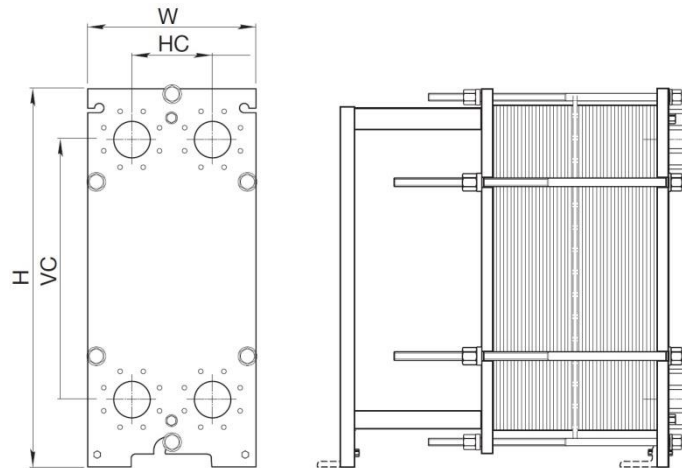
- La pèrdua de càrrega màxima acceptada és de 0,2 bar.
- El cabal d'aigua de cilindres serà de 125 m³/h.
- El cabal d'aigua destil·lada central serà de 183 m³/h.
- Temperatura d'entrada de l'aigua de cilindres serà de 80°C.
- Temperatura d'entrada de l'aigua destil·lada central 42°C.
- El calor dissipat en el refredador és de 2.440 kW a la potència MCR de 16.860 kW.

El refredador elegit és del fabricant ALFA LAVAL de la sèrie M15. És un intercanviador de calor format per plaques corrugades, això augmenta les turbulències dels fluids que



intercanvien el calor en aquest cas l'aigua de cilindres i l'aigua destil·lada central, i augmenta també la superfície d'intercanvi. Aquestes plaques estan unides per pressió mitjançant uns pernns, aconseguint el tancament hermètic amb unes juntes de goma.

El refredador seleccionat pot treballar amb aigua i vapor d'aigua amb temperatures fins a 160°C. Pot refredar cabals de fins a 288 m³/h complint de llarg amb el cabal calculat d'aigua destil·lada central de 183 m³/h. La pressió màxima de treball del refredador és de 16 bar.



· Imatge 27: Alçat i perfil del refredador d'aigua de cilindres ALFA LAVAL M15.

5.3.4. Elements del circuit d'aigua salada

Aquest circuit tindrà la funció de refrigerar l'aigua destil·lada del circuit central de baixa temperatura. Aquest circuit s'abasteix d'aigua de mar a través de les caixes de mar. Les bombes del circuit d'aigua salada aspiraran l'aigua fent-la circular a través del intercanviador central, una vegada refrigerada l'aigua destil·lada torna al mar en un circuit obert.

· Refredadors centrals d'aigua destil·lada

Aquests intercanviadors seran també de plaques. A diferència dels altres refredadors del sistema de refrigeració, aquests hauran de ser resistents a la corrosió de l'aigua de mar ja que per un costat de la placa circularà aigua destil·lada però per l'altre circularà una aigua amb alt contingut en sal.

Per tal de determinar el nombre i dimensions d'aquests refredadors s'agafarà el balanç calculat anteriorment. Per un costat hauran de cobrir les necessitats de refrigeració en la situació més desfavorable de *maniobra* i la situació més favorable del *port* per tal



d'evitar que els equips treballin molt per sota de la seva capacitat nominal. En la situació més desfavorable és necessari dissipar amb aigua de mar 13.834 kW, no obstant en la situació de port únicament serà necessari dissipar 1.544 kW.

A la hora de dimensionar i seleccionar els intercanviadors s'haurà de tenir en compte que hi ha un risc que es produeixin incrustacions en els conductes d'aigua salada quant aquesta es troba per sobre del 50°C. Això fa que el fabricant recomani que la temperatura de sortida de l'aigua de mar de l'intercanviador no superi els 42°C. La temperatura d'entrada serà la més desfavorable que indica el fabricant de 32° en condicions de navegació pel tròpic.

El cabal d'aigua de mar que ha de circular per l'intercanviador en situació operacional de maniobra serà:

$$C_{ced} = C_{abs}$$

$$C_{abs} = Q_{AS} \cdot \rho_{AS} \cdot C_{eAS} \cdot (T_s - T_e)$$

On:

Q_{AS} : cabal d'aigua salada en m^3/h

C_{abs} : calor absorbit per l'aigua de mar

ρ_{AS} : pes específic de l'aigua de mar 1.025 kg/m^3

C_{eAS} : calor específic de l'aigua de mar en $kcal/kg \text{ } ^\circ C$

$T_s - T_e$: diferència de temperatura de l'aigua de mar entre l'entrada i la sortida en $^\circ C$

$$Q_{AS} = \frac{C_{abs}}{\rho_{AS} \cdot C_{eAS} \cdot (T_s - T_e)} = \frac{13.834 \text{ kW} \cdot 860,42 \text{ kcal}/h \cdot \text{kW}}{1.025 \text{ kg}/m^3 \cdot 1 \text{ kcal}/kg \cdot ^\circ C \cdot (42 - 32)}$$

$$Q_{AS} = 1.161,27 \text{ m}^3/h$$

Per tal de dissipar aquest calor es disposaran dos intercanviadors, amb un cabal d'aigua de mar cada un de 581 m^3/h i una capacitat de dissipació de 6.917 kW. Per tal de minimitzar els costos de recanvis i manteniment s'optarà per instal·lar el mateix intercanviador que l'utilitzat per refrigerar l'oli lubricant, ja que compleix amb les necessitats de cabal, pressió, temperatura i calor a dissipar.

El refredador és del fabricant *ALFA LAVAL* de la sèrie *T20*. És un intercanviador de calor format per plaques corrugades, això augmenta les turbulències dels fluids que intercanvien el calor en aquest cas l'aigua de mar i aigua destil·lada central que



circularà amb un cabal de $641 \text{ m}^3/\text{h}$ a la vegada augmenta també la superfície d'intercanvi. Pot treballar amb aigua destil·lada i salada amb temperatures fins a 180°C . Pot refredar cabals de fins a $810 \text{ m}^3/\text{h}$ complint de llarg amb el cabal calculat de $581 \text{ m}^3/\text{h}$. La pressió màxima de treball del refredador és de 16 bar.

El cabal d'aigua de mar que circularà en la situació operacional de port serà:

$$Q_{AS} = \frac{C_{abs}}{\rho_{AS} \cdot C_{eAS} \cdot (T_s - T_e)} = \frac{1.544 \text{ kW} \cdot 860,42 \text{ kcal/h} \cdot \text{kW}}{1.025 \text{ kg/m}^3 \cdot 1 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (42 - 32)}$$

$$Q_{AS} = 129,6 \text{ m}^3/\text{h} \approx 130 \text{ m}^3/\text{h}$$

Per la situació a port únicament s'instal·larà un intercanviador ja que el cabal tant d'aigua de mar necessària per dissipar el calor, com l'aigua destil·lada del circuit centralitzat és clarament inferior.

En aquest cas també s'optarà per instal·lar un intercanviador anteriorment seleccionat per reduir costos en recanvis i manteniment. En aquest cas serà el mateix intercanviador que l'utilitzat per refrigerar l'aigua de cilindres. El refredador és del fabricant *ALFA LAVAL* de la sèrie *M15*. Pot treballar amb aigua i vapor d'aigua amb temperatures fins a 160°C . Pot refredar cabals de fins a $288 \text{ m}^3/\text{h}$ complint de llarg amb el cabal calculat d'aigua de mar necessària de $130 \text{ m}^3/\text{h}$ i el cabal d'aigua destil·lada central de $216 \text{ m}^3/\text{h}$. La pressió màxima de treball del refredador és de 16 bar.

· Bombes d'aigua salada

Per tal de garantir el cabal d'aigua de mar a través dels tres intercanviadors dimensionats s'instal·laran quatre bombes centrífugues. Tres seran d'un cabal de $581 \text{ m}^3/\text{h}$ per cobrir la demanda d'aigua de mar durant la situació de maniobra, d'aquestes tres bombes dues estaran en funcionament i una romandrà en reserva, en cas de que falli una aquesta es posaria en funcionament automàticament per garantir el cabal. La quarta bomba serà de $130 \text{ m}^3/\text{h}$ per la situació a port. La potència absorbida per cada una d'aquestes bombes es calcularà amb els rendiments establerts anteriorment per totes les bombes de refrigeració i el salt de pressió serà de 2,5 bar.

- Bombes d'aigua salada en maniobra

$$P_{bba} = \frac{\frac{581}{3600} \left(\text{m}^3/\text{s} \right) \cdot 2,5 \cdot 10^4 \left(\text{kg}/\text{m}^2 \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{\text{kW}}{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}} \right)}{0,7}$$



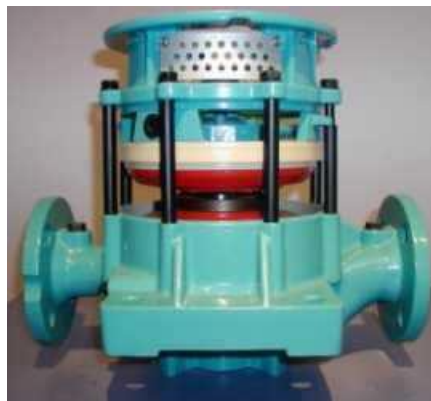
$$P_{bba} = 57,64 \text{ kW}$$

$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{57,64 \text{ kW}}{0,8} = 72,04 \text{ kW} \approx 72 \text{ kW}$$

S'instal·laran tres bombes centrífugues d'accionament elèctric, amb una capacitat mínima de 581 m³/h i 72 kW de potència, amb capacitat per treballar amb aigua mar. Les bombes seleccionades seran del fabricant ALLWEILER de la sèrie NISM. És una bomba centrífuga dissenyada per treballar sobretot amb aigua de mar, té capacitat per treballar amb fluids a temperatures baixes. És d'instal·lació horitzontal o vertical. Les especificacions són les següents:

	Unitats	
Cabal màxim	600	m ³ /h
Altura	140	m
Pressió de descàrrega	10/16	bar
Temperatura	140	°C

· Taula 25: Especificacions de les bombes d'aigua salada en situació de maniobra.



· Imatge 28: Bomba de d'aigua salada en maniobra NISM.

- Bomba d'aigua salada a port

$$P_{bba} = \frac{\frac{130}{3600} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \cdot 2,5 \cdot 10^4 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right) \cdot 10^{-2} \left(\frac{\text{kW}}{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}} \right)}{0,7}$$

$$P_{bba} = 12,89 \text{ kW}$$



$$P_{abs} = \frac{P_{bba}}{\eta_{el}} = \frac{12,89kW}{0,8} = 16,12 kW \approx 16 kW$$

S'instal·larà una bomba centrífuga d'accionament elèctric, amb una capacitat mínima de 130 m³/h i 16 kW de potència, amb capacitat per treballar amb aigua de mar. La bomba seleccionada serà la mateixa que les utilitzades per la circulació d'aigua destil·lada de cilindres. Del fabricant ALLWEILER de la sèrie ALLHEAT NIWH. És una bomba centrífuga dissenyada per treballar sobretot amb aigua de refrigeració, té capacitat per treballar amb fluids a temperatures mitges. És d'instal·lació horitzontal o vertical. Les especificacions són les següents:

	Unitats	
Cabal màxim	220	m ³ /h
Altura	92	m
Pressió de descàrrega	16	bar
Temperatura	350	°C

· Taula 26: Especificacions de la bomba d'aigua salada en situació de port.



