

Anàlisi del consum de combustible i emissions de sofre en un vaixell de cabotatge que consumeixi Fuel-Oil. Comparació de les possibles solucions per a les emissions

Projecte Final de Grau



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Treball realitzat per:
Sergi Bonet Ferré

Dirigit per:
Ramon Grau Mur

Grau en Enginyeria en Sistemes i Tecnologies Navals

Barcelona, 4/10/2016

Departament de Ciències i Enginyeria Nàutiques



Sergi Bonet Ferré
GESTN



Resum

L'objectiu d'aquest treball és aprofundir en el coneixement d'un motor marí real cremant fuel-oil, les normatives que els regeixen i calcular les principals característiques d'aquest referents a la generació de gasos d'escapament. Realitzar un estudi sobre l'abocament del diòxid de sofre a l'atmosfera provocat per la combustió de combustibles fòssils, les normatives que ho regulen, dimensionament d'aquests i les repercussions que aquest té sobre el medi ambient, la naturalesa i les persones. Un cop aquests factors són conegut amb claredat, trobar les principals solucions que existeixen en l'actualitat per a resoldre o minimitzar aquest problema.

L'estructura del treball ha seguit un ordre lògic on s'ha estudiat des del punt més bàsic i general i s'ha anat aprofundint. Inicialment es presenta l'embarcació del treball i poc a poc es va concretant en tots els temes relacionats per a acabar descrivint els principals mètodes per reduir les emissions de sofre a l'atmosfera i proposant una solució real.



Taula de continguts

Resum	III
Taula de continguts	IV
Llistat de figures	VI
Llistat de taules	VIII
1.Introducció	1
2.Objectiu del treball	4
3.Metodologia	6
4.Embarcació model del treball.....	8
5.Sistemes de propulsió.....	11
5.1 . Història dels MCI marins.....	11
5.2.Classificació dels MCI.....	11
5.3.MCI marins en l'actualitat.....	14
5.4. Categories de MCI marins i normatives vigents en quant emissions	16
5.5. Motor de l'embarcació del treball.....	22
6. Comerç marítim.....	28
6.1. Cabotatge: definició i explicació de les principals rutes.....	28
6.2. Normativa SOLAS, ISO i normativa pròpia espanyola.....	29
7. Combustibles marins: evolució, composició, ús i tractaments.....	35
7.1. Història i evolució dels combustibles.....	35
7.2. Enumeració i descripció dels principals combustibles marins	39
8. Procés de combustió d'un combustible marí.....	48
9. El sofre.....	54
10. El sofre als combustibles marins.....	56
10.1 Normativa referent a les emissions de sofre en embarcacions de cabotatge.....	57
11.Repercussions de l'ús del sofre als combustibles marins i presentació del problema.....	63



12. Càlculs i dimensionament dels gasos d'escapament del motor del treball ...	64
12.1 Càlcul del caudal de gasos d'escapament.....	64
12.2 Càlcul de la temperatura dels gasos d'escapament.....	67
13. Solucions possibles per a l'emissió de sofre	69
13.1. Dièsel amb baix contingut de sofre	69
13.2. Scrubber” o rentador de gasos d'escapament	70
13.2.1. “Scrubber” de tipus sec.....	72
13.2.1.1. Per injecció de material sorbent sec	73
13.2.1.2. Per absorbidors secs.....	73
13.2.1.3. Avantatges.....	73
13.2.2. “Scrubber” de tipus humit.....	75
13.2.2.1. “Scrubber” tipus circuit obert.....	75
13.2.2.2. “Scrubber” tipus circuit tancat.....	76
13.2.2.3. “Scrubber” tipus circuit híbrid.....	78
13.2.2.4. Avantatges.....	78
13.2.3. Elecció d'un equip rentador per a l'embarcació del treball.....	78
14. Conclusió.....	81
15. Webografia.....	83



Llistat de figures

Figura 1: Classificació dels portacontenidors en funció de l'eslora.....	9
Figura 2: Vista del mirall de popa de l'embarcació del treball.....	10
Figura 3: Motor marí de creueta.....	16
Figura 4: Gràfic de la base de dades.....	24
Figura 5: Principals dimensions del motor de l'embarcació	26
Figura 6: Gràfic de potències del motor seleccionat.....	27
Figura 7: Senyal de càrrega de Fuel Oil tipus 3.....	40
Figura 8: MCI 2 temps i gasolina.....	48
Figura 9: MCI 2 temps dièsel.....	50
Figura 10: Configuració electrònica del sofre.....	54
Figura 11: Sofre en estat rocós.....	54
Figura 12: Pneumàtic fet de cautxú.....	55
Figura 13: Pólvora.....	55
Figura 14: Equació de massa dels gasos d'escapament.....	64
Figura 15: Equació de la variació de massa de gasos d'escapament.....	65
Figura 16: Equació de la variació de la massa dels gasos d'escapament amb els paràmetres ISO.....	65
Figura 17: Gràfic càrrega del motor vs massa de gasos d'escapament.....	66
Figura 18: : Equació de temperatura de sortida dels gasos d'escapament.....	67
Figura 19: Equació diferència de temperatura dels gasos d'escapament amb el punt nominal.....	67
Figura 20: Equació diferència de temperatura real respecte les condicions ISO.....	67
Figura 21: Gràfica càrrega del motor vs diferència de temperatura.....	68
Figura 22: Esquema detallat simplificat d'un rentador.....	71



Figura 23: Localització del scrubber respecte l'embarcació.....	71
Figura 24: Procés d'instal·lació d'un "scrubber" en una embarcació.....	72
Figura 25: Representació d'un rentador de tipus sec a bord.....	74
Figura 26: Imatge real d'un rentador instal·lat a un buc.....	74
Figura 27: Il·lustració del circuit d'un rentador de tipus de circuit obert.....	75
Figura 28: Esquema del circuit d'un rentador de tipus tancat.....	77
Figura 29: Imatge del model Pure SO _x I Line.....	80



Llistat de taules

Taula 1: Taula de categories dels MCI.....	17
Taula 2: MCI de categoria 1 i 2	19
Taula 3: Factors d'emissió de gasos de motors de categoria 1 i 2	20
Taula 4: MCI categoria 3	21
Taula 5: Base de dades d'embarcacions semblants a la del treball.....	23
Taula 6: Base de dades reduïda.....	23
Taula 7:Taula de requisits per al fuel-oil destil·lat.....	42
Taula 8: Taula de requisits per al fuel-oil residual.....	46
Taula 9: Quadre de relació entre la quantitat de combustible del motor i l'eficiència que ha de tenir el rentador.....	79



1. Introducció

Des de fa anys, el mar ha estat un recurs a l'hora de trobar beneficis econòmics, un medi de transport, plaer, aventura, esport i un espai de calma. Des del seu origen més primari, el mar ha estat un espai sobre el qual s'ha efectuat el transport de mercaderies, persones i qualsevol tipus d'objecte que pogués ser transportat. La navegació és una de les ciències més antigues que es coneixen i una en la que més s'ha investigat i de les que més es coneix. Ja les cultures romanes, gregues i fenícies van desenvolupar grans dictats i principis d'enginyeria naval i nàutica per poder conèixer millor què passava en les seves embarcacions i com condicionar-les per obtenir un millor rendiment d'elles i aprendre a maniobrar-les de la millor manera. Gràcies a aquesta insistència a l'hora d'estudiar el mar i el seu comportament, dites civilitzacions van aconseguir tenir unes flotes de gran nombre i qualitat que els va permetre crear rutes comercials a terres llunyanes on podien aconseguir béns que d'altre manera seria més difícil d'obtenir. També, l'estudi de totes les embarcacions i els seus comportaments va donar origen als conflictes bèl·lics al mar. Les naus més resistents, amb més maniobrabilitat i que suportaven càrregues majors, eren les que vencien contra altres naus més dèbils. Podríem dir, que gràcies al mar i a les embarcacions, coneixem en gran part el present que vivim.

Amb el pas del temps, les civilitzacions han anat canviant i evolucionant i amb elles, les embarcacions i el món nàutic. Cada embarcació ha tingut unes influències típiques de la seva civilització o de les condicions en les que havia de treballar i el propòsit pel qual es construïen. Així, les naus gregues, romanes i de qualsevol civilització que tingues costes al Mediterrani, tenia embarcacions de línies fines i poc abruptes ja que estarien preparades per navegar en un mar tranquil, de poc vent i poc onatge. Pel contrari, les embarcacions del nord, les vikingues tenien uns dissenys amb línies més corbades. Més tard, en l'edat medieval, les embarcacions van prendre una gran importància, ja que els regnes que tenien una gran flota tenien la possibilitat d'exportar i importar productes amb altres països, aquests cada cop més llunyans. Així, a finals del segle XV, Cristòfol Colom va aconseguir convèncer la reina per a que el dotés de dues caravel·les i una nao i així poder anar a descobrir les Índies. Aquestes embarcacions no feien més de 30 metres però van aconseguir creuar l'Atlàntic, símptoma de que les naus estaven ben preparades i dissenyades. Gràcies a aquest nexa que es va establir entre la Península i Amèrica del Sud, Espanya va poder viure la seva època daurada durant més d'un segle. Aquest probablement, sigui un dels exemples més clars de la importància que ha tingut el mar i les embarcacions dins de la història de l'home. També cal tenir en compte que moltes de les investigacions en millorar les embarcacions van venir



motivades per l'afany guerrer i bèl·lic. . Per altra banda, recentment, s'ha estès l'ús de les embarcacions d'esbarjo. Aquesta modalitat de navegació només es donava en certes cultures antigues, però actualment és practicada a tot el món.