5.4. Sistema d'aire comprimit

El sistema auxiliar d'aire comprimit és fonamental per donar servei a molts sistemes i elements que requereixen d'aire comprimit per funcionar, no obstant la gran funció que exerceix aquest sistema és la d'engegar el motor principal i motors auxiliars que d'altre forma seria molt difícil posar-los en marxa en poc temps. Al ser motors de grans dimensions que mouen masses de molt pes, requereixen aire comprimit a alta pressió per iniciar el moviment alternatiu del pistons dintre dels cilindres. Per altre banda l'aire comprimit a menor pressió també és necessari per altres funcions del motor principal com el sistema d'aire de control, de neteja pel turbocompressor o l'aire de seguretat per la parada d'emergència.

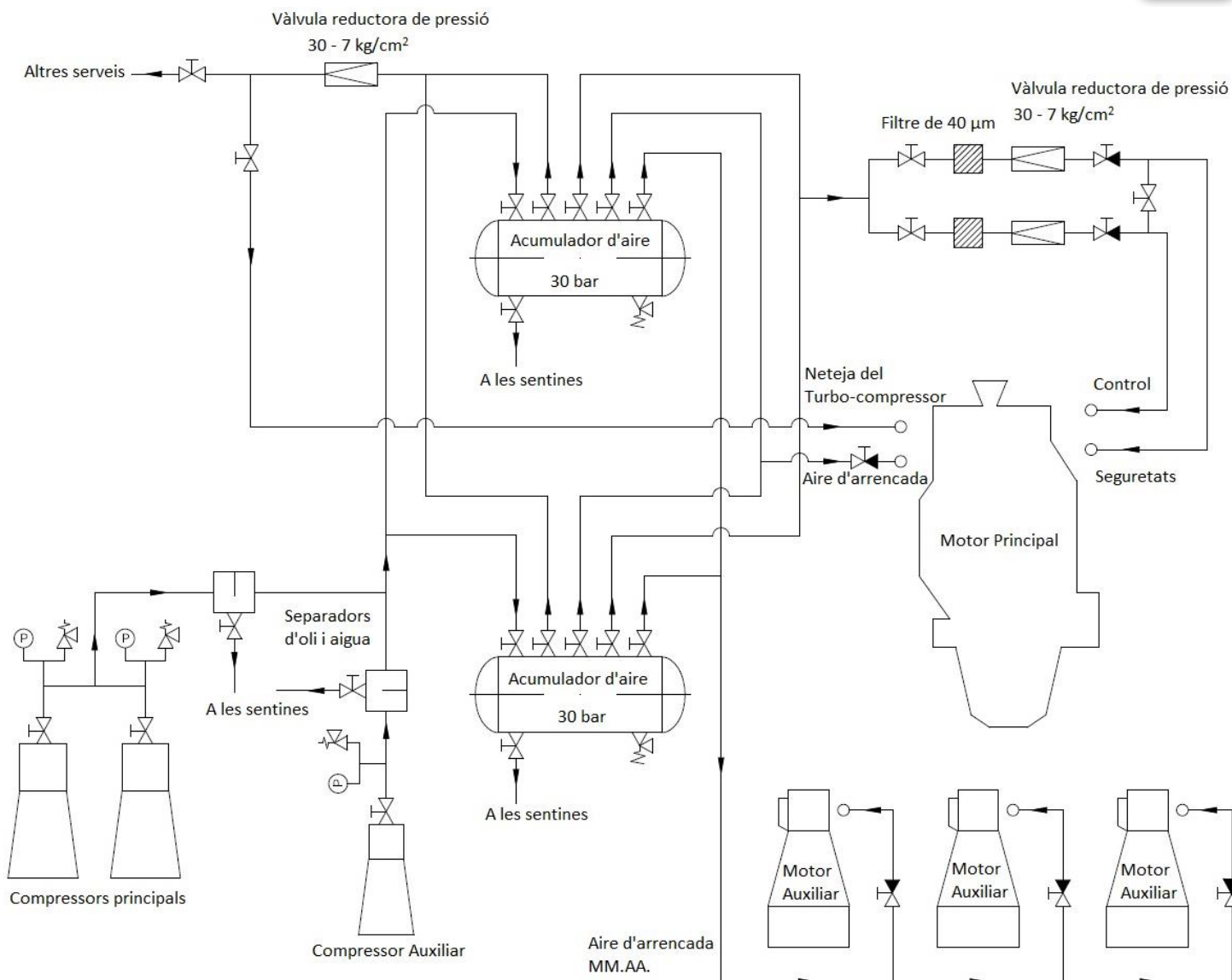
Altres funcions del aire comprimit de baixa pressió a la sala de maquines són la del control y actuació d'instruments, accionament de diferents equips i eines, mitjans d'elevació, preses d'aire comprimit repartides per la sala de màquines etc. Per tant es necessitarà aire comprimit d'alta pressió a 30 bar i de baixa pressió a 7 bar, segons el consumidor que requereixi l'aire comprimit es subministrarà amb unes característiques o d'altres.

El sistema d'alta pressió d'aire comprimit a 30 bar donarà servei al motor principal i els tres motors auxiliars per permetre la seva posada en marxa.

El sistema de baixa pressió d'aire comprimit a 7 bar donarà servei als sistemes de control del motors tant principal com auxiliars, sistemes de seguretat del motor principal i auxiliars, altres sistemes i elements de control pneumàtic, eines d'accionament pneumàtic, mitjans d'elevació i manipulació de càrregues pesades, neteja del turbocompressor, serveis de coberta, sirena etc.

El sistema comprimit comença en els compressors principals, aquests subministren l'aire a una pressió manomètrica de 30 bar als acumuladors, en aquest cas dos acumuladors que es troben a una pressió aproximada de 30 bar. Entre els compressors i els acumuladors s'instal·len uns separadors que s'encarregaran d'eliminar la possible aigua condensada degut a la compressió de l'aire així com també l'oli que i pugui haver per contaminació provinent del compressor.

Per l'engegada del motors, l'aire d'engegada es subministra a una pressió de 30 bar directament des dels acumuladors d'aire comprimit fins al motor principal i els motors auxiliars. L'aire necessari pels diferents consumidors d'aire comprimit de baixa pressió a 7 bar, també és subministrat des dels acumuladors, pas previ per unes vàlvules reductores de pressió que disminuiran la pressió manomètrica del aire dels 30 bar que hi ha en els acumuladors fins el 7 bar necessaris en cada consumidor de baixa pressió.



· Imatge 29: Esquema del sistema d'aire comprimit amb els elements principals.

5.4.1. Elements del sistema d'aire comprimit

Per tal de dimensionar i determinar les característiques que els elements del sistema d'aire comprimit han de complir es farà us de les normatives de la Societat de Classificació ABS, així com les recomanacions que el fabricant del motor principal fa en el seu manual de projecte. S'estableix en la normativa de la Societat de Classificació que la planta de compressor d'aire d'engegada ha de ser capaç de posar el vaixell en condicions de servei partint d'una situació de "vaixell mort". De la mateixa forma les normatives estableixen una sèrie d'aspectes que haurà de complir el sistema de aire comprimit a bord:

- Haurà d'existir algun mitjà a bord per tal de posar en marxa el motor principal i motors auxiliars, de forma que la càrrega inicial d'aire d'engegada es generi sense



energia externa. Si per tal de complir amb aquest requisit és necessari un compressor d'aire o generador d'emergència, aquests haurà de ser accionats per motors dièsel d'engegada manual o mitjançant petites instal·lacions formades per compressors d'accionament manual.

- S'estableix que la instal·lació del sistema d'aire comprimit haurà de comptar amb dos o més compressors d'aire que ajustats a la capacitat total d'aire comprimit. A part s'ha d'instal·lar un compressor auxiliar, els tres compressors hauran de tenir la capacitat d'omplir els acumuladors d'aire en 1 hora partint des de la pressió atmosfèrica fins la pressió suficient per posar en marxa el motor principal 12 vegades consecutives. Un d'aquests compressors d'aire haurà de ser independent de la unitat de propulsió principal. Els compressors principal hauran de ser de capacitats similars, dividint-se la capacitat total entre ells.

- S'indica que la temperatura del aire descarregat als acumuladors d'aire comprimit no superarà el 93°C durant el servei. A part s'haurà d'instal·lar a cada acumulador un petit fusible o dispositiu d'alarma que alerti quant l'aire en l'interior de l'acumulador superi els 121°C per tal d'evitar accidents de gran magnitud.

- Respecte la capacitat dels acumuladors d'aire comprimit s'estableix que la capacitat total de cada acumulador ha de ser suficient per posar en marxa el motor principal, sense haver de reomplir, al menys 12 vegades consecutives alternant entre avant i enrere si es tracta d'un motor reversible, i un mínim de 6 vegades si es tracta d'un motor no reversible. Per norma general s'han d'instal·lar un mínim de dos acumuladors de aproximadament la mateixa capacitat.

· **Acumuladors d'aire comprimit**

Seguint les directrius fixades per la Societat de Classificació anteriorment esmentades, el fabricant del motor principal recomana en el seu manual de projecte instal·lar dos acumuladors, cadascun d'ells amb una capacitat per emmagatzemar 7,5 m³ d'aire comprimit a una pressió de 30 bar. Aquests dos acumuladors també donaran aire comprimit per la posta en marxa dels tres motors auxiliars.

· **Compressors d'aire comprimit**

Les recomanacions del manual de projecte del fabricant són d'instal·lar més de dos compressors amb una capacitat total de subministrament de 450 Nm³/h a una pressió de 30 bar. És la capacitat que exigeix també la Societat de Classificació, corresponent al volum d'aire que s'ha d'introduir en els dos acumuladors en una hora, des de la pressió atmosfèrica fins a la pressió de 30 bar.

$$C_{comp} = \frac{V_{accum} \cdot (P_1 - P_2)}{P_{atm}}$$



On:

C_{comp} : capacitat total dels compressors en Nm^3/h

V_{acum} : volum total dels acumuladors, 2 acumuladors de $7,5 m^3$

P_1 : pressió final dels acumuladors, 31 bar de pressió absoluta

P_2 : pressió inicial dels acumuladors, 1 bar pressió absoluta

P_{atm} : pressió atmosfèrica, 1bar

$$C_{comp} = \frac{2 \cdot 7,5 m^3 \cdot (31 - 1) bar}{1 bar} = 450 Nm^3/h$$

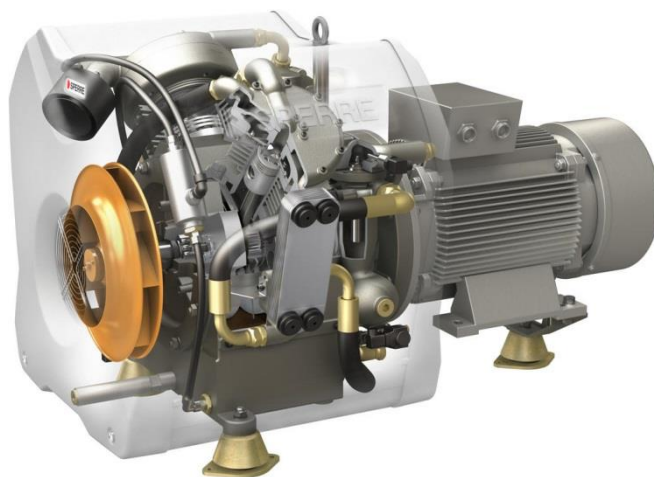
Havent calculat la capacitat total dels compressors i seguint amb els requisits de les Societats de Classificació, s'optarà per instal·lar dos compressors de $180 Nm^3/h$ i un tercer compressor auxiliar de reompliment dels acumuladors de $90 Nm^3/h$. Amb aquesta distribució de la capacitat dels compressors s'aconsegueix que per petites variacions de pressió dintre dels acumuladors no sigui necessari posar en marxa un compressor principal per reomplir els acumuladors si no que amb el compressor auxiliars serà suficient i al ser de menor capacitat, el consum d'energia elèctrica cada vegada que es posa en marxa serà substancialment inferior.

- Compressors principals

S'instal·laran dos compressors del fabricant *SPERRE* model *XW200*. Es tracta d'un compressor refrigerat per aigua per subministrar aire comprimit a una pressió nominal de 30 bar. Va ensamblat en una estructura tancada, destaca per no emetre oli de lubricació polvoritzat a l'ambient, compta amb una gran eficiència de refrigeració i un baix nivell de vibracions. Les seves principal característiques són les següents:

	Unitats	
Revolucions nominals	1.475	rpm
Capacitat	185	Nm^3/h
Potència absorbida	35	kW
Calor dissipada al ambient	5,3	kW
Aigua de refrigeració	65	l/min
Pes	920	kg
Nº de cilindres	2 en V a 90°	
Volum d'oli lubricant	23	l
Pressió màxima de descàrrega	40	bar
Temperatura ambient màxima	55	$^\circ C$

· Taula 27: Especificacions dels compressors principals d'aire comprimit.



· Imatge 30: Compressor d'aire principal SPERRE XW200.

- Compressor auxiliar

S'instal·larà un únic compressor del fabricant SPERRE model XW090. Es tracta d'un compressor refrigerat per aigua per subministrar aire comprimit a una pressió nominal de 30 bar. Va ensamblat en una estructura tancada, destaca per no emetre oli de lubricació polvoritzat a l'ambient, compta amb una gran eficiència de refrigeració i un baix nivell de vibracions. Les seves principal característiques són les següents:

	Unitats	
Revolucions nominals	1.775	rpm
Capacitat	100	Nm ³ /h
Potència absorbida	20	kW
Calor dissipada al ambient	2	kW
Temperatura de sortida de l'aire comprimit	25 més que la T _{ambient}	°C
Pes	465	kg
Nº de cilindres	2 en V a 90°	
Volum d'oli lubricant	8	l
Pressió màxima de descàrrega	40	bar
Temperatura ambient màxima	55	°C

· Taula 28: Especificacions del compressor auxiliar d'aire comprimit SPERRE XW090.

· Separador d'aigua i oli lubricant

Com és conegut, al comprimir l'aire en els compressor instal·lats a bord, es genera una quantitat significativa d'aigua de condensació present el l'aire ambient i difícil de separa abans de la seva compressió. A part el propi compressor té unes necessitats de lubricació que fan que algunes partícules del seu oli lubricant s'immesceixin en l'aire



comprimit. Tant l'aigua de condensació com les partícules d'oli presents en l'aire comprimit poden ser molt perjudicials pels diversos sistemes i equips consumidors d'aquest aire, és per això que es fa imprescindible la instal·lació de separadors d'aquests dos contaminants de l'aire comprimit.

Per tal d'eliminar els contaminants s'instal·larà un separador d'aigua i oli amb una capacitat de $360 \text{ Nm}^3/\text{h}$, anirà situat a la sortida de l'aire comprimit dels dos compresors principals, amb aquesta capacitat podrà separar tot l'aire comprimit subministrat per les dues unitats compresores. A més a la sortida del compresor auxiliar també s'haurà d'instal·lar una altra unitat de separació d'aigua i oli lubricant de l'aire que subministrarà el compresor auxiliar amb la mateixa capacitat de tractament de l'aire de $90 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

· **Vàlvules reductores de pressió i filtre pel sistemes d'aire de control i seguretats**

Per els serveis ja esmentats anteriorment de control del motor principal i seguretats del motor principal, es necessita aire comprimit a menor pressió. S'instal·larà llavors dues línies reductores de pressió per tal disminuir la pressió de l'aire comprimit de 30 a 7 bar, aptes per el consum d'aquests serveis de seguretats i control del motor principal. En el cas que s'hagin de realitzar operacions de manteniment en alguna de les línies reductores de pressió es disposarà un vàlvula que connectarà ambdues línies per garantir el subministrament d'aire a 7 bar als dos sistemes. Les especificacions del fabricant recomanen una tolerància de $\pm 10\%$ en aquestes vàlvules reductores de pressió.

Per més seguretat i per garantir que els sistemes de control i seguretats del motor principal no fallaran per obstruccions en el conductes degut a aigua condensada o partícules d'òxid que puguin ser perjudicials pels sistemes, s'instal·laran filtres de malla a cada línia reductora de pressió just abans de l'entrada en el motor principal. El fabricant recomana filtres de malla d'acer inoxidable de $40 \mu\text{m}$, també s'indica que la caiguda de pressió en aquests filtres no podrà ser superior a 0,2 bar. En les especificacions d'aquests dos sistemes del motor principal s'imposa un cabal d'aire comprimit de $0,035 \text{ Nm}^3/\text{h}$, per tal de flux en els sistemes de seguretats i control sigui l'adequat.

· **Vàlvula reductora de pressió per el turbocompressor i d'altres serveis**

Com ja s'ha dit l'aire a 7 bar de pressió també es farà servir per nombrosos equips i serveis tan a la sala de màquines com a coberta, per tant s'instal·larà una vàlvula reductora que reduirà la pressió de 30 bar a 7 bar, amb una tolerància de $\pm 10\%$, per aquests serveis. A més d'aquesta vàlvula sortirà un altre línia amb un cabal d'aire no inferior a $0,043 \text{ Nm}^3/\text{h}$ per donar el servei de neteja del turbocompressor del motor principal.

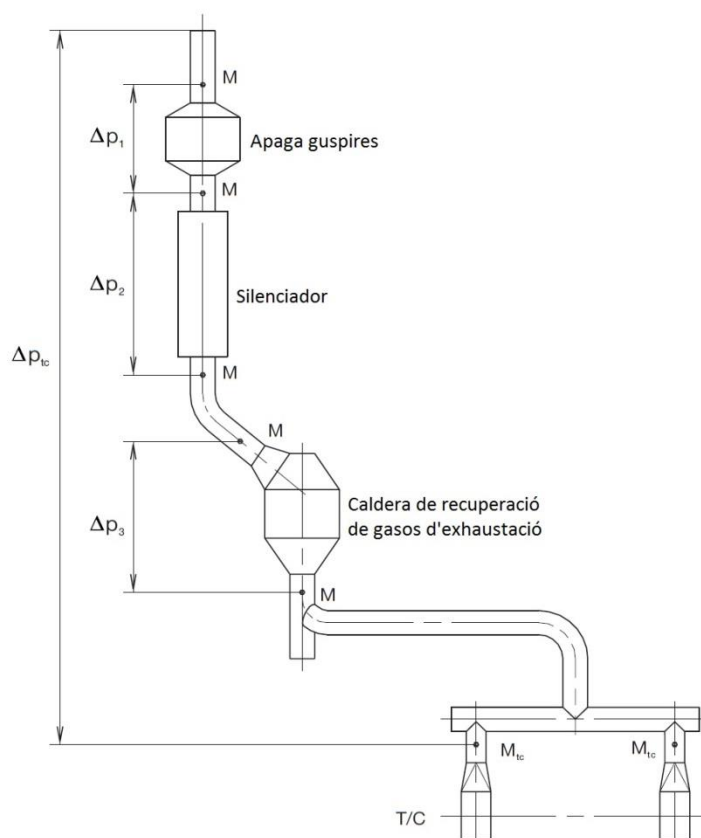


5.5. Sistema d'exhaustació i generació de vapor

Arribats en aquest punt del projecte, els elements de relleu que falten per dimensionar són aquells per els quals passen els gasos d'exhaustació provinents del motor principal i que finalment sortiran a l'atmosfera. Una de les funcions d'aquest sistema amb els seus elements serà la d'aprofitar en forma d'escalfor els gasos del motor principal. Els elements i sistemes que es dimensionaran seran en primer lloc el conducte d'exhaustació del motor principal.

En segon lloc es calcularà la caldera de recuperació de gasos d'escapament, en aquest punt es determinarà el cabal i temperatura dels gasos d'escapament per tal d'aprofitar-los per generar vapor, que posteriorment es pot aprofitar per generar energia elèctrica en una turbina o be per l'escalfament del combustible dels tancs de fuel-oil i d'altres serveis que requereixen vapor pel seu funcionament. Lligat amb aquest dimensionament es farà la selecció de les calderes auxiliars per cobrir les necessitats de vapor que es tindran quant la caldera de recuperació no estigui operativa per la parada del motor principal.

Finalment es determinaran els últims dos equips presents en el sistema d'exhaustació, de menys relleu que els anteriors, sent el silenciador per tal de complir amb la normativa respecte la contaminació acústica que genera el vaixell i l'equip apaga guspines que ha de formar part d'aquest sistema per temes de seguretat.



· Imatge 31: Esquema del sistema d'exhaustació amb els elements principals.



5.5.1. Dimensionament del conducte d'exhaustació

Aquest conducte és el que dirigirà els gasos d'exhaustació des de la sortida del turbocompressor del motor principal fins l'atmosfera passant per els elements descrits en la introducció. El correcte dimensionat d'aquest conducte és de gran importància ja que la resistència dels gasos d'exhaustació té una gran influència sobre el consum de combustible i la temperatura del motor.

La pèrdua de càrrega o resistència total del sistema d'exhaustació no pot superar els 35 mbar, tot i que segons especificacions del fabricant és recomanable que en els càlculs aquesta pèrdua de càrrega no superi els 30 mbar, per tal d'agafar un marge que tingui en compte l'envelliment i deteriorament de la instal·lació. Tots els elements presents en el sistema d'exhaustació, inclòs el propi conducte, afegeixen resistència a la sortida del gasos, és per això que el conducte de gasos d'exhaustació ha de ser el màxim de curta i recta possible per tal de disminuir el mínim aquestes pèrdues de càrrega.

També la resistència dels gasos a sortir del conducte d'exhaustació dependrà de la seva velocitat, sent la resistència proporcional al quadrat de la velocitat, i per tant inversament proporcional al diàmetre del conducte elevat a la quarta potència. Pel correcte dimensionat del conducte, la velocitat dels gasos no haurà de excedir de 50 m/s, sent 40 m/s la recomanació feta pel fabricant en el seu manual de projecte. En un conducte de diàmetre D , la velocitat dels gasos d'escapament ve determinada per la següent fórmula.

$$v = \frac{4 \cdot M}{\rho \cdot \pi \cdot D^2}$$

On:

v : velocitat dels gasos d'escapament en m/s

M : cabal de gasos d'escapament en kg/s

ρ : densitat del gasos d'escapament en kg/m³

D : diàmetre del conducte en m

La densitat dels gasos d'escapament ρ , depèn de la temperatura a la que surten del turbocompressor i es pot calcular amb la següent expressió.

$$\rho = 1,293 \cdot \frac{273}{273 + T} \cdot 1,015$$

On T és la temperatura dels gasos d'escapament en °C. El factor 1,015 és per aplicar la resistència mitjana de 0,015bar en el sistema de gasos d'exhaustació. Així doncs el



diàmetre del conducte pot calcular-se a partir de la velocitat de sortida dels gasos, el cabal i la temperatura dels gasos, quedant la següent expressió.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot M}{1,293 \cdot \frac{273}{273 + T} \cdot 1,015 \cdot \pi \cdot v}}$$

La velocitat de sortida dels gasos d'escapament ve fixada i recomanada pel fabricant que estableix que serà de 40 m/s.

El cabal de gasos d'escapament quant el motor principal es troba funcionant en el punt nominal MCR (16.860kW), el proporciona el fabricant en el seu manual de projecte sent de 157.800 kg/h.

La temperatura dels gasos d'escapament a la sortida del turbocompressor quant el motor es troba funcionant en el punt nominal MCR, també ens el dona el fabricant en el manual de projecte i vist en les especificacions de selecció del motor propulsor fixada en 245°C.

Amb totes les dades necessàries per calcular el diàmetre del conducte d'exhaustació obtenim el següent resultat:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 43,83 \text{ kg/s}}{1,293 \cdot \frac{273}{273 + 245 \text{ } ^\circ\text{C}} \cdot 1,015 \cdot \pi \cdot 40 \text{ m/S}}} = 1,42 \text{ m}$$

El conducte de gasos d'exhaustació haurà de tenir un diàmetre mínim de 1.420 mm, no obstant el fabricant dona uns diàmetres nominals estandarditzats segons el qual amb un resultat de diàmetre superior a 1.400mm, s'haurà d'optar per la instal·lació d'un conducte d'exhaustació de diàmetre superior corresponent a 1.500mm.