Tota aquesta evolució ens condueix fins al punt on ens trobem actualment, on existeixen tot tipus d'embarcacions. Aquestes embarcacions són les que han existit sempre, només que millorades i més específiques. Altres diferències que ens trobem en les embarcacions actuals respecte a les que existien en l'antiguitat és el volum de càrrega que són capaces de transportar.

En l'actualitat, la major part del volum d'embarcacions que naveguen pels mars del món ho fan amb l'objectiu de transportar mercaderies, de manera que gran part de la flota d'embarcacions construïda està dedicada al comerç.

L'evolució de la tecnologia, els coneixements i les necessitats ha fet que actualment existeixin gran varietat de bucs dedicats al comerç. La principal diferenciació que es fa en les càrregues que són transportades en bucs és tenint en compte el seu estat físic. Poden ser en estat sòlid, líquid o gasós. En funció de com es trobi cada càrrega, les embarcacions tindran una sèrie de característiques i propietats pròpies per poder assegurar l'estabilitat de la nau, la seguretat i qualsevol altra condició perillosa que es pugui donar.

Evidentment, aquestes embarcacions necessiten un mètode de propulsió per poder avançar. Actualment, la manera més estesa i quasi única a l'hora de propulsar les embarcacions de càrrega és mitjançant motors de combustió interna. Com en els automòbils, els motors poden ser de 2 temps o 4 temps i funcionar amb dièsel o gasolina. Actualment els motors més comuns són els dièsel de 2 temps amb creueta, encara que els de 4 temps segueixen sent vigents.

Aquesta política de cremar carburants és la que ha imperat durant els últims dos segles i que es va iniciar mitjançant les màquines de vapor que usaven el carbó per augmentar la temperatura de l'aigua. Més tard, es va implantar el consum d'hidrocarburs degut a les seves millors propietats i rendiment. Un dels grans inconvenients d'aquests combustibles d'origen mineral és el gran volum de sofre que és llançat a l'atmosfera quan són cremats.

Aquest serà el tema en el que es centrarà aquest treball. Es realitzarà un estudi on analitzarem el combustible que s'usa en un vaixell real de cabotatge per un motor de combustió interna de fuel-oil real, extraurem els resultats del gasos que són abocats a l'exterior, analitzarem la quantitat de sofre que conté, que és el principal component nociu, i plantejarem diferents solucions i alternatives per a que l'efecte que té aquest element al medi sigui el mínim. Tot això s'intentarà



fer sempre amb el major del rigor i veracitat i, apart, respectant totes les legislacions vigents referents.

L'objectiu és trobar un tractament pel combustible de manera que reduïm la quantitat de sofre que surt al realitzar la combustió o tractar els gasos d'escapament amb un "scrubber" de manera que els gasos finals injectats a l'atmosfera tenen una menor quantitat d'aquest element en el seu contingut.

En l'apartat següent es definiran i s'estudiaran més concretament els objectius i possibles solucions que podem extreure del plantejament del treball.



2. Objectius del treball

L'objectiu d'aquest treball és molt clar. Hi ha uns fets que actualment són totalment empírics com és que quan cremem fuel-oil per fer funcionar el motor de combustió interna d'una embarcació, aquesta genera uns gasos d'escapament amb alt contingut de sofre. Aquest sofre és altament nociu quan és llençat a l'aire ja que afecta de manera molt considerable a la salut del medi ambient. Una de les conseqüències més coneguda que provoca l'expulsió de sofre a l'aire és la pluja àcida. Aquesta pluja ve provocada perquè molts dels gasos que s'avoquen a l'atmosfera contenen elements químics que provoquen que al barrejar-se amb l'aigua que hi ha, aquesta es torni àcida i provoqui cremades i oxidació al tocar persones i objectes durant la seva precipitació. Per tractar d'evitar que això es produeixi, l'IMO (International Maritime Organization) ha establert una sèrie de límits i valors màxims de sofre abocat per embarcació que no es poden sobrepassar i que cada any s'intenta que es redueixin. La intenció és conscienciar als armadors de les embarcacions que el medi ambient s'ha de preservar i que el mar no és la deixalleria del món. Tot aquest procés és lent i costós ja que hi ha moltes embarcacions que tenen motors molt antics i que no és possible que s'adaptin a les noves normatives o és molt car. A tot això se li ha de sumar la falta de voluntat de gran part dels armadors a col·laborar, ja que aquesta adaptació de les embarcacions els hi costa molts diners, ja sigui pel cost de les modificacions a realitzar com en el temps que les embarcacions no estan en moviment degut a les mateixes. Per això, s'està sent molt estricte amb els vaixells de nova construcció, que ja tenen els motors i l'estructura preparada per a complir la normativa com està marcat.

Pels vaixells ja construïts s'estableixen una sèrie d'opcions de manera que s'acostin el màxim a complir la normativa establerta. Aquest és l'objectiu del treball, trobar les solucions més eficients i viables per a embarcacions ja construïdes per a fer que no sobrepassin els nivells establerts o almenys intentar reduir-los al màxim. Actualment es plantegen tres solucions possibles que enumerarem ara però que durant el transcurs del treball explicarem amb més detall i aprofundint més.

La primera opció és la de trobar un combustible que contingui un valor inferior en sofre de l'actual. Aquesta opció és la menys viable i la menys probable ja que actualment el petroli, les seves destil·lacions i els seus tractaments pertanyen a un monopoli format per unes poques empreses i que tenen tot el control sobre ell. Trobar un combustible amb menys contingut en sofre és un dels objectius de molts despatxos d'investigació actualment. Els resultats sempre han estat infructuosos, ja que era molt car d'aconseguir un combustible



com l'esperat degut al llarg procés que s'havia de seguir i no oferia un rendiment energètic semblant als dels combustibles actuals.

Una segona opció és la de modificar el concepte de que els gasos d'escapament han de ser llençat a l'atmosfera. Fins ara i des de sempre, tots els gasos que es produïen a partir de la combustió interna d'un combustible, eren llençats per defecte al medi ambient. La proposta que oferim és la de trobar una opció diferent a abocar-los al medi ambient o, si aquesta no fos possible, donar-li uns usos de manera que a aquests gasos se'ls hi pugui treure un rendiment abans de que siguin evacuats a l'exterior. Aquesta opció està sent actualment feta servir actualment en components com el turbocompressor accionat per els gasos d'escapament o en els recalentadors de les calderes. Per altra banda, la part en la que els gasos finalment no són expulsats a l'exterior encara està sent investigada i es busca un mètode innovador per a fer-los desaparèixer d'una manera que no sigui nociva pel medi ambient ni negativa per la maquinària. Per tant, aquesta opció queda descartada ja que es tracta d'una investigació amb una envergadura molt superior a la que podem assumir.

L'última opció i en la que ens centrarem més és la instal·lació d'un scrubber a la planta del vaixell. Això ens garantirà que els gasos de la combustió que es llencin a l'atmosfera respectaran els mínims establerts i que no estarem generant una contaminació a l'usar el motor. L'objectiu del scrubber és filtrar els gasos d'escapament al màxim de manera que els que són llençats a l'exterior no superen les parts per milió establertes per la normativa. Aquesta opció té com a inconvenients el cost d'instal·lació i construcció d'aquesta planta, l'arqueig que ocuparà en l'embarcació i els estudis que s'hauran de realitzar conseqüentment per variar les condicions de càrrega. S'ha de tenir en compte que la instal·lació d'aquesta planta treu volum de carga a l'embarcació, per tant molts dels armadors intenten evitar la seva instal·lació ja que els hi provoca pèrdues econòmiques enormes. Per això, durant el disseny d'aquesta planta s'haurà d'intentar que ocupi el menor espai possible i que la seva forma sigui el més regular possible ja que així tindrà menys repercussió sobre el volum de carga i el centre de gravetat de l'embarcació.

Un cop explicats els objectius del treball, es procedirà a explicar la metodologia que es seguirà per realitzar el treball.