5.5.2. Caldera de recuperació de gasos d'exhaustació

Quant el motor principal es troba en funcionament durant les situacions de navegació i maniobra, la gran quantitat de gasos d'escapament generats contenen una gran quantitat d'energia en forma de calor que es pot aprofitar per generar vapor i donar el servei de calefacció dels tancs de combustible o utilitzar aquest vapor en una turbina per generar electricitat. En aquest cas s'optarà per motors auxiliars per la generació elèctrica prescindint de la instal·lació d'un turbogenerador.

Per tal de calcular la quantitat de vapor que podem obtenir a partir de l'energia calorífica dels gasos d'exhaustació, i determinar quin aprofitament es farà d'aquest



vapor, es determinarà primer l'energia total que es pot obtenir del gasos mitjançant la següent fórmula.

$$Q = q_g \cdot C_{e_g} \cdot (T_e - T_s) \cdot \eta_{caldera}$$

On:

Q : energia total dels gasos d'escapament en kcal/h

q_g : cabal de gasos d'escapament 157.800 kg/h

C_{e_g} : calor específic dels gasos d'escapament 0,25 kcal/kg·°C

T_e : temperatura d'entrada del gasos a la caldera 245°C

T_s : temperatura de sortida dels gasos 180°C

$\eta_{caldera}$: rendiment total de la caldera 0,96

$$Q = 157.800 \frac{kg}{h} \cdot 0,25 \frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (245 ^\circ C - 180 ^\circ C) \cdot 0,96$$

$$Q = 2.461.680 \frac{kcal}{h}$$

Hi ha un paràmetre d'especial importància, és la temperatura de sortida dels gasos d'escapament. Quant els combustible utilitzats en el motor principal contenen sofre, com és aquest cas, aquest és oxidat a SO_2 . Si hi ha el suficient oxigen, part d'aquest SO_2 s'oxidarà encara més a SO_3 . Si hi ha partícules d'aigua, aquestes poden reaccionar amb l' SO_3 formant l'àcid sulfúric H_2SO_4 , que té un impacte altament negatiu en la instal·lació ja que produeix corrosió amb facilitat. Es per això que per tal d'evitar la condensació del vapor d'aigua que contenen el gasos d'escapament, aquests no hauran de sortir a menys de 180°C del conducte d'exhaustació, estant per sobre del punt de rosada i evitant la temuda formació de l'àcid sulfúric.

Una vegada calculada la energia calorífica per unitat de temps que desprenen aquests gasos d'escapament, es calcularà el flux màssic de vapor d'aigua que es pot generar a la caldera de recuperació de gasos amb l'energia obtinguda anteriorment.

$$q_v = \frac{Q}{h_v - h_{H_2O}}$$



On:

q_v : flux màssic de vapor d'aigua que pot generar-se en kg_v/h

Q : energia cedida pels gasos d'escapament a la caldera 2.461.680 kcal/h

h_v : entalpia del vapor saturat sec a la pressió de treball de la caldera (7bar) 660 kcal/kg.

h_{H_2O} : entalpia de l'aigua que entra a la caldera per convertir-se en vapor saturat sec a la pressió de 7 bar en kcal/kg. Aquesta entalpia serà:

$$h_{H_2O} = C_{e_{H_2O}} \cdot T_{H_2O}$$

$C_{e_{H_2O}}$: calor específic de l'aigua 1 kcal/kg·°C

T_{H_2O} : temperatura d'entrada de l'aigua a la caldera 70°C

$$h_{H_2O} = 1 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ C \cdot 70 ^\circ C = 70 \text{ kcal/kg}$$

Obtenim llavors el flux màssic de vapor que es pot generar a la caldera de recuperació de gasos d'escapament.

$$q_v = \frac{2.461.680 \text{ kcal/h}}{660 \text{ kcal/kg} - 70 \text{ kcal/kg}} = 4.172,34 \text{ kg}_{vapor}/h$$

Per la instal·lació de la caldera de recuperació de gasos s'han de tenir en compte varis aspectes com que ha d'anar situada el més a prop possible de la sortida del gasos del turbocompressor. En el càlcul realitzat no s'han contemplat les pèrdues de temperatura dels gasos des de la sortida del turbocompressor fins l'entrada a la caldera de recuperació ja que s'entén que aquest tram de conducte anirà ben aïllat tèrmicament per evitar aquestes pèrdues.

L'element de la caldera de recuperació de gasos en el sistema d'exhaustació és el que produeix una major pèrdua de càrrega. En concret el fabricant del motor principal recomana que aquesta pèrdua de pressió a través de la unitat de generació de vapor no sigui superior als 15 mbar a la potència nominal MCR. No obstant aquesta pèrdua de càrrega pot ser major o menor depenent de la resta d'elements i de la pèrdua de càrrega que tinguin cada un d'ells, això si, totes les pèrdues de càrrega dels elements dimensionats formats per la caldera de recuperació, el silenciador i l'apaga-guspies no podrà superar els 30 mbar de pèrdua de càrrega global de tot el conjunt d'elements que formen el sistema d'exhaustació.



Una vegada calculat el flux màssic de vapor que es pot obtenir amb la calor residual dels gasos d'exhaustació, la temperatura dels gasos d'escapament així com la pressió del vapor saturat sec a la caldera, es seleccionarà el fabricant i model que més s'ajusti a les necessitats i característiques trobades.



· Imatge 32: Caldera economitzador AALBORG MISSION XS-2V.

Les característiques que ha de tenir la caldera de recuperació són: un cabal de vapor aproximat de $4 t_{\text{vapor}}/h$, una capacitat calorífica de 2.461.680 kcal/h, el que és igual, 2,8 MW i una pressió de disseny mínima de 7 bar. Amb aquestes dades es selecciona una caldera de recuperació de gasos d'escapament del fabricant AALBORG INDUSTRIES model MISSION XS-2V. Es tracta d'una caldera pirotubular d'instal·lació vertical, dissenyada especialment per aprofitar la calor dels gasos d'exhaustació provinents d'un motor dièsel. Està construïda íntegrament amb unions soldades, té la possibilitat d'integrar un silenciador per reduir la contaminació acústica produïda pel motor principal. El disseny de la caldera de recuperació i la seva mida es pot encarregar amb les característiques de flux de gasos, temperatura, pressió de treball i capacitat de vapor adequats per la planta propulsora instal·lada en el vaixell. La caldera compta amb una velocitat de pas de gasos elevada per tal d'evitar al màxim l'acumulació de residus de la combustió. La seva construcció íntegra d'elements soldats, li atorga

un disseny robust, capaç en casos d'emergència de treballar en sec, sense aigua. Els seus rangs de funcionament i principals característiques són els següents:

	Unitats	
Capacitat de vapor	0,5 - 5	t/h
Capacitat calorífica	0,3 - 4	MW
Pressió de disseny	10	bar
Temperatura de treball	245	°C

· Taula 29: Especificacions de la caldera de recuperació de gasos d'exhaustació.



5.5.3. Generadors de vapor auxiliars

En l'anterior punt s'ha calculat i seleccionat el generador de vapor que satisfarà les necessitats de vapor tant per la calefacció dels tancs de combustible pesat com per els equips i elements de la sala de màquines que el necessitin, sent els més importants escalfadors de l'oli lubricant i el fuel-oil de les purificadores, escalfadors del mòdul de preparació del combustible pel motor principal i auxiliars, calefacció de l'habilitació, escalfadors d'aigua sanitària etc. No obstant aquesta caldera de recuperació de gasos únicament podrà subministrar el vapor quant el motor principal es trobi en funcionament, durant les situacions operatives de navegació i maniobra, quedant fora de servei a port ja que el motor estarà parat.

Es per això que caldrà seleccionar i instal·lar dos generadors de vapor auxiliars, que durant les estades a port, segueixin subministrant el vapor necessari per l'escalfament de tancs de combustible durant les operacions de càrrega i descàrrega del fuel-oil. Aquest generadors de vapor consumiran HFO de 700 cST a 50°C, el mateix combustible utilitzat pels motors, però s'abastiran directament dels tancs de sedimentació sense passar per tot el sistema de preparació i adequació del combustible que utilitzen els motors. El consum per tant serà esporàdic durant les operatives de càrrega i descàrrega a port, és per això que no s'han tingut en compte a la hora de dimensionar la capacitat dels tancs de combustible. La temperatura del fuel-oil que consumiran estarà entre els 60-70°C apte per ser injectat en els cremadors dels generadors de vapor.

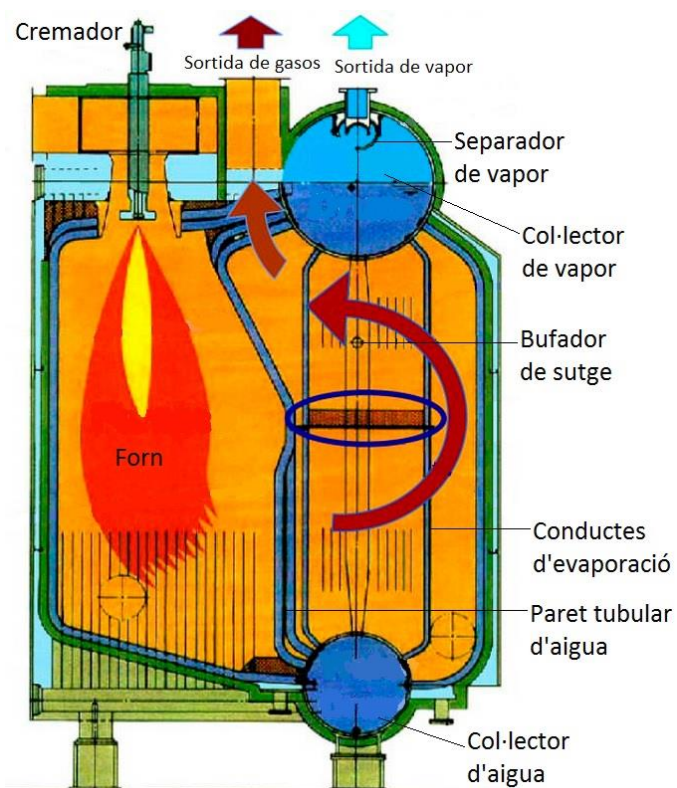
Per donar el servei de vapor durant l'operativa en port s'elegiran dues calderes de 40.000 kg_{vapor}/h cada una, una estarà en servei i l'altre en reserva. Es selecciona aquesta capacitat de generació de vapor per extrapolació de vaixells petrolers de similar capacitat de càrrega i emmagatzematge de combustible pesat. S'optarà per instal·lar dues calderes aquatubulars d'alta pressió i alta temperatura del fabricant *MITSUBISHI* model *MAC-40B*. Es tracta d'una caldera de parets tubulars circulades per aigua, és de doble col·lector, un col·lector superior de vapor i un col·lector inferior d'aigua, i d'alimentació de combustible líquid, podent cremar gran varietat de fue-oils, dièsel-oils, etc. Compta amb un únic cremador en la seva part superior. És una caldera de fàcil manteniment i inspecció, compta amb bufadors de sutge podent realitzar la neteja durant l'operativa normal de la caldera. Les característiques principals són les següents:

	Unitats	
Capacitat de vapor	40	t/h
Tipus de vapor	Saturat	
Pressió de disseny	18	bar



Pressió de treball	16	bar
Temperatura del vapor	280	°C
Rendiment de la caldera	82,5	%
Temperatura de l'aigua d'alimentació	60	°C
Temperatura de l'aire	38	°C
Consum de Fuel-Oil	3.029	kg/h
Pes	44	t
Volum d'aigua	19	m ³

· Taula 30: Especificacions dels generadors de vapor auxiliars.



· Imatge 33: Esquema de la caldera auxiliar MITSUBISHI MAC-40B .



· Imatge 34: Generador de vapor MITSUBISHI MAC-40B .

5.5.4. Silenciador

Aquest element anirà instal·lat a continuació de la caldera de recuperació de gasos d'escapament. Aquest silenciador s'instal·la per tal de reduir les emissions acústiques del motor dièsel provocades principalment per:

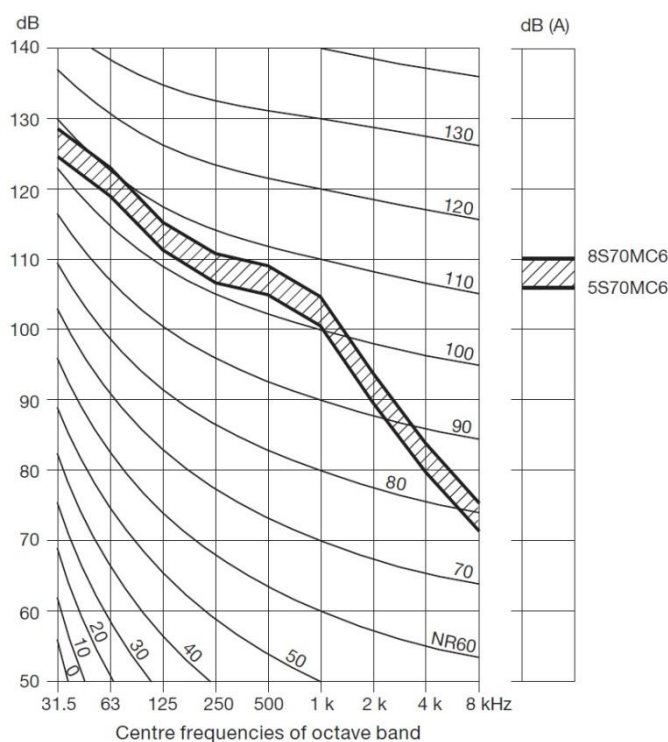
- Pulsacions dels gasos d'escapament.
- Turbocompressor.



- Vàlvules d'escapament.
- Sistema d'injecció del fuel-oil.

No obstant el soroll de major importància i pel qual s'instal·la el silenciador és el provocat per les pulsacions del gasos d'escapament, que estarà restringit en segons quines zones navegui el vaixell. Així la OMI regula les emissions acústiques màximes permeses en els espais de navegació d'entre 60-70 dB(A). Aquestes nivells màxims es poden reduir mitjançant la instal·lació d'un silenciador de gasos d'escapament.

El fabricant del motor adjunta en el seu manual de projecte un gràfic amb les corbes NR d'avaluació del soroll del motor principal, funcionant a la potència nominal MCR (16.860 kW), en aquestes corbes es pot observar que el nivell de soroll emès pel motor principal és aproximadament de 108 dB(A).



· Imatge 34: Corbes NR d'avaluació del soroll del motor principal.

Vist que el nivell d'emissions acústiques del motor principal seleccionat és superior al nivell màxim marcat per les normatives internacionals de la OMI, s'optarà per la instal·lació d'un silenciador per mantindre el nivell de soroll provocat pels gasos d'escapament per sota dels 70 dB(A). Per tant serà necessari instal·lar un silenciador amb una atenuació de 40 dB(A), el cabal de gasos que circularà serà el fixat pel dimensionament del conducte d'exhaustació de 40 m/s i la pèrdua de càrrega aproximada que fixa també el fabricant serà de 2 mbar per la velocitat donada dels gasos d'escapament.



5.5.5. Apaga guspies

L'últim element que travessen els gasos d'escapament abans de sortir a l'atmosfera és l'equip apaga guspies. Aquest té la important funció d'evitar que les possibles guspies que puguin arrossegar el gasos d'exhaustació es propaguin fora del sistema d'exhaustació, reduint el risc de que es declari un incendi a bord.

Un aspecte important a tenir en compte és que aquest dispositiu contribueix de forma important a generar pèrdues de càrrega dels gasos d'escapament en el sistema d'exhaustació. Es per això que la recomanació del fabricant del motor principal és que no es superin els 10 mbar de pèrdua de pressió conjunta entre el silenciador i l'equip apaga guspies.



6. Motors auxiliars i generació elèctrica

Una vegada dimensionats i seleccionats tots els elements de tots els sistemes auxiliars a la propulsió, necessaris pel funcionament de la planta propulsora principal escollida, s'ha de determinar el tipus i els mitjans de generació elèctrica a bord, per donar el subministrament de potència necessària perquè tots ells funcionin de manera adequada i amb el mínim cost energètic possible.

Els motors auxiliars acoblats als seus respectius alternadors tenen la funció de generar i subministrar l'energia elèctrica als diferents consumidors del vaixell, no tant sols als equips i sistemes presents a la sala de màquines si no també als serveis de l'habilitació i equips de coberta, com són la il·luminació, l'aire condicionat, cuina, aparells de navegació etc.

No obstant la generació elèctrica a bord d'un mercant pot generar-se de diverses maneres depenent dels equips utilitzats sent els més importants:

- Generador directament acoblat al motor principal, conegut com a generador de cua.
- Turbogenerador accionat pels gasos d'exhaustió o per vapor.
- Alternadors accionats per motors auxiliars.

Com ja s'ha comentat anteriorment, no s'instal·larà cap turbogenerador accionat pel vapor produït en la calderes auxiliars o la caldera de recuperació de gasos d'escapament, ja que s'optarà per produir l'energia elèctrica en un conjunt de generadors auxiliars dièsel, transformant l'energia del combustible en energia mecànica, i posteriorment aquesta energia mecànica en energia elèctrica a través dels alternadors.

El procés que es seguirà per determinar la potència i el tipus de generadors d'electricitat que s'han d'instal·lar, serà en primer lloc, determinar el tipus de corrent elèctrica, tensions i freqüència que s'utilitzarà. En segon lloc es farà un anàlisi de la demanda d'energia elèctrica mitjançant un balanç elèctric que recollirà el major nombre de consumidors ja dimensionats anteriorment i d'altres estimats per tal de aproximar al màxim la demanda de potència en cada situació operacional del vaixell. Per últim es determinarà el nombre i la potència dels grups de motors auxiliars més alternadors que es necessiten per garantir el subministrament de potència obtinguda en pas anterior del balanç elèctric. Cal destacar que el nombre de motors auxiliars ja s'ha determinat en tres grups electrògens en apartats anteriors, per tant la potència necessària es repartirà en les unitats generadores fixades.



6.1. Generació elèctrica

És habitual en qualsevol mercant que la corrent utilitzada a bord sigui corrent alterna. La raó principal per seleccionar aquest tipus de corrent elèctrica en lloc de la corrent contínua és purament econòmica, el fet d'utilitzar la corrent contínua suposaria un cost extra de material ja que requereix elements per la generació i distribució de la corrent més voluminosos i pesants, al ser de coure la gran majoria, augmentaria el pressupost respecte l'altre opció de corrent alterna que no requereix tanta quantitat d'aquest material relativament car.

La corrent alterna també ofereix l'avantatge que en gran part dels ports dels ports si no tots, disposen de preses de corrent alterna en el moll, d'aquesta manera el vaixell podria disposar de corrent subministrada des de terra, segons la conveniència del preu de l'electricitat subministrada des del port o generada a bord. Un altre aspecte important és de tenir la possibilitat de la connexió a terra per temes mediambientals que es volen portar a terme en pròximes regulacions.

Una vegada definit el tipus de corrent que s'utilitzarà cal determinar quin tipus de tensió i freqüència d'alimentació tindrà la xarxa elèctrica de bord. Les opcions més comunes a bord d'un vaixell mercant solen ser xarxes trifàsiques de 440 V/60Hz o de 380V/50Hz. En aquest cas concret s'optarà per una xarxa trifàsica de 440V de tensió i 60 Hz de freqüència elèctrica, per subministrar l'electricitat als elements i equips del vaixell que requereixen una potència elèctrica elevada, com són els diferents sistemes auxiliars a la propulsió anteriorment dimensionats.

Per el subministrament de la resta d'elements i equips, com són la xarxa d'enllumenat a bord, serveis de l'habilitació o de coberta que demanden en general menor potència s'optarà per una xarxa de distribució de 220V de tensió i 60 Hz de freqüència elèctrica.

6.1.1. Balanç elèctric

Aquest procediment és clau per tal de definir la potència dels motors auxiliars que aniran acoblats als alternadors que subministraran les necessitats d'energia elèctrica de tots els consumidors. Aquestes necessitats d'energia elèctrica són molt variables segons la situació operacional del vaixell, per tal de tenir en compte aquestes variacions es necessari realitzar el balanç elèctric durant el dimensionament del sistema, per tal d'ajudar a definir la planta generadora.

El balanç elèctric es defineix com l'anàlisi de la demanada d'energia elèctrica en les diverses situacions de càrrega que poden donar-se durant l'exploració del vaixell. Així



el resultat que s'obtindrà al finalitzar el balanç elèctric serà la potencia demandada pel vaixell en les diferents situacions de càrrega. Existeixen diversos mètodes per la realització del balanç elèctric d'un vaixell, en aquest projecte en particular es realitzaran els següents passos per tal de arribar a un resultat al màxim de precís possible:

- En primer lloc es llistaran els diferents consumidors elèctrics en una taula tot indicant el nombre d'unitats de cada element instal·lades (N), el nombre d'aquestes unitats necessàries per donar cobertura el servei o sistema en qüestió (S), i la potència nominal en kW de cadascun dels consumidors.
- En segon lloc es defineixen les diverses situacions operacionals del vaixell vistes en apartats anteriors del treball, en les que hi ha diferències significatives de consum elèctric, seran un total de quatre situacions clarament diferenciades: *Navegació*, *Maniobra*, *Port carregant*, *Port descarregant*.
- A continuació per cada un dels consumidors dintre d'una situació operacional determinada s'establirà una de les següents categories: *Contínua (Cont.)*, *Periòdica (Per.)*, *Eventual (Even.)*. S'establirà una categoria o una altre segons ho requereixi el servei en el que es troba el consumidor en cada situació de càrrega.
- L'últim pas consisteix a calcular el nombre i capacitat dels grups motor més alternador, complint amb els requeriments de la Societat de Classificació així com també amb les normatives de seguretat recollides en el SOLAS.

6.1.1.1. Situacions operacionals del vaixell

A continuació es definiran les diverses situacions d'operació del vaixell comentades anteriorment. Cada una d'aquestes situacions d'operació es específica i particular per cada tipus de vaixell, havent de definir-les en cada cas en particular:

- **Navegació:** en aquesta situació s'haurà de subministrar l'energia elèctrica necessària per donar servei a tots els consumidors que estan en funcionament durant la navegació del vaixell en el mar.
- **Maniobra:** és el consum d'energia corresponent als consumidors que funcionen en la situació de *Navegació*, podent funcionar a règims diferents o en major nombre d'unitats en funcionament, més els consumidors que només funcionaran en les situacions d'entrada/ sortida de port i durant l'atrancament al moll del vaixell.
- **Port:** és la situació en que el vaixell es trobarà carregant o descarregant el contingut dels tancs de càrrega, en aquesta situació es comptabilitzaran els consums dels



consumidors que funcionen normalment en la condició de port més el necessaris per la manipulació de la càrrega i el seu transvasament.

6.1.1.2. Categories dels consumidors

Una vegada definides les situacions operacionals en la que diferents consumidors estaran en servei o no, s'ha de definir per cada un d'aquests consumidors la categoria en la qual estaran inclosos, tenint en compte el seu règim de funcionament en la situació d'operació donada i del seu funcionament simultani juntament amb una altre unitat instal·lada.