3. Metodologia

La metodologia que es portarà a terme durant aquest treball serà la següent:

1. El primer pas a realitzar serà trobar un vaixell real sobre el qual podem prendre mesures i documentar-nos de manera que els càlculs que realitzem i els resultats que obtinguem siguin el més acurats possible. Aquesta voluntat d'apropar-nos el màxim a la realitat i a casos ja coneguts es deu a que per una banda, la part de recollida d'informació pot ser més senzilla, ja que són components i embarcacions on podem assegurar que tot està normalitzat i calculat de manera que el seu funcionament sigui l'idoni. També és important que les dades inicials siguin el més cenyides i veraces per un possible ús professional. El punt negatiu de prendre la decisió de treballar amb dades reals és el gran nombre de dificultats que ofereixen les empreses i armadors professionals actuals a l'hora de cedir informació sobre les seves embarcacions i els motors d'aquestes.
2. Un cop obtingudes aquestes dades reals sobre les quals volem treballar, es procedirà a fer una investigació profunda sobre els següents aspectes:
 - Motors de combustió interna utilitzats en aquesta embarcació. Funcionament, consums i necessitats.
 - Anàlisi del combustible utilitzat pels esmentats motors. Composició química d'aquest i situació comercial actual arreu del món.
 - Anàlisi de les condicions de navegació de l'embarcació. La ruta, les velocitats, les condicions de càrrega, les maniobres, etc. poden influir altament en l'eficiència del combustible i per tant, en l'expulsió de gasos a l'atmosfera.
 - Anàlisi de la normativa actual i relativa a la nostra embarcació i a la zona de navegació. Durant el treball, sempre seran respectades totes les normatives actuals establertes pel SOLAS, IMO i altres organitzacions relacionades amb la navegació i el medi ambient.
3. Anàlisi del sofre. Aquest treball es centrarà accentuadament en la resolució del problema que l'expulsió de gasos de sofre després de la combustió ens presenta. Per tant, es realitzarà una investigació sobre ell, en la que es buscarà com reduir la seva concentració en els gasos finals o com poder modificar l'efecte que pot tenir llençar-lo a l'atmosfera.
4. Presentació i investigació dels scrubber. Des de l'inici es planteja l'opció d'usar un scrubber en la sortida dels gasos d'escapament com la més viable i en la que més temps i recursos es dedicaran per obtenir el màxim d'informació. La depuració dels gasos d'escapament és una



opció més que viable ja que no necessita de cap modificació del motor ni en el combustible i és aplicable a totes les embarcacions, noves o antigues, sense haver de realitzar grans modificacions en el disseny de la nau. El punt negatiu d'aquesta opció és la pèrdua d'arqueig que patirà aquesta. Aquesta disminució d'espai de càrrega pot suposar pèrdues econòmiques i també haver de modificar els plans d'estiba.

5. Presentació de les altres solucions possibles. Com ha estat nombrat anteriorment, les altres solucions són trobar un combustible diferent que no sigui tan nociu per a la naturalesa i trobar algun destí nou pels gasos d'escapament o donar-los-hi un ús que suposi un gran benefici abans de ser expulsats. Aquesta última solució no es veu compromesa amb que al ser llençats a l'exterior, els gasos passin per l'scrubber. Aquestes dues opcions han estat deixades com a alternatives secundàries degut al gran volum d'investigació que necessiten fins a que es pugui arribar a algun punt eficient i productiu.



4. Embarcació model del treball

Com ja s'ha comentat anteriorment, aquest treball es recolzarà el màxim possible en una embarcació real. Per tant, el primer pas que s'ha hagut de realitzar ha estat posar-se en contacte amb empreses que tinguin dades sobre embarcacions similars a la feta servir en el treball.

Gràcies a contactes establerts anteriorment, hem pogut obtenir informació de la nau "HELENA SCHEPPERS". Aquesta nau treballa amb la naviera W.E.C. Lines i opera fent una ruta de cabotatge des de les Canàries fins a Barcelona. Durant la ruta de cabotatge realitza parades en ports entremitjos com pot ser Algeciras, València o Tarragona entre d'altres.

A continuació, s'explicaran les principals dimensions de la nau i les dades que ens han estat facilitades per part de l'empresa amb la que hem contactat.

- Nom de l'embarcació: Helena Schepers
- Registre IMO: 9584487. Aquest nombre fa referència a la codificació que utilitza la IMO per tenir un control i un reconeixement de les embarcacions que naveguen arreu del món. Quan són construïdes, en funció del seu fi i categoria, se'ls hi atorga un nombre de reconeixement que passa a ser la seva identificació per a la IMO.
- Número de Radio: 5BVP3. Aquest nombre és el que es registra per a la radio amb la que la nau anirà equipada. En cas de voler-se comunicar amb ella, aquest nombre seria una de les opcions que existirien.
- Desplaçament estàndard: 10318 Tn. Aquesta magnitud fa referència al pes que té l'embarcació en tones referit a només l'essencial necessari, tenint en compte el desplaçament en rosca, el pes de la tripulació i tots aquells recursos necessaris per a la navegació (combustibles, olis, motor...) com per la seguretat dels que es troben a bord (embarcacions salvavides, flotadors, etc.).
- Arqueig net: 5391 Tn. Fa referència a la capacitat d'espai aprofitable per a càrrega que té l'embarcació. Es mesura en tones pels seus inicis en que la mercaderia es transportava en botes de vi, tot i que s'ha anat actualitzant poc a poc.
- Desplaçament màxim: 13031 Tn. Aquest paràmetre marca el desplaçament que pot suportar l'embarcació sense que suposi un perill per a la navegació incloent el combustible, els pertrets, tripulació, etc.
- Capacitat de càrrega màxima: 2713 Tn
- Bandera: Xipre. La bandera marca el país amb el qual està associada l'embarcació i per tant, la normativa que ha de seguir, apart de les que marquen els organismes marítics internacionals.
- Port base: Limassol (Xipre).
- Any de construcció: 2012



- Eslora total (LOA): 152 m.
- Mànega (B): 23 m.
- Calat (D): 8 m.



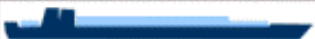


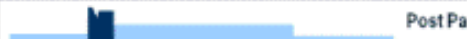
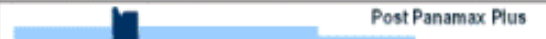

		Length	Draft	TEU
First (1956-1970)	 Converted Cargo Vessel	135 m	< 9 m < 30 ft	500
	 Converted Tanker	200 m	< 30 ft	800
Second (1970-1980)	 Cellular Containership	215 m	10 m 33 ft	1,000 – 2,500
Third (1980-1988)	 Panamax Class	250 m	11-12 m 36-40 ft	3,000
	 Panamax Class	290 m	36-40 ft	4,000
Fourth (1988-2000)	 Post Panamax	275 – 305 m	11-13 m 36-43 ft	4,000 – 5,000
Fifth (2000-2005)	 Post Panamax Plus	335 m	13-14 m 43-46 ft	5,000 – 8,000
Sixth (2006-)	 New Panamax	397 m	15.5 m 50 ft	11,000 – 14,500

Figura 1: Classificació dels portacontenidors en funció de l'eslora

Com es pot veure en la imatge superior, el vaixell de treball queda englobat dintre el primer grup d'embarcacions de portacontenidors. Pertany a la primera generació que va existir els quals són el més petits. Per altra banda, aquest buc es fa servir per a cabotatge i per això les seves dimensions són més petites en comparació a les de les altres embarcacions.

- Societat de classificació: Bureau Veritas
- Velocitat nominal de l'embarcació: 18.5 kn. La velocitat nominal es defineix com la velocitat d'operació de l'embarcació en condicions normals i per la qual el motor està dissenyat per operar la gran part del temps.

Un cop definides les principals dimensions de l'embarcació i les seves dades més rellevants, passarem a explicar les característiques del motor que propulsa la nau. Serà molt important tenir les característiques del motor clares, ja que es necessitarà el màxim de dades possibles per fer els càlculs el més veraçs possible i així, obtindre uns resultats reals i amb els quals es pugui treballar en un futur.



Figura 2: Vista del mirall de popa de l'embarcació del treball



5. Sistemes de propulsió

5.1. Història de la propulsió

Des de l'inici de la navegació, la ciència de la propulsió ha estat molt rellevant i ha jugat un gran paper en l'evolució d'aquesta. Aquesta evolució ha variat molt en funció de la cultura, la tecnologia, les eines de les que es disposaven i del clima en el qual es navegava. Per tant, el disseny de propulsió de les primeres embarcacions nòrdiques no es pot comparar amb les de les naus asiàtiques.

Inicialment les naus es propulsaven per aigües de poca fondària fent "palanca" en el fons i impulsant-se per avançar. Més endavant apareixien les veles. Unes teles que es disposaven de manera que poguessin aprofitar de la manera més eficient el corrent d'aire que existia i així poder-se impulsar. Com s'ha comentat abans, les tecnologies i els dissenys no eren els mateixos arreu del món i l'exemple més patent són els velàmens de les embarcacions. Depenent d'on ens trobem i de la cultura de navegació que existeixi, existiran veles diferents de manera que es puguin aprofitar millor les condicions climàtiques pròpies d'aquella ubicació.

També, paral·lelament a l'evolució de les veles apareixien les versions predecessores de les hèlixs. Inicialment eren uns cargols sense fi que es feien girar manualment de manera que desplaçaven una massa d'aigua a través de la figura del cargol i aconseguien fer avançar la nau.