- **Contínua:** s'inclouran aquells consumidors que donen un servei que és necessari de forma contínua i a règim nominal. S'estableix 1 com a coeficient de simultaneïtat.
- **Periòdica:** seran aquells consumidors que donen un servei que és necessari de forma discontinua i simultània amb d'altres consumidors. S'estableix 0,5 com a coeficient de simultaneïtat.
- **Eventual:** seran aquells consumidors que donen un servei que és necessari de forma discontinua i simultània amb d'altres consumidors durant períodes curts de temps. S'estableix 0,25 com a coeficient de simultaneïtat.



Consumidors	Dades del consumidor			Navegació			Maniobra			Port carregant			Port descarregant		
	N	S	kW	Cont.	Per.	Even.	Cont.	Per.	Even.	Cont.	Per.	Even.	Cont.	Per.	Even.
Planta Propulsora															
Virador	1	1	4,5									4,5			4,6
Admissió auxiliar	2	2	76,5				153,0								
Bba. circulació A.D.	2	1	88,0	88,0			88,0								
Bba. circulació A.D. Port	1	1	30,0							30,0			30,0		
Bba. circulació cilindres. A.D.	2	1	21,0	21,0			21,0								
Bomba A.S.	3	2	72,0	144,0			144,0								
Bomba A.S. Port	1	1	16,0							16,0			16,0		
Bomba transvasament O.L.	1	1	5,0			5,0			5,0						
Bomba circulació O.L.	2	1	105,4	105,4			105,4								
Bba. transv. O.L. Cilindres	1	1	0,4	0,4			0,4								
Bba. transv. O.L. MM.AA.	1	1	0,5	0,5			0,5			0,5			0,5		
Bba. preescalfament cilindres	2	1	2,2							2,2			2,2		
Compressor Principal	2	2	35		35			70			35			35	
Compressor Auxiliar	1	1	20			20					20				20
TOTAL				359,3	35	25	512,3	70	5	48,7	35	24,5	48,7	35	24,6
Combustible/Purificació/O.L.															
Bba. transvasament HFO	2	1	7,0			7,0			7,0			7,0			7,0
Bba. alim. Purificadores HFO	2	1	1,5	1,5			1,5				1,5			1,5	
Bomba alimentació M.P.	2	1	1,4	1,4			1,4								
Bomba circulació M.P.	2	1	3,2	3,2			3,2								
Bomba tanc de Llots	1	1	3,4							3,4			3,4		
Bba. transvasament MDO	2	1	6,8			6,8			6,8			6,8			6,8
Bba. alim. Purificadores O.L.	2	1	0,3	0,3			0,3				0,3			0,3	



<i>Bba. alim. Purif. O.L. MM.AA.</i>	1	1	0,1	0,1			0,1			0,1			0,1		
<i>Purificadora HFO/MDO</i>	2	1	14,0	14,0			14,0			14,0			14,0		
<i>Purificadora O.L. M.P.</i>	2	1	10,0	10,0			10,0			10,0			10,0		
<i>Purificadora O.L. MM.AA.</i>	1	1	10,0	10,0			10,0			10,0			10,0		
TOTAL				40,5	0,0	13,8	40,5	0,0	13,8	37,5	1,8	13,8	37,5	1,8	13,8
Consumidors	Dades del consumidor			Navegació			Maniobra			Port carregant			Port descarregant		
	N	S	kW	Cont.	Per.	Even.	Cont.	Per.	Even.	Cont.	Per.	Even.	Cont.	Per.	Even.
Calderes i Generador A.D.															
<i>Bba. combustible Caldera Aux.</i>	1	1	0,7				0,7			0,7			0,7		
<i>Ventilador cremador Cal. Aux.</i>	2	1	2,4					2,4			2,4			2,4	
<i>Bba. alimentació A.D. Caldera</i>	2	1	10,0		10,0		10,0			10,0			10,0		
<i>Bba. circulació A.D. Caldera</i>	2	1	4,6	4,6			4,6			4,6			4,6		
<i>Generador A.D.</i>	1	1	2,0	2,0											
<i>Bomba A.S. generador A.D.</i>	1	1	11,5	11,5											
<i>Viscosímetre</i>	1	1	0,5	0,5			0,5			0,5			0,5		
<i>Bba. alim. A.D. Economitzador</i>	2	1	10,0	10,0											
TOTAL				28,6	10,0	0,0	15,8	2,4	0,0	15,8	2,4	0,0	15,8	2,4	0,0
Seguretat i Manten. Càrrega															
<i>Grua manifold</i>	2	1	23,4								23,4			23,4	
<i>Grua de popa</i>	1	1	4,9									4,9			4,9
<i>Unitats hidràuliques escotilles</i>	2	1	8,0								8,0			8,0	
<i>Generador Gas Inert</i>	1	1	335,0							335,0			335,0		
<i>Bba. C.I. Emergencia</i>	1	1	37,8			37,8			37,8			37,8			37,8
<i>Bba. Sentines</i>	2	1	92,7			92,7			92,7			92,7			92,7
<i>Separador de sentines</i>	1	1	5,0			5,0			5,0						
<i>Bba. Llast</i>	2	2	258,0							516,0			258,0		



TOTAL				0,0	0,0	135,5	0,0	0,0	135,5	851,0	31,4	135,4	593,0	31,4	134,5
Consumidors	Dades del consumidor			Navegació			Maniobra			Port carregant			Port descarregant		
	N	S	kW	Cont.	Per.	Even.	Cont.	Per.	Even.	Cont.	Per.	Even.	Cont.	Per.	Even.
Aire Condicionat i Ventilació															
<i>Ventil./Extractor Habilitació</i>	9	5	2,0	10,0			10,0			10,0			10,0		
<i>Ventiladors Aire Condicionat</i>	2	2	7,8	15,6			15,6			15,6			15,6		
<i>Compressor Aire Condicionat</i>	2	1	20,7	20,7			20,7			20,7			20,7		
<i>Unitat control Aire Condic.</i>	1	1	12,3	12,3			12,3			12,3			12,3		
<i>Ventil./Extractor Túnel Quilla</i>	1	1	31,5			31,5			31,5			31,5			31,5
<i>Ventil./Extrac. Sala Màquines</i>	4	4	19,0	76,0			76,0			38,0			38,0		
<i>Vent./Extrc. Sala Purificadores</i>	2	2	6,0	12,0			12,0			6,0			6,0		
<i>Ventiladors auxiliars</i>	3	2	1,5		3,0			3,0			3,0			3,0	
<i>Ventilador Local Servotimó</i>	1	1	1,9	1,9			1,9			1,9			1,9		
TOTAL				148,5	3,0	31,5	148,5	3,0	31,5	102,6	4,9	31,5	102,6	4,9	31,5
Taller i Manteniment															
<i>Compressor Aire Treball</i>	1	1	31,0			31,0			31,0			31,0			31,0
<i>Torn</i>	1	1	4,0			4,0			4,0			4,0			4,0
<i>Trepant</i>	1	1	1,0			1,0			1,0			1,0			1,0
<i>Esmeriladora/Raspall</i>	1	1	2,0			2,0			2,0			2,0			2,0
<i>Fresadora</i>	1	1	4,0			4,0			4,0			4,0			4,0
<i>Equip de Soldadura</i>	1	1	8,0			8,0									
<i>Grua pont Sala Màquines</i>	1	1	6,0			6,0						6,0			6,0
TOTAL				0,0	0,0	56,0	0,0	0,0	42,0	0,0	0,0	48,0	0,0	0,0	48,0
Habilitació i Cuina															
<i>Cuina, cabines i espai comú</i>	1	1	16,6		16,6			16,6			16,6			16,6	
<i>Bugaderia</i>	4	4	5		20,0			20,0			20,0				20,0



<i>Càmeres Frigorífiques</i>	3	2	9,0		9,0			9,0			9,0			9,0	
<i>Incinerador</i>	1	1	4,5			4,5			4,5						
<i>Bba. circulació Frigorífiques</i>	2	1	1,5	1,5			1,5			1,5			1,5		
<i>Bba. Aigua sanitària</i>	2	1	9,0			9,0			9,0			9,0			9,0
<i>Bba. Aigua Calenta Sanitaria</i>	1	1	3,0	3,0			3,0			3,0			3,0		
<i>Potabilitzador</i>	1	1	0,5		0,5			0,5			0,5			0,5	
<i>Planta sèptica</i>	1	1	2,7	2,7			2,7								
TOTAL				7,2	46,1	13,5	7,2	46,1	13,5	4,5	26,1	29,0	4,5	26,1	29,0
Consumidors	Dades del consumidor			Navegació			Maniobra			Port carregant			Port descarregant		
	<i>N</i>	<i>S</i>	<i>kW</i>	<i>Cont.</i>	<i>Per.</i>	<i>Even.</i>	<i>Cont.</i>	<i>Per.</i>	<i>Even.</i>	<i>Cont.</i>	<i>Per.</i>	<i>Even.</i>	<i>Cont.</i>	<i>Per.</i>	<i>Even.</i>
Govern i Maniobra															
<i>Unit. Hidràulics. d'amarratge</i>	6	3	72,0				216,0					216,0			216,0
<i>Bomba Hidràulica Servotimó</i>	2	1	31,5	31,5			63,0								
TOTAL				31,5	0,0	0,0	279,0	0,0	0,0	0,0	0,0	216,0	0,0	0,0	216,0
Navegació i Comunicació															
<i>Estació de radio</i>	1	1	3,0			3,0			3,0			3,0			3,0
<i>Radar</i>	2	2	2	4			4								
<i>Sistema via Satèl·lit</i>	2	1	0,5	0,5			0,5				0,5			0,5	
<i>Sirena</i>	1	1	6,5			6,5		6,5							
TOTAL				4,5	0,0	9,5	4,5	6,5	3,0	0,0	0,5	3,0	0,0	0,5	3,0
Consumidors 220V															
<i>Oficina de càrrega i d'altres</i>	2	2	3,0			6,0			6,0	6,0			6,0		
<i>Font d'Aigua freda</i>	3	3	0,3			0,9			0,9			0,9			0,9
<i>Panell Control de Màquines</i>	1	1	4,0	4,0			4,0			4,0			4,0		
<i>Panell Control de pont</i>	1	1	4,0	4,0			4,0			4,0			4,0		
<i>Far de coberta</i>			18,0		18			18			18			18	



Consumidors	Dades del consumidor			Navegació			Maniobra			Port carregant			Port descarregant		
	N	S	kW	Cont.	Per.	Even.	Cont.	Per.	Even.	Cont.	Per.	Even.	Cont.	Per.	Even.
Far de señals	1	1	2,0			2,0		2,0			2,0			2,0	
Enllumenat Sala de Màquines			27,0	27,0			27,0			27,0			27,0		
Enllumenat Emergència S.M.			7,0	7,0			7,0			7,0			7,0		
Enllumenat Exterior			7,0		7,0			7,0			7,0			7,0	
Enllumenat Ext. Emergència			1,0		1,0			1,0			1,0			1,0	
Enllumenat Habilitació			30,0	30,0			30,0			30,0			30,0		
Enllumenat Habil. emergència			8,0		8,0			8,0			8,0			8,0	
Telèfon automàtic	1	1	0,5		0,5			0,5			0,5			0,5	
Giroscopi i Giropilot	1	1	0,5	0,5			0,5			0,5			0,5		
Corredera	1	1	0,3	0,3			0,3								
Ecosonda	1	1	0,4	0,4			0,4								
Enllumenat de navegació			1,0	1,0			1,0			1,0			1,0		
TOTAL				74,2	34,5	8,9	74,2	36,5	6,0	87,5	28,5	0,9	87,5	28,5	0,9
Planta Propulsora				359,3	35	25	512,3	70	5	48,7	35	24,5	48,7	35	24,6
Combustible/Purificació/O.L.				40,5	0,0	13,8	40,5	0,0	13,8	37,5	1,8	13,8	37,5	1,8	13,8
Calderes i Generador A.D.				28,6	10,0	0,0	15,8	2,4	0,0	15,8	2,4	0,0	15,8	2,4	0,0
Seguretat i Maneig Càrrega				0,0	0,0	135,5	0,0	0,0	135,5	851,0	31,4	135,4	593,0	31,4	134,5
Aire Condicionat i Ventilació				148,5	3,0	31,5	148,5	3,0	31,5	102,6	4,9	31,5	102,6	4,9	31,5
Taller i Manteniment				0,0	0,0	56,0	0,0	0,0	42,0	0,0	0,0	48,0	0,0	0,0	48,0
Habilitació i Cuina				7,2	46,1	13,5	7,2	46,1	13,5	4,5	26,1	29,0	4,5	26,1	29,0
Govern i Maniobra				31,5	0,0	0,0	279,0	0,0	0,0	0,0	0,0	216,0	0,0	0,0	216,0
Navegació i Comunicació				4,5	0,0	9,5	4,5	6,5	3,0	0,0	0,5	3,0	0,0	0,5	3,0
Consumidors 220V				74,2	34,5	8,9	74,2	36,5	6,0	87,5	28,5	0,9	87,5	28,5	0,9
TOTAL				694,3	128,6	293,7	1.082	164,5	250,3	1.148	130,6	502,1	889,6	130,6	501,3

· Taula 31: Balanç elèctric del vaixell amb els elements dimensionats, estimats i extrapolats.



Una vegada realitzat el balanç elèctric amb tots els elements dimensionats i la resta d'elements extrapolats o estimats, es realitzarà el càlcul de la potència total necessària per cada situació operacional del vaixell. Aquest càlcul es realitzarà aplicant el coeficient de simultaneïtat per cada categoria de consumidors, tal i com s'ha indicat anteriorment, quedant la següent expressió:

$$P_T = \sum P_C + \sum P_P \cdot 0,5 + \sum P_E \cdot 0,25$$

On:

P_T : és la potència total necessària en cada situació de càrrega

P_C : és la potència de consumidors de categoria de càrrega contínua

P_P : és la potència de consumidors de categoria de càrrega periòdica

P_E : és la potència de consumidors de categoria de càrrega eventual

Situacions Operacionals	kW per Categoria de consumidors			Total kW
	Contínua	Periòdica	Eventual	
Navegació	694,3	128,6	293,7	831,9
Maniobra	1.082	164,5	250,3	1.226,8
Port carregant	1.147,6	130,6	502,1	1.338,4
Port descarregant	889,6	130,6	501,3	1.080,2

· Taula 32: Resum del Balanç elèctric del vaixell.



6.2. Selecció i determinació del nombre i capacitat dels generadors

Una vegada obtinguda la potència màxima de cada situació d'operació del vaixell, és necessari determinar la capacitat dels motors auxiliars i alternadors, així com el nombre d'unitats que s'hauran d'instal·lar per tal de garantir totes les situacions de càrrega calculades anteriorment. S'han de complir també tots els requeriments de la Societat de Classificació així com les següents especificacions de disseny:

- Si s'instal·len varis generadors diferents per atendre a les diferents situacions de consum, el sistema tindrà una gran flexibilitat i alt rendiment, no obstant s'incrementaran els costos d'instal·lació i manteniment, augmentant també el nombre de recanvis que s'hauran de tenir en estoc al magatzem.
- Si s'instal·la un únic generador en condicions de càrrega mínima el seu rendiment serà molt baix.
- Si s'instal·len varis generadors iguals, el nombre de recanvis necessaris serà menor, però pot donar-se el cas que el rendiment global del sistema sigui inferior en segons quines condicions de càrrega.
- El sistema ha de ser capaç de respondre davant la caiguda de un generador, això implicarà tenir un generador en situació de reserva per la possible caiguda de un dels altres.
- És important preveure un marge de seguretat per tal de preveure l'envelliment dels consumidors, que habitualment farà incrementar el seu consum elèctric. A part cal tenir en compte que durant la vida útil del vaixell el nombre de consumidors pot anar en augment.
- La potència total necessària no ha de ser excessivament superior a la potència corresponent a la situació de major demanda d'energia elèctrica, ja que com s'ha especificat anteriorment s'intentarà donar la demanda suficient de potència amb el mínim cost de combustible, equips necessaris, pes i demés paràmetres que puguin augmentar els costos d'explotació del petrolier.

Seguint les especificacions anteriors i havent calculat les diverses potències en cada situació operacional del vaixell, s'ha seleccionat un conjunt de motor auxiliar i generador habitualment instal·lat en vaixells de similars característiques. S'opta per una planta de generació elèctrica formada per tres motors de 800 kW cada un que subministren una potència elèctrica nominal de sortida de 760 kW cada grup generador.

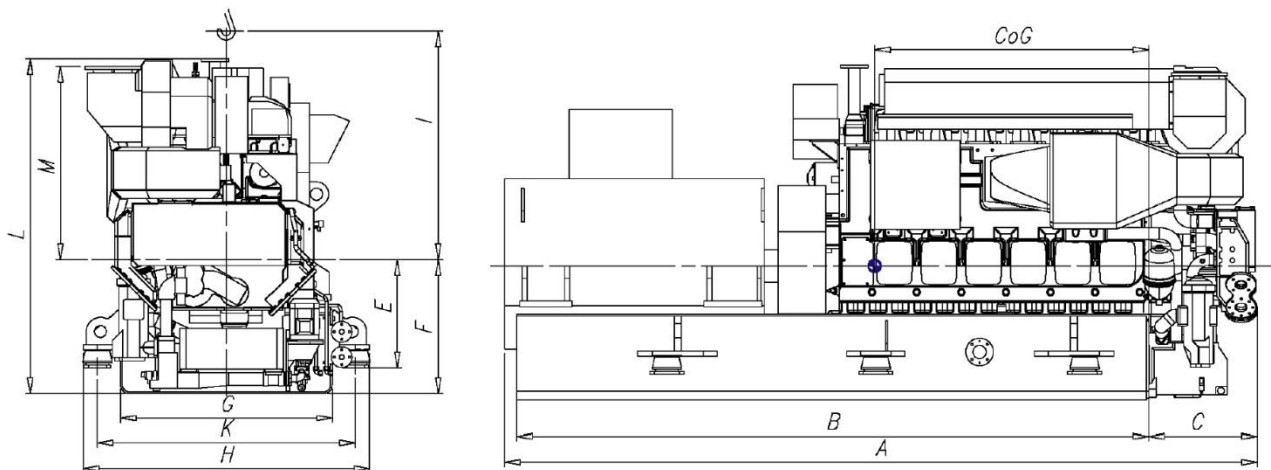


S'ha seleccionat aquest grup de tres generadors tenint en compte les consideracions de disseny anteriorment exposades, establint que el percentatge de càrrega de cada grup generador per cada situació d'operació del vaixell no superarà el 90% de la seva capacitat nominal. En la següent taula es mostren els generadors en servei i en reserva per cada situació d'operació així com la càrrega de cada generador en funcionament. En aquest cas sempre hi haurà dos generadors en funcionament i un en reserva a no ser que en una situació concreta es pugui donar el servei elèctric amb un únic generador.

Situacions Operacionals	Total kW	Generadors			
		En servei	Total kW	% càrrega	En Stand-by
Navegació	831,9	2	1.520	54,67	1
Maniobra	1.226,8	2	1.520	80,71	1
Port carregant	1.338,4	2	1.520	88,05	1
Port descarregant	1.080,2	2	1.520	71,06	1

· Taula 33: Nombre de generadors funcionant en cada situació d'operació i la seva càrrega.

El conjunt de tres motors auxiliars més alternadors seleccionats són del fabricant **Wärtsilä** model **760W6L20**. És un motor quatre temps de sis cilindre en línia i rotació horària del cigonyal. Compleix amb la normativa IMO Tier 2, que fa referència a les emissions de NOx a l'atmosfera. El fabricant **Wärtsilä** comercialitza aquest motor juntament amb l'alternador del fabricant Fenxi. Té un pes en sec de 16,7 t. Les seves característiques són les següents.



· Imatge 35: Perfil i Alçat amb les cotes principals del 760W6L20. (Wärtsilä)

WÄRTSILÄ 760W6L20	A	B	C	E	F	G	H	I	K	L
Longitud [mm]	5.062	4.250	732	725	900	1.420	1.920	1.800	1.730	2.248

· Taula 34: Dimensions principals del 760W6L20. (Wärtsilä)



WÄRTSILÄ 760W6L20	Unitats	100% MCR
Potència de sortida del Motor	kW	800
Velocitat del Motor	rpm	900
Pressió mitja efectiva	MPa	100%
Sistema d'aire de combustió		
Cabal d'aire al 100% de càrrega	kg/s	1,68
Temperatura màx. entrada al compressor	°C	45
Temperatura després del refredador d'aire	°C	50-70
Sistema d'exhaustió		
Cabal de gasos al 100% de càrrega	kg/s	1,72
Temperatura després del turbocompressor	°C	322
Pèrdua de pressió màxima	kPa	3,0
Diàmetre del conducte d'exhaustió a 35 m/s	mm	324
Balanç tèrmic al 100% de càrrega		
Aigua de camises	kW	192
Aire de càrrega	kW	197
Oli lubricant	kW	138
Radiació, etc.	kW	45
Sistema de Fuel-oil		
Pressió abans de les bombes d'injecció	kPa	700 ± 50
Viscositat del HFO abans de les bbs. d'injecció	cSt	16 - 24
Màxima temperatura del HFO abans del motor	°C	140
Consum de fuel-oil al 100% de càrrega	g/kWh	193
Quantitat neta de fugues de HFO al 100%	kg/h	3,2
Sistema de Lubrificació		
Pressió abans del motor	kPa	450
Pressió nominal d'inici	kPa	80
Temperatura abans del coixinets	°C	66
Temperatura després del motor	°C	78
Capacitat de la bomba acoblada	m ³ /h	32
Capacitat de la bomba d'inici	m ³ /h	10,5
Volum d'oli lubricant	m ³	0,76
Finesa del filtre, mida de malla	µm	25
Consum d'oli lubricant al 100%	g/kWh	0,5
Cabal de ventilació del càrter	l/min/cil	130
Contrapressió màxima de ventilació del càrter	kPa	0,3
Sistema de refrigeració d'aigua A.T.		
Pressió màxima al motor després de la bomba	kPa	500
Temperatura abans dels cilindres	°C	83
Temperatura després del motor	°C	91
Capacitat de la bomba acoblada	m ³ /h	29,0
Pèrdua de pressió en el motor	kPa	90
Pèrdua de pressió màxima del sistema exterior	kPa	120



Pressió del tanc d'expansió	kPa	70 – 150
Volum d'aigua del motor	m ³	0,105
Sistema de refrigeració d'aigua B.T.		
Pressió màxima al motor després de la bomba	kPa	500
Temperatura abans del motor	°C	25-38
Capacitat de la bomba acoblada	m ³ /h	34,0
Pèrdua de pressió refredador d'aire de càrrega	kPa	30
Pèrdua de pressió a la vàlvula termostàtica	kPa	30
Pèrdua de pressió al refredador d'oli lubricant	kPa	30
Pèrdua de pressió màxima en el sistema extern	kPa	120
Pressió del tanc d'expansió	kPa	70 - 150
Sistema d'aire de posta en marxa		
Pressió nominal	kPa	3000
Pressió màxima	kPa	3000
Pressió mínima	kPa	1800
Consum d'aire de posta en marxa	Nm ³	1,2
Especificacions de l'Alternador		
Marca de l'alternador		Fenxi
Freqüència	Hz	60
Sortida nominal	kVa	950
Tensió	V	450
Corrent nominal	A	1.219
Factor de potència		0,8
Classe d'aïllament		F
Dissipació de calor del refrigerador d'aire	kW	46

· Taula 35: Característiques principals i capacitats del 760W6L20. (Wärtsilä)



6.3. Selecció i determinació del generador d'emergència

Una vegada determinada la potència necessària per donar servei a tots els elements i sistemes del vaixell, és necessari determinar el motor i l'alternador que en cas de caiguda completa de tots els generadors auxiliars, dimensionats i seleccionats anteriorment, l'anomenada caiguda de planta, ens permeti aixecar-la de nou garantint el subministrament de potència a aquells equips necessaris per portar a terme aquesta operació.