Poc a poc, amb la invenció de la màquina de vapor, es van anar ajuntant conceptes i van sorgir les embarcacions propulsades a vapor i amb hèlixs o pales rotatòries. Aquesta tecnologia seria la predecessora dels mecanismes que coneixem en l'actualitat.

Parlant dels motors, aquest mecanismes han patit una evolució molt important i ràpida, ja que en qüestió d'aproximadament 200 anys es va passar de la màquina de vapor primitiva als motors de combustió tal i com els coneixem en l'actualitat.

Aquests motors fan servir els canvis de pressió, temperatura i volum per a crear una combustió dins un espai tancat de manera que es produeix una combustió que allibera una gran quantitat d'energia i així poder iniciar un moviment. Aquest moviment ben guiat, és el que provoca que al final de la cadena, l'hèlix, o el mètode de propulsió que s'utilitzi, giri o es generi una empenta de manera que es pugui propulsar l'embarcació.

5.2. Classificació dels MCI

A partir d'aquest motor inicial, es va seguir investigant i en pocs anys s'ha aconseguit avançar i millorar completament en el seu disseny i rendiment.



Actualment, els motors de combustió interna ofereixen una gran varietat d'opcions. Poden ser alternatius o circulars, amb un pistó, dos o els que siguin adequats. El creixement que ha tingut la tecnologia ha fet que aquesta millora ens els motors i en els seus mecanismes i sistemes hagin estat exponencials i actualment gaudim d'uns motors amb unes qualitats que ens permeten treballar de maneres molt diverses i amb bons resultats. A l'hora de classificar els motors de combustió, podem fer unes quantes distincions bàsiques en funció d'on es produeix l'explosió, el tipus de moviment que segueixen, etc.

A continuació es procedirà a fer una explicació detallada de les principals classificacions existents per als motors de combustió. Cal dir que aquesta és una ciència que està en constant innovació i que en uns anys, la classificació que es donarà ara estarà incompleta o inacabada.

Classificació segons el tipus de moviment provocat: Una de les principals classificacions i que més diferencia als motors és en funció del tipus de moviment que genera la combustió interna. Aquest moviment es pot dividir principalment en alternatiu o rotatiu.

- Alternatiu: el moviment resultant i que s'aprofitarà és alternatiu i es produeix en línia recta. La majoria d'automòbils que es fan servir actualment són motors de combustió interna alternatius.
- Rotatiu: el moviment resultant i que s'aprofitarà descriu una trajectòria circular. Un exemple clar són els motors Wankel, coneguts pel seu ús en alguns models de la marca de cotxes Mazda.

Classificació segons el tipus de combustible utilitzat: El combustible d'un motor és allò que fa que aquest pugui funcionar de manera regular i del qual, a partir d'unes reaccions químiques s'aconsegueixi generar una energia que serà transformada en moviment.

- Màquines de cycle Otto o isocòriques: són les conegudes comunament com a motor de benzina. Aquests motors es diferencien de la resta per la necessitat de la presència d'una guspira per poder realitzar l'explosió que generarà l'energia del moviment.
- Màquines d'autoencesca o isobàriques: són les conegudes amb el nom de motors dièsel. Aquestes màquines es caracteritzen per no necessitar d'una flama per poder realitzar l'explosió que generarà l'energia que es transformarà finalment en el moviment. L'explosió vindrà provocada per la compressió que es realitzarà sobre el combustible dintre un volum tancat.

Classificació segons el cycle operatiu: Els motors per a poder realitzar tota la transformació d'energia química a energia cinètica segueixen uns cycles. Aquests cycles comporten implícitament una sèrie de fases que poden donar-se



durant dues o quatre carreres. Aquesta és la classificació que diferencia el motors en els anomenats “motors de dos temps (2T) o quatre temps (4T)

- Motor de dos temps: completa tot el procés d’admissió, compressió, explosió o combustió i expansió i escapament en dos moments diferenciats. Són motors que no tenen vàlvules d’admissió i no tots en tenen de sortida. Són utilitzats per a motors de revolucions baixes o petits motors.
- Motors de quatre temps: completa el procés sencer en quatre parts diferenciades. Tenen vàlvules d’admissió i escapament. S’utilitzen comunament en motors d’ús regular i de revolucions elevades com els de cotxes.

Segons la manera d’elaboració de la barreja: hi ha dues maneres d’obtenir la barreja exacta de combustible i comburent (aire) que s’introdueix dins el pistó i que provoca que l’explosió pugui tenir lloc.

- A carburació: funcionen a partir d’un carburador. El carburador és un aparell format per dos canals. Un canal és per on circula l’aire i l’altre per on es desplaça el combustible polvoritzat. En el moment en el que el canal de l’aire s’uneix al del combustible, el canal de l’aire es fa estret de manera que l’aire que circula per ell pateix una baixada de pressió degut a l’efecte Venturi. El fet que el combustible s’introdueixi en la part on és més estreta el canal de l’aire provoca que la barreja entre els dos elements sigui immediata i eficaç.
- A injecció: es fan servir injectors que s’encarreguen d’atomitzar el combustible i introduir-lo dins la cambra de combustió.

Segons el sistema d’alimentació de l’aire: com ja s’ha comentat, els motors de combustió necessiten aire per poder portar a terme la barreja que provocarà l’explosió. Per tant, hi ha d’haver uns sistemes establerts per obtenir aquest aire. Existeixen dos tipus principals:

- Alimentació atmosfèrica: l’aire entra al motor degut a l’aspiració que genera el pistó al realitzar la carrera descendent, que genera un canvi de pressió entre la interior i l’exterior.
- Sobrealimentació: el motor rep aire que és entrat a una pressió superior a l’atmosfèrica des d’un turbocompressor

Segons nombre i disposició de pistons: els motors poden tenir un nombre il·limitat de pistons i disposar-los de diferents maneres. Les més comuns són



en línia, en V i en estrella, sent els dos primers els més comuns en aplicacions navals.

Un cop classificats els motors i explicades les principals característiques tècniques que poden tenir, es veurà una explicació dels principals motors de combustió interna aplicats a àmbits marins, la seva història i es justificarà el perquè de les modificacions que puguin tenir sobre un motor de combustió interna convencional.

5.3. Motors de combustió interna marins

Durant el transcurs de la història, els motors marins han patit una gran modificació i, sobretot, millores i innovacions.

L'inici de la indústria dels motors dissenyats amb fins exclusivament naval es va iniciar en gran volum a Alemanya durant la pujada al poder de Hitler i amb una gran evolució ens els anys següents degut a la gran necessitat de l'armada de marina per afrontar la II Guerra Mundial.

Diferents fabricants de motors, alguns d'ells encara presents, es van involucrar en una lluita per veure qui dissenyava el millor motor i amb les millors característiques de manera que fossin els motors elegits per l'exèrcit. Aquests motors eren bastant primitius comparats amb els que actualment existeixen degut a les grans limitacions tècniques i, sobretot, electròniques que tenien. Tot i així, durant la gran expansió de coneixement i fabricació de motors navals es van aconseguir motors amb valors de potència propers als 1050 kW (1400 CV) i de fins a 1200 kW (1600 CV) en potències instantànies.

Els principals fabricants de motors navals del moment van ser M.A.N, MWM, Daimier-Benz i Sulzer, tots alemanys, excepte l'últim que era suís.

Durant aquesta constant innovació es van anar provant diferents opcions de manera que es buscava trobar el millor rendiment per als motors d'aquest tipus. Es variava el nombre de pistons, la carrera d'aquests, els radis i els diàmetres de manera que es buscava un funcionament proper a l'excel·lència

Des de principis dels anys 20 ja es va anar investigant en com trobar el millor rendiment per als motors d'àmbit naval. A continuació es citen una sèrie d'efemèrides relacionades amb l'evolució dels motors de combustió interna:

- 1926: es boten les primeres embarcacions amb motors navals amb turbocompressors.



- 1928: M.A.N fabrica el primer motor naval. Inicialment el disseny era per a 8 pistons encara que acaba sent aprofitat per a un motor de 6 i posteriorment de 7 i 9.
- 1929: MWM dissenya un motor dièsel de 6 cilindres expressament per ser utilitzat al mar. Sorgeix a partir de l'objectiu de voler crear una competència a M.A.N per fer-se amb el domini en l'àmbit dels motors de les embarcacions de guerra alemanyes.
- 1932: El fabricant suïss Sulzer introdueix la tecnologia d'injecció de combustible sense aire, el qual es converteix en un gran avenç pels motors dièsel i lents.
- 1936: M.A.N. dissenya un motor especialitzat per a àmbit naval més petit que els que s'havien dissenyat fins aleshores de manera que complís el tractat naval de Londres firmat sis anys enrere referent al desplaçament de les embarcacions.
- 1939: els dissenys ja inclouen una única bancada pels motors nous que surten de fàbrica. La bancada dels models anteriors venia formada per dues bancades soldades entre elles. Això es feia per evitar la forja de peces d'unes dimensions tan grans encara que com es va veure a posteriori era pitjor ja que els punts de soldadura de les peces eren punts on es produïen ruptures i particions de les estructures.

Durant els següents anys l'evolució que van patir els motors no va ser massa notòria, excepte pel fet de que es van anar polint els motors ja creats i millorant els seus rendiments. Es van anar establint uns usos nominals vinculats amb el nombre dels pistons que tenien els motors, la potència que desenvolupaven i l'optimització de la forma del motor.

- 1942: Wärtsila treu a la venda el primer motor dièsel dissenyat i construït íntegrament en les seves fàbriques i d'aquesta manera entra en la competència de la resta d'empreses fabricants de motors marítims.
- 1952: El primer vaixell de càrrega propulsat amb un motor de dos temps amb turbo compressor i dièsel és botat. Tenia un desplaçament de 18000 Tn i pertanyia a la firma danesa Maersk.
- 1956: Sulzer presenta el primer disseny oficial en el que apareix un motor dièsel que fa servir la creueta com a adaptació per als motors d'àmbit naval.

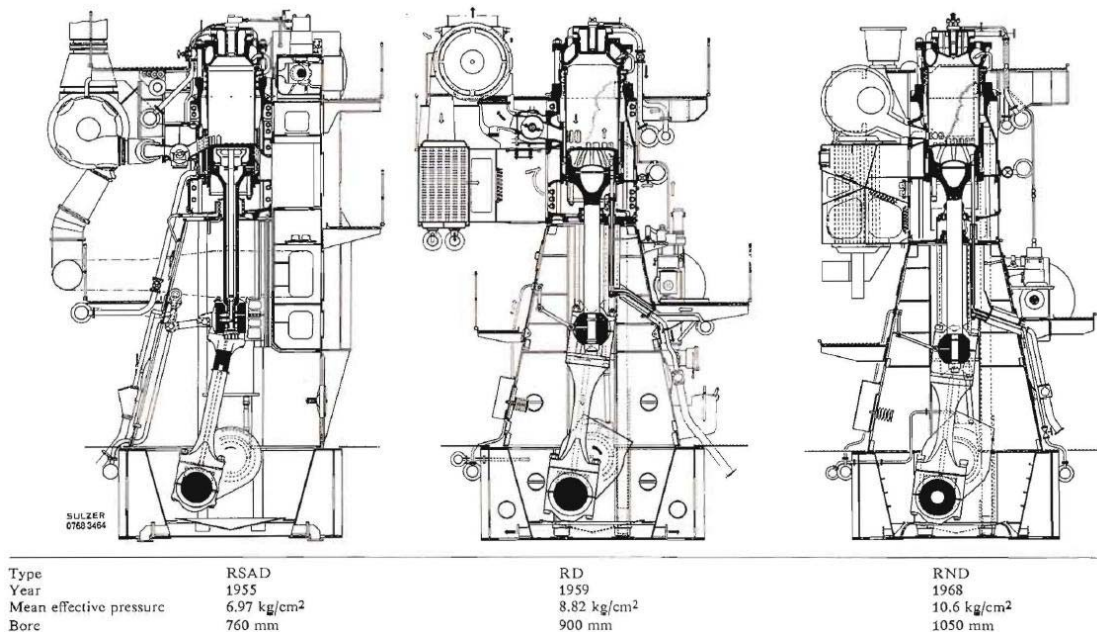


Figura 3: Motor marí de creueta

Des d'aquest moment la investigació sobre motors i components innovadors per a l'ús nàutic pateix un recés. Es deixa d'investigar en com obtenir nous productes i es passa a millorar i a fer més eficients les màquines ja existents, ja sigui mitjançant petites modificacions, afegint o eliminant components com els turbocompressors pneumàtics, els pistons i els cilindres.

Apareixen embarcacions de càrrega que són propulsades per motors de fins a 20 cilindres i que donen fins a 2000 cavalls de potència efectiva.

Totes aquestes millores i innovacions que apareixen provoquen que el comerç marítim es converteixi en una de les primeres opcions a l'hora de transportar qualsevol mena de càrrega arreu del món. En poc temps el transport pel mar ha cobrat una importància enorme per tot el món i ara mateix no es podria imaginar la globalització i la internacionalització del món sense aquestes eines.

5.4 Categories de MCI marins i normatives vigents en quant a emissions

Degut a l'ús de combustibles residuals en els motors de propulsió dels vaixells, s'ha generat una gran quantitat d'emissions perjudicials per al medi ambient.

Per tal de regular les emissions de gasos d'escapament dels motors, s'han establert tres categories per classificar els motors i així poder marcar uns valors límits més precisos i adequats a cada tipus existent.



Aquesta classificació separa els motors marins en funció del desplaçament que té el cilindre i per tant, el volum de combustible que accepta cada un dels pistons del motor. En els motors de categoria 1 i 2 existeix una subclassificació en la que també es té en compte la potència nominal efectiva de sortida.

El motors marins dièsel de categoria 1 i 2 estan compresos en una potència d'entre 700 a 11000 HP i es troben en embarcacions d'esbarjo, remolcadors, embarcacions auxiliars, pescadors i plantes generadores de corrent elèctrica.

La categoria 3 està reservada per aquells motors de gran potència (3000-100000 HP) i que s'utilitzen en grans embarcacions com petrolers, carguers, creuers, etc.

Category	Displacement per Cylinder (D)		Basic Engine Technology
	Tier 1-2	Tier 3-4	
1	$D < 5 \text{ dm}^3 \dagger$	$D < 7 \text{ dm}^3$	Land-based nonroad diesel
2	$5 \text{ dm}^3 \leq D < 30 \text{ dm}^3$	$7 \text{ dm}^3 \leq D < 30 \text{ dm}^3$	Locomotive engine
3	$D \geq 30 \text{ dm}^3$		Unique marine engine design
\dagger And power $\geq 37 \text{ kW}$			

Taula 1: Taula de categories dels MCI

En el quadre classificatori anterior es pot veure com apareix la classificació en 2 nivells per als motors de categoria 1 i 2. També es mostren els usos principals que es donen als motors en funció de la seva categoria.

Un motor non-road és aquell que no està destinat a fer que l'artefacte que el carrega transporti càrrega per medi terrestre. Per tant, hi engloba tant motors marins com de jardineres com qualsevol altre artefacte que porti un motor però no transporti per carretera.

Un cop establerta la principal classificació dels motors de combustió interna, es passarà a anomenar les principals normatives que regulen l'emissió de gasos d'aquests mateixos. La primera normativa va establir-se l'any 1999 i era aplicable a diferents tipus de motors, no només marítims.

- Normativa de motors marítims de 1999: Aprovada el 23 de Novembre de 1999, l'associació de Medi Ambient dels Estats Units van firmar una normativa definitiva per controlar les emissions per motors marítims amb potència superior a 37 kW (50HP). Els motors classificats a subnivell 3-4 dels de la categoria 1 i 2 respecten la normativa vigent relativa als motors terrestres i fora carretera (non-



- road) mentre que els motors classificats com categoria 3 s'espera que respectin els límits acotats a l'annex IV del MARPOL.
- Normativa referent als motors d'embarcacions d'esbarjo de 2002: Normativa aprovada el 13 de Setembre de 2002. Els motors dièsel que es facin servir em embarcacions d'esbarjo hauran de respectar els límits d'emissions estipulats a "Estàndars d'emissió per a nous motors non-road, motors dièsel marins d'esbarjo i vehicles recreatius".
 - Normativa referent a motors de categoria 3: Després d'una gran controvèrsia, la EPA va publicar el Gener de 2003 un manual de normatives anomenat "Control d'emissions de motors de combustió de tipus compressió-ignició de més de 30 litres per cilindre" amb el que es pretenia regular les emissions de NOx d'aquests i es marcaven les quantitats límits que s'acceptava que fossin emeses per les embarcacions englobades en aquest grup.
 - Normativa per a motors de categoria 1 i 2: Signada el 14 de Març del 2008 va establir uns límits d'emissió per als motors dièsel marins englobats en el sector 3-4. En aquesta normativa es parla també de la tecnologia usada per al tractament de gasos abans de la seva sortida. A mesura que han avançat les tecnologies referents a la limitació d'emissió de gasos d'escapament, s'han hagut d'adaptar noves tecnologies per a ella, com la dels mètodes catalítics. A l'any 2007 es van limitar les emissions de sulfur en els gasos d'escapament dels motors que limitaven les seves emissions per mètode catalític a 500 ppm, mentre que l'any 2012 es rebaixaven fins a 15 ppm.

A continuació es nomenarà quins són els estàndards de referències que s'usen per a delimitar els nivells d'emissions de les embarcacions en funció del seu motor i en funció de la categoria de la nau. També s'explicarà breument quines són les normatives establertes per controlar si es compleixen dits paràmetres:

Motors de categoria 1 i 2:

En la taula mostrada a continuació veiem les limitacions d'emissions de gasos desglossats en funció de la categoria del motor (categoria 1 i 2 però subclassificació 1-2) i, a més, l'any en el que van passar a ser obligatori. La gran majoria d'aquestes mesures van ser aprovades al 1999, de manera que des de l'any de la seva aprovació fins a l'any que van entrar a ser obligatòries



va existir un lapse de temps en el qual les embarcacions van poder adaptar els seus motors i en els que respectar els límits era voluntari.

Category	Displacement (D)	CO	NOx+THC	PM	Date
	dm^3 per cylinder	g/kWh	g/kWh	g/kWh	
1	Power \geq 37 kW D < 0.9	5.0	7.5	0.40	2005
	0.9 \leq D < 1.2	5.0	7.2	0.30	2004
	1.2 \leq D < 2.5	5.0	7.2	0.20	2004
	2.5 \leq D < 5.0	5.0	7.2	0.20	2007 ^a
2	5.0 \leq D < 15	5.0	7.8	0.27	2007 ^a
	15 \leq D < 20 Power < 3300 kW	5.0	8.7	0.50	2007 ^a
	15 \leq D < 20 Power \geq 3300 kW	5.0	9.8	0.50	2007 ^a
	20 \leq D < 25	5.0	9.8	0.50	2007 ^a
	25 \leq D < 30	5.0	11.0	0.50	2007 ^a

* - Tier 1 standards are equivalent to the MARPOL Annex VI Tier I NOx limits
a - Tier 1 certification requirement starts in 2004

Taula 2: MCI de categoria 1 i 2

Com es pot veure a la taula 2, algunes mesures van tardar fins a 8 anys per passar a ser obligatòries. Per altra banda es pot observar que independentment del tipus de motor, la seva capacitat i la seva potència, la quantitat de òxid de carboni que pot emetre un motor serà la mateixa per tots. També podem veure al peu d'imatge com dicta que els límits establerts per la EPA referents als motors de classe 1 són els mateixos que dicta el MARPOL en l'annex IV.

A l'hora de limitar les emissions dels motors de categoria 1 i 2 en la subclassificació 3-4 existeixen moltes més limitacions degut a que existeix una varietat més ampla de motors que poden usar-se i, a la vegada, un major nombre de tipus de motors diferenciats en funció del seu propòsit (esbarjo, càrrega, etc.). Un dels criteris que es fa servir també a l'hora de classificar un motor és la seva densitat de potència. Aquesta propietat és el resultat de dividir la potència que té dit motor entre el volum que admet un cilindre del mateix. Així s'aconsegueix marcar uns paràmetres objectius addicionals a l'hora de classificar els motors per diferenciar les seves possibilitats a l'hora de controlar les seves emissions.



A continuació mostrem les principals taules on es limiten les emissions dels motors i les seves categories. Cal a dir que tots aquests límits són establerts d'acord amb les normatives internacionals com IMO i MARPOL Annex IV.

Power (P)	Displacement (D)	NOx+HC†	PM	Date
<i>kW</i>	<i>dm³ per cylinder</i>	<i>g/kWh</i>	<i>g/kWh</i>	
P < 19	D < 0.9	7.5	0.40	2009
19 ≤ P < 75	D < 0.9 ^a	7.5	0.30	2009
		4.7 ^b	0.30 ^b	2014
75 ≤ P < 3700	D < 0.9	5.4	0.14	2012
	0.9 ≤ D < 1.2	5.4	0.12	2013
	1.2 ≤ D < 2.5	5.6	0.11 ^c	2014
	2.5 ≤ D < 3.5	5.6	0.11 ^c	2013
	3.5 ≤ D < 7	5.8	0.11 ^c	2012

† Tier 3 NOx+HC standards do not apply to 2000-3700 kW engines.
a - < 75 kW engines ≥ 0.9 dm³/cylinder are subject to the corresponding 75-3700 kW standards.
b - Option: 0.20 g/kWh PM & 5.8 g/kWh NOx+HC in 2014.
c - This standard level drops to 0.10 g/kWh in 2018 for < 600 kW engines.

Taula 3: Factors d'emissió de gasos de motors de categoria 1 i 2

En la taula 3 es mostren els límits d'emissions per a motors de categoria 1 i 2 en subclassificació 3 i per a motors amb densitat de potència estàndard (<35kW/dm³). Com es pot veure en les notes hi ha una sèrie de limitacions com les de les emissions de NOx+HC en motors de potència igual o superior a 2000kW i les que mostren excepcions que no apareixen tabulades com les del cas "a" en la que la potència del motor si està mostrada en la taula però el diàmetre del motor és superior al normalitzat o altres opcions que podrien ser vàlides com la que mostra l'excepció "b".

La taula següent mostra els límits d'emissió per a motors de categoria 1, subcategoria 3 per a motors de gran densitat de potència (>35kW/dm³).



Power (P)	Displacement (D)	NOx+HC	PM	Date
<i>kW</i>	<i>dm³ per cylinder</i>	<i>g/kWh</i>	<i>g/kWh</i>	
P < 19	D < 0.9	7.5	0.40	2009
19 ≤ P < 75	D < 0.9 ^a	7.5	0.30	2009
		4.7 ^b	0.30 ^b	2014
75 ≤ P < 3700	D < 0.9	5.8	0.15	2012
	0.9 ≤ D < 1.2	5.8	0.14	2013
	1.2 ≤ D < 2.5	5.8	0.12	2014
	2.5 ≤ D < 3.5	5.8	0.12	2013
	3.5 ≤ D < 7	5.8	0.11	2012

a - < 75 kW engines ≥ 0.9 dm³/cylinder are subject to the corresponding 75-3700 kW standards.
b - Option: 0.20 g/kWh PM & 5.8 g/kWh NOx+HC in 2014.

Taula 4: MCI de categoria 3

Com en el cas anterior, podem veure que per a que la taula s'ajusti a tots els motors existents i per fabricar, existeixen excepcions que s'anomenen "a" i "b". En aquest cas són molt semblants a les de la taula de motors de densitat de potència normal.

Motors de categoria 3:

Els límits dels motors de categoria 3 queden emmarcats entre els 9.8 i 17g/kWh. Els motors els quals tenen una velocitat (rpm) menor tenen uns límits més alts.

Els límits d'emissions, venen descrits en el MARPOL Annex VI de l'IMO.



5.5. Motor de l'embarcació del treball

Un dels elements més importants a l'hora d'aconseguir que un buc treballi en les condicions òptimes i durant un llarg període de temps és la selecció del motor que propulsarà dit buc.

Moltes vegades les característiques dels motors que usen cada una de les embarcacions d'una empresa es mantenen en confidencialitat per tal de mantenir estratègies i avantatges sobre la possible competència d'altres companyies. Aquest secretisme i hermetisme ha provocat que sigui molt complicat saber les principals dades del motor que propulsa el buc sobre el qual treballem. Per a poder determinar les característiques d'un motor real i que a més sigui adequat a la nostre embarcació s'ha seguit el següent procediment:

- Recerca de dades reals d'altres embarcacions amb dimensions aproximades a les de l'embarcació tractada.
- Creació d'una base de dades amb les principals dimensions de dites embarcacions.
- Representació de la relació de les principals dimensions amb la potència nominal dels seus motors respectius.
- Obtenció de la fórmula de la regressió lineal del gràfic.
- Obtenció de la potència hipotètica de la nostra embarcació basant-se amb els resultats anteriors.
- Recerca d'un motor adequat per a les condicions obtingudes.

Durant aquest procés s'ha buscat la informació a través de diferents fonts però finalment, la que ha estat l'elegida per la seva veracitat i contrastació i, a la vegada, per la facilitat a l'hora de treballar ha estat la base de dades present al PFC de Carlos Arias, pàgina 53. Aquesta base de dades és una mica escassa de models a tenir en compte però fa el servei per a poder conèixer el rang de potències sobre el que treballa el motor d'una embarcació com la nostra.

A continuació es mostra la base de dades que s'ha creat amb les diferents embarcacions que s'han trobat amb les dimensions semblants a les de la nostre embarcació i de les quals també es trobava visible la informació del motor respectiu.



Nom del buc	Lpp (m)	B (m)	D (m)	Pes mort (Tm)	Potencia (Kw)
MCC AKARI	150,00	25,60	12,90	17785,00	11414,00
MOL BRIGHT	150,00	25,60	12,90	18185,00	9988,00
UNI-CONCEPT	141,00	25,60	12,70	17446,00	8495,00
ACX CHERRY	152,00	25,00	13,40	18103,00	9627,00
MOL ADMIRATION	133,45	26,00	13,70	15221,00	9988,00
FREMANTLE BRIDGE	152,00	26,40	13,20	16567,00	12268,00
ARCANGELO	158,00	27,20	13,60	18413,00	8127,00
KOTA HARUM	150,00	25,00	12,80	18872,00	10200,00
KOTA HASIL	150,00	25,00	12,80	18870,00	10200,00
KUO TAI	158,00	27,30	13,50	18586,00	8127,00
HANJIN LAEM CHABANG	150,00	27,60	12,90	17852,00	12640,00
SHIMA	150,00	25,00	12,80	17250,00	9627,00
KOTA HORMAT	150,00	25,00	12,80	17324,00	9625,00
SATSUKI	152,00	26,00	13,40	17705,00	9627,00

Taula 5: Base de dades d'embarcacions semblants a la del treball

Aquesta base de dades presentada a la taula 5 és la primitiva que inclou tots els models que es van trobar en la font d'informació externa. Com es pot veure, les eslores de les embarcacions es mouen dins un marge bastant ample, així que per poder donar una major precisió a la nostra recerca s'han filtrat alguns models. Els models s'han descartat a partir de la diferència amb l'eslora del nostre buc (152 m.).

Nom del buc	Lpp (m)	B (m)	D (m)	Pes mort (Tm)	Potencia (Kw)
MCC AKARI	150,00	25,60	12,90	17785,00	11414,00
MOL BRIGHT	150,00	25,60	12,90	18185,00	9988,00
ACX CHERRY	152,00	25,00	13,40	18103,00	9627,00
FREMANTLE BRIDGE	152,00	26,40	13,20	16567,00	12268,00
KOTA HARUM	150,00	25,00	12,80	18872,00	10200,00
KOTA HASIL	150,00	25,00	12,80	18870,00	10200,00
HANJIN LAEM CHABANG	150,00	27,60	12,90	17852,00	12640,00
SHIMA	150,00	25,00	12,80	17250,00	9627,00
KOTA HORMAT	150,00	25,00	12,80	17324,00	9625,00
SATSUKI	152,00	26,00	13,40	17705,00	9627,00

Taula 6: Base de dades reduïda



Apart de la base de dades numèrica de les dimensions de les diferents embarcacions, també s'ha creat un gràfic per tal de que quedi patent la relació que existeix entre les eslores i les potències de les diferents embarcacions.

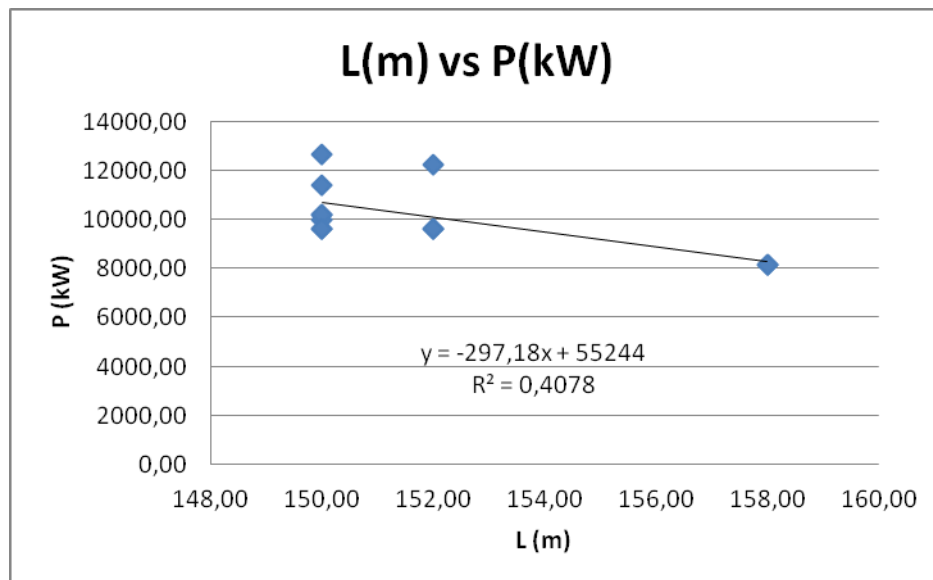


Figura 4: Gràfic de la base da dades

Com es pot veure existeix una certa estandardització en els valors de potència dels motors ja que, per a eslores iguals, les potències d'aquests no varien massa. Per a poder obtenir la recta de regressió s'ha creat una funció lineal, ja que si es procedia a realitzar mitjançant una funció polinòmica, no seguia com funció que pogués ser calculada, como ja es pot intuir veient la gràfica. Un cop obtinguda dita funció, és moment d'aplicar-la a les característiques del buc del treball.

Per a una eslora de 152 metres, s'obté una potència mínima necessària de 10072.64 kW, seguint la funció obtinguda a partir de la gràfica. Aquest valor obtingut serà el que es seguirà a l'hora de buscar un model de motor real i que es trobi en mercat.

El motor que es buscarà serà de dos temps i que funcioni amb fuel-oil. També s'han tingut en compte per a aquesta elecció el nombre de cilindres del motor elegit i altres propietats que s'explicaran a continuació.

El motor seleccionat és el model **8S50ME-C8** de la marca alemanya MAN. Aquest motor proporciona una potència màxima de 13280 kW en el punt de màxima potència efectiva i amb el funcionament ideal dels 8 cilindres. Aquesta empresa té establert un codi a l'hora d'anomenar els seus motors de manera que només sabent el nom es pot saber quin tipus de motor és. A continuació s'explica la informació que es pot treure a partir del nom del motor.



El motor té les següents característiques:

- Motor de 2 temps: A l'igual que la gran majoria de motors de combustió interna que es fan servir per a propulsar grans embarcacions, aquesta també està equipada amb un motor de dos temps i de creueta. D'aquesta manera, el motor estalvia combustible i augmenta la periodicitat amb la qual se li han de realitzar inspeccions i manteniments.
- 8 cilindres: El motor està equipat amb 8 cilindres i cadascun d'aquests té una carrera de 2000 mm i un diàmetre del cilindre de 50 cm. Com es pot calcular a partir d'aquestes dades, el volum d'un cilindre és de 0.3926 m^3 . Al ser un motor de 8 cilindres fa una cilindrada total de 3.14159 m^3 . Aquesta cilindrada si s'expressa en cm^3 , la qual és unitat més estesa i coneguda ja que es fa servir en l'automoció, s'obté un valor de 3141590 cm^3 .
- ME-C: Control dels processos del motor automàtics i electrònics. Aquest motor porta a terme els principals processos necessaris per al seu funcionament de manera automàtica i controlats electrònicament com pot ser la lubricació dels cilindres, l'obertura i el tancament de les diferents vàlvules, etc.
- Pes del motor: El motor té un pes de 270 tones. Aquesta dada és molt important ja que un element tan gran i amb tan pes ha d'estar disposat a l'embarcació de manera que no afecti al volum de càrrega, no afecti a l'estabilitat a l'hora de navegar i que el seu posicionament dins del buc garanteixi que en tot moment i en tota situació podrà ser abastit de tots els serveis que pugui necessitar.

Com a característiques principals del motor podem saber que és un motor que pot treballar amb dos tipus de fueloil. Això es deu a que el disseny dels components del motor és prou resistent com per acceptar les característiques de dos tipus de fuels sense patir cap averia a llarg o curt termini ni que es redueixi l'eficiència de dit motor. Els tipus de fuel oil que accepta el motor són el "MDO" (Marine Diesel Oil), amb una classificació atorgada tant per la ISO com per la British Standar de DMB i, també, el fuel oil tipus "HFO" (Heavy Fuel Oil) amb una viscositat menor a 700 cst mesurat a 50°C . En l'apartat de combustibles marins d'aquest mateix treball es dona una explicació més detallada i profunda d'ambdós combustibles

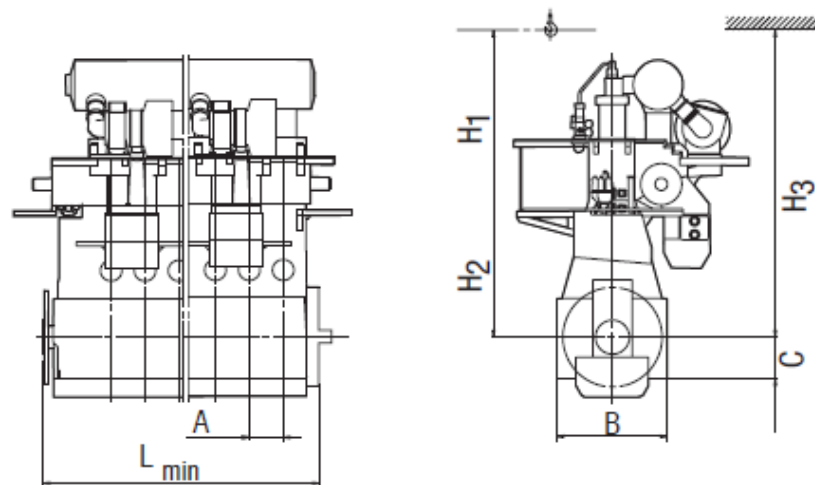
Per tant, com es pot veure, el motor de l'embarcació pot treballar tant amb dièsel com amb fuel oil purament residual, sempre i quan aquest compleixi la condició de la viscositat nombrada.

A continuació es mostra l'enllaç que condueix al fitxer oficial de la marca MAN sobre el motor. En aquest document es pot trobar qualsevol informació



necessària sobre el motor com la potència i el cabdal de les bombes que té instal·lades el motor, les potències dels escalfadors de combustible, les potències de les bombes de líquid de refrigeració i altres dades rellevants.
http://marine.man.eu/applications/projectguides/2stroke/content/epub/S50ME-C8_2.pdf

A continuació s'adjunta una imatge on s'especifiquen les principals dimensions del motor de manera que es pugui apreciar la mida d'aquest i es pugui entendre la importància que té disposar-lo en un lloc planificat a l'embarcació.



Specifications

Dimensions:	A	B	C	H ₁	H ₂	H ₃
mm	850	3,150	1,085	9,050	8,500	8,250

Cylinders:	5	6	7	8	9
L _{min} mm	5,924	6,774	7,624	8,474	9,324

Figura 5: Principals dimensions del motor de l'embarcació

Com es pot veure. Les principals dimensions estan al voltant dels 8 metres

Per altra banda, tot motor té un llibret en el qual s'indiquen les principals característiques d'aquest i les principals informacions que s'han de conèixer per tal de tenir la major informació a l'hora d'eleger un motor i poder determinar si és el que més convindrà a l'embarcació determinada. Una de les principals informacions que trobarem en el manual és el gràfic de potència nominal en funció de les revolucions en les que treballa el motor. Per a poder trobar un motor que s'ajusti a les necessitats d'una embarcació, el punt que s'hauria de fer segur que abastim és l'anomenat L₁ ja que és el punt de màxima exigència,



tant en revolucions com per potència subministrada. A continuació es mostrarà el gràfic. Es pot apreciar que les magnituds d'aquest estan expressades per cilindre, per tant, per poder realitzar els càlculs per a un motor concret, s'haurà d'adaptar al nombre de cilindres que tingui dit motor. En el cas del motor d'aquest treball, s'ha elegit un motor de 8 cilindres.

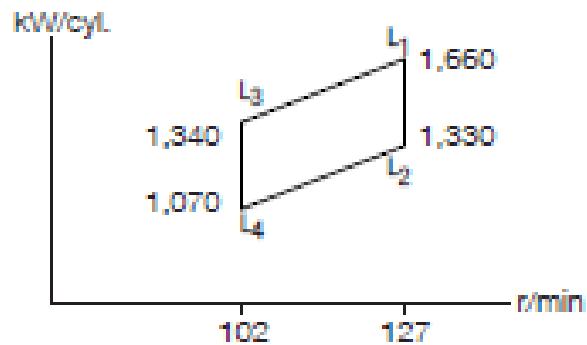


Figura 6: Gràfic de potències del motor seleccionat

A la imatge es pot veure com cada cilindre, en les revolucions màximes nominals, 127 rpm, pot proveir una potència de 1660 kW per cada un dels cilindres que tingui el motor. Com ja s'ha comentat, el motor de l'embarcació del treball té 8 cilindres i per tant, genera una potència nominal de 13280 kW com ja s'ha comentat.



6. Comerç marítim

6.1 Cabotatge: definició i explicació de les principals rutes

El cabotatge es defineix com el transport de mercaderies a través del territori d'un estat o país. Durant aquesta navegació l'embarcació va seguint la línia de costa sense allunyar-se'n massa de manera que en el moment de fer maniobres d'entrada al port es trobi en la millor situació per poder-les efectuar.

El nom de cabotatge sorgeix de temps enrere, en el qual les embarcacions que transportaven material necessaris pel dia a dia dels ports i navegaven de cap en cap del port. Els caps eren per senyalitzar l'entrada al port de les embarcacions.

Poc a poc, aquest tipus de navegació es va anar donant a conèixer i va anar augmentant tant la seva importància com el seu volum de transport. Al principi només transportava viviers pels treballadors que feien guàrdia a les afores dels ports i actualment transporten tota mena de càrrega, ja sigui en contenidors, rodada, a granel o líquida.

Per altra banda, degut a la internacionalització actual del món, una embarcació de cabotatge no només navega per aigües d'un estat, sinó que crea una ruta per diferents ports que són propers i en els quals existeix una gran demanda comercial. Un exemple clar de ruta de cabotatge és la del Mediterrani. Aquesta ruta inicia a les Illes Canàries i acaba al port de Barcelona. Durant aquest viatge s'atura a ports tan espanyols com estrangers com Algesires, Cádiz, Tarragona, Marsella o ports italians.

Com es pot apreciar la ruta que segueix no és limitada només a aigües o ports espanyols sinó que també toca ports del nord d'Àfrica.

Degut a aquesta gran evolució que ha patit el transport de mercaderies per rutes properes a la costa, actualment a l'estat espanyol hi ha més ús de les embarcacions de cabotatge que transport per carretera.

Tot aquest creixement que ha existit en aquests anys no ha quedat sense coneixement en els diferents organismes tant d'àmbits marins com comercials. Per crear consciència i poder prevenir qualsevol tipus de problema que es pogués generar els principals organismes legislatius i de normatives marítimes van prendre responsabilitat i van establir una sèrie de normatives plasmades tant a l'IMO, SOLAS i ISO.

A continuació es farà una breu descripció de les principals normes establertes per al comerç de cabotatge vigents en l'actualitat o que entraran en vigència en els pròxims anys però que ja han estat aprovades.

Cal dir que aquestes normes provenen d'organismes internacionals i per tant, s'apliquen d'igual manera arreu de tot el món. Per altra banda, de la mateixa



manera que cada país té la seva legislació pròpia referent a la navegació d'esbarjo, amb la navegació comercial passa el mateix.

Espanya té la seva pròpia normativa referent al mar i el transport de mercaderies en ell, encara que aquesta normativa és complementària i es guien de les normatives internacionals establertes pels organismes nombrats anteriorment.

6.2 Normativa SOLAS, ISO i normativa pròpia espanyola

Existeix una gran varietat de normativa referent al comerç marítim, ja sigui per regular mercaderies, trànsits, rutes, limitacions, etc. Aquest apartat del treball es centrarà en nombrar les normatives IMO, SOLAS i UNE principals referents al cabotatge. No s'entrarà molt en detall ja que l'objecte del projecte està basat en el tema de les emissions de gasos d'escapament i el cabotatge i tot el que l'envolta serà pres només com a context per donar a conèixer les condicions en les que es trobarà l'embarcació de la que es tracta al llarg del treball

Cal dir també que moltes normatives es subscriuen unes a altres, normalment les de l'organització més petita a les de la gran. Així doncs, algunes normatives que s'escriuran seran les mateixes per la IMO/ SOLAS com per la UNE, ja que la normativa espanyola s'ha adherit a aquesta normativa i la presa com a pròpia per aplicar-la al seu territori.

La definició de cabotatge ve definida legislativament al Decret de Presidència 2935/1966, capítol VIII, article 257 com a:

- “1. Navegación de cabotaje nacional es la realizada directamente entre puertos de las diversas partes del territorio español por buques nacionales.*
- 2. El carácter de navegación de cabotaje subsistirá siempre entre puertos españoles, aunque se extienda a otros extranjeros en el curso del viaje inicial y después de concluido éste.*
- 3. Perderá el carácter de navegación de cabotaje la realizada por buques despachados en dicho régimen cuando efectúen arribada voluntaria en puerto extranjero antes de finalizar el viaje inicial, y las mercancías nacionales que conduzcan se considerarán, a efectos fiscales, como procedentes del extranjero.”*

Com es pot veure en aquesta definició, el cabotatge té una limitació totalment estatal i nacional i en cas de que l'empresa naviera decideixi operar fora del país de manera voluntària i reculli mercaderia, aquesta serà tractada com estrangera quan es registri la seva entrada.



En aquesta mateixa normativa, a l'article 259 es pot veure quins territoris són presos com a nacionals, de manera que quedin definits els principals ports de cabotatge que correspondran a l'Estat Espanyol:

1. *“ Comercio de cabotaje, en relación con el régimen fiscal aduanero, es el que se realiza por mar, con mercancías nacionales o nacionalizadas, entre puertos de la Península e islas Baleares. Igualmente será comercio de cabotaje el de las mismas mercancías entre puertos canarios y el que se efectúe entre puertos de los Territorios Francos de Ceuta y Melilla.*
2. *Se asimilará a comercio de cabotaje el de salida, por vía marítima, de mercancías nacionales o nacionalizadas, desde cualquier parte del territorio nacional (Península e islas Baleares, Territorios Francos de Ceuta y Melilla, islas Canarias, Provincias de Ifni, Sahara y Guinea Ecuatorial), con destino a otra.*
3. *Como norma general, las citadas mercancías se considerarán en el puerto de destino como de importación o en tráfico asimilado a cabotaje, según que su introducción en la correspondiente parte del territorio nacional dé lugar a hecho imponible o no.”*

Com es pot llegir, hi ha territoris del nord d'Àfrica no pertanyents a Espanya que també són considerats territori nacional a l'hora de gestionar mercaderies per al cabotatge.

Una altra normativa relativa al comerç marítim de cabotatge publicada l'any 1992. Es va aplicar a tots els països nàutics europeus, excepte algun com Croàcia que es va adherir més tard. En aquesta normativa es definia la navegació de cabotatge i en ella s'establien els límits d'aquesta navegació.

A continuació veiem la transcripció de la normativa