La manca absoluta d'energia subministrada pel grup de generadors principal, pot suposar una situació de greus conseqüències en determinades operacions del vaixell com la maniobra o durant una càrrega o descàrrega del combustible emmagatzemat als tancs de càrrega. És per això que es fa del tot indispensable comptar amb un generador d'emergència a bord per poder alimentar el serveis mínims que la Societat de Classificació considera que han de seguir funcionant en aquesta situació de caiguda de planta per tal de restablir la operació normal del vaixell.

Aquest generador d'emergència haurà de ser capaç de posar-se en marxa encara que el vaixell no estigui en condicions de navegabilitat, com per exemple en una drassana, i haurà de poder subministrar l'energia necessària per donar servei als serveis d'emergència i essencials.

Els anomenats serveis d'emergència o serveis essencials, són aquells vitals pel manteniment de les condicions de maniobrabilitat, propulsió, seguretat dels tripulants així com també un manteniment mínim d'habitabilitat y conservació de la càrrega. En els serveis d'emergència s'inclouran tots aquells consumidors que han de funcionar en una situació d'emergència.

De la mateixa manera que s'ha realitzat un balanç elèctric per determinar la potència i el nombre dels generadors principal, també es realitzarà un balanç elèctric per tal de seleccionar el generador d'emergència més adequat per les necessitats del vaixell en qüestió. Aquest balanç elèctric inclourà els consumidors corresponents als serveis mínims exigits per la Societat de Classificació. El procediment de realització del balanç elèctric dels serveis essencials i d'emergència serà igual que el realitzat pels generadors principals. La única diferència que hi haurà en la realització del balanç elèctric d'emergència és que la única situació operacional contemplada serà la situació d'emergència, amb únicament els equips i elements necessaris per aquesta situació.

Aquest generador d'emergència podrà, en cas de necessitat, acoblar-se a la xarxa elèctrica principal per complementar, en situacions de caiguda de dos generadors principals, a un únic generador principal en funcionament. Així el generador d'emergència aportarà versatilitat i seguretat al sistema de subministrament elèctric del vaixell.



Servei	Consumidors	Dades del consumidor			Emergència		
		N	S	kW	Cont.	Per.	Even.
Planta propulsora	Compressor principal	2	2	35,0			70,0
Seguretat i manteniment de la càrrega	Bomba C.I. Emergència	1	1	37,8			37,8
	Bomba de Sentines	2	1	92,7			92,7
	Separador de Sentines	1	1	5,0			5,0
	Bomba de Llast	2	1	258,0			258,0
Aire condicionat i ventilació	Ventilador/Extractor S.M.	4	4	19,0	38,0		
	Ventilador Local Servo	1	1	1,9	1,9		
Govern i maniobra	Bba. hidràulica Servotimó	2	1	31,5	31,5		
Navegació i comunicació	Estació de radio	1	1	3,0			3,0
	Radar	2	2	2,0	4		
	Sistema via satèl·lit	2	1	0,5	0,5		
	Sirena	1	1	6,5	0,5		6,5
Consumidors 220 V	Far de coberta			18,0		18,0	
	Far de senyals	1	1	2,0		2,0	
	Enllumenat Sala Màquines			27,0	27,0		
	Enllumenat Emerg. S.M.			7,0	7,0		
	Enllumenat Exterior			7,0	7,0		
	Enllumenat Emerg. Ext.			1,0	1,0		
	Enllumenat Habilitació			30,0	30,0		
	Enllumenat Emerg. Habilit.			8,0	8,0		
	Enllumenat de Navegació			1,0		1,0	
	Giroscopi i Giropilot	1	1	0,5	0,5		
	Ecosonda	1	1	0,4	0,4		
	Navegació per satèl·lit	1	1	0,2	0,2		
	Sistemes de comunicació	1	1	0,5			0,5
	Panell control Sala Màq.	1	1	4,0	4,0		
	Panell control Pont	1	1	4,0	4,0		
TOTAL					165,5	21,0	473,5

· Taula 36: Balanç elèctric d'emergència amb els elements dimensionats, estimats i extrapolats

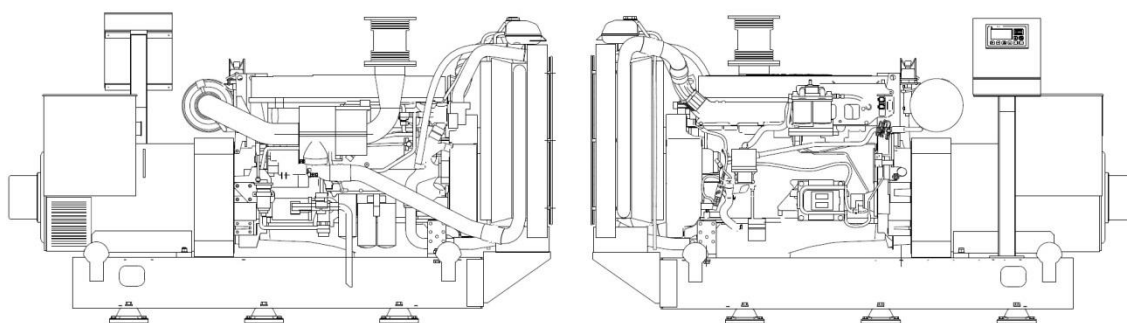
De la mateixa forma que s'ha calculat la potència total necessària en el balanç elèctric principal es calcularà la potència necessària en la situació d'emergència amb la següent expressió:

$$P_T = \sum P_C + \sum P_P \cdot 0,5 + \sum P_E \cdot 0,25$$

$$P_T = 165,5 + 21 \cdot 0,5 + 473,5 \cdot 0,25 = 294,38 \text{ kW}$$



S'haurà de seleccionar per tant un generador d'emergència amb una potència elèctrica de sortida superior a 294,38 kWe. S'estableix a l'igual que en el cas dels generadors principals, que el percentatge de càrrega del grup generador per la situació d'emergència no superarà el 90% de la seva capacitat nominal. Comparant diverses opcions en el mercat s'opta per instal·lar un conjunt de motor més generador del fabricant **VOLVO PENTA** de la sèrie **D13MG** model **HCM534D-1**. És un generador autònom refrigerat per aigua refrigerada per un ventilador acoblat al motor per tal de garantir el servei de refrigeració completament independent. La potència nominal de sortida és de 360 kWe. La potència total demandada pels consumidors en la situació d'emergència suposa un 81,7% de la capacitat nominal del generador seleccionat. Es tracta d'un motor quatre temps dièsel de sis cilindre en línia, d'injecció directa, sobrealimentat amb refrigeració de l'aire d'alimentació. Les característiques del generador són les següents.



· Imatge 35: Dos perfils del generador d'emergència VOLVO PENTA D13MG HCM534D-1.

VOLVO PENTA D13MG HCM534D-1	Unitats	100% MCR
Potència de sortida del Motor	kW	381
Velocitat del Motor	rpm	1.800
Pes	kg	3.315
Volum per cilindre	l	12,78
Consum específic de combustible	g/kWh	209
Relació de compressió		18,5
Freqüència elèctrica	Hz	60
Tensió de sortida de l'alternador	V	440
Potència de sortida de l'alternador	kWe	360
Factor de potència		0,8

· Taula 37: Característiques principals i capacitats del D13MG HCM534D-1. (Volvo Penta)



7. Conclusions

En aquest projecte es planteja el dimensionament i determinació de la planta propulsora i els sistemes auxiliars a la propulsió necessaris, per un petrolier de 100.000 tones de pes mort.

L'objectiu ha estat fer una primera aproximació dels passos necessaris per arribar a la selecció d'un motor principal amb una potència suficient per explotar el vaixell, amb les característiques imposades en l'apartat de dades preliminars del projecte, a partir de l'aproximació realitzada amb la fórmula empírica de *l'almirallat*, que ha donat un ordre de magnitud de la potència necessària bastant fidedigne, comparant amb potències instal·lades en vaixells d'iguals característiques.

S'ha fet una distribució dels elements principals a la sala de màquines, calculant les dimensions bàsiques de l'espai de màquines com l'eslora, màniga, puntal i alçada del doble fons.

Amb la potència propulsora calculada, s'ha procedit a la selecció del motor que més s'ajusta a la potència trobada disponible en el mercat, amb els paràmetres de consum òptims, i acompliments de normatives de contaminació més recents. S'ha seleccionat un model del fabricant *MAN B&W* a partir del qual s'ha pogut continuar amb el disseny i determinació dels elements de tots els sistemes auxiliars a la propulsió necessaris pel funcionament de la planta propulsora.

S'ha fet un primer dimensionament del nombre i potència dels motors auxiliars, a partir d'extrapolacions d'altres vaixells similars, per tal d'obtenir els paràmetres de funcionament per continuar amb el disseny dels sistemes auxiliars.

S'han desenvolupat els sistemes de combustible, lubricació, refrigeració, aire comprimit, exhaustació i generació de vapor. En cadascun d'aquests sistemes s'han calculat i dimensionat els elements necessaris pel correcte funcionament, a més s'ha realitzat una recerca, entre diversos fabricants, de l'element òptim a instal·lar, seleccionant diversos equips com bombes, intercanviadors de calor, filtres, generadors de vapor etc.

S'han calculat les diverses capacitats dels tancs de combustible i oli lubricant necessaris pel funcionament de tots els motors, seguint les recomanacions del fabricant del motor principal i dels motors auxiliars, juntament amb les indicacions i regulacions recollides en les normatives de la Societat de Classificació, American Bureau of Shipping, i les normatives referents a seguretat i contaminació presents en el MARPOL i el SOLAS.



S'ha realitzat el balanç elèctric per tal de determinar la potència i nombre de generadors auxiliars necessaris per donar el subministrament elèctric a tots els serveis i elements, no tant sols de la sala de màquines, si no també de tot el vaixell. La manca del dimensionament d'altres sistemes auxiliars i elements obviats en algun punt del treball per facilitar el desenvolupament del projecte, que no estan directament relacionats amb la planta propulsora, resten un punt de precisió a la hora de comptabilitzar-los en el balanç elèctric.

Tot i les possibles mancances, l'estudi d'un projecte com aquest m'ha permès entendre més en detall el disseny dels diferents sistemes i serveis que conformen la sala de màquines d'un petrolier, així com la selecció i càlcul dels seus elements i equips, no obstant en certs aspectes es podrien realitzar futures millores per assolir resultats més exactes.



8. Bibliografia

- I. Grau R, Rodríguez M. *Apunts de l'assignatura "Manteniment i sistemes auxiliars del vaixell"*, Facultat de Nàutica de Barcelona, Curs 2010.
- II. Prada A. *Apunts de l'assignatura "Construcció Naval i Propulsors"*, Facultat de Nàutica de Barcelona, Curs 2009.
- III. Alvariño R, Azpiroz JJ, Meizoso MA. *El proyecto básico del buque mercante*, Fondo ingenieros navales, 1997.
- IV. Junco Ocampo F. 4ª Edició, *Proyectos de buques y artefactos*, UDC, 2007.
- V. MAN Diesel & Turbo. 6ª Edició, *Guia de projecte del motor principal*, 2009.
- VI. Organització Marítima Internacional. *Conveni MARPOL 73/78*, Edició 2002.
- VII. Organització Marítima Internacional. 5ª Edició, *Conveni SOLAS 74*, 2009.
- VIII. Organització Marítima Internacional. *Specialized training for Oil tankers, Oil tankers design and equipment*.
- IX. American Bureau of Shipping. *Rules for the classification of steel Ships*, 2007.
- X. Wärtsilä. *Guia de projecte motors auxiliars*, 2011.
- XI. Volvo Penta. *Catàleg Marine Genset D13MG*, 2012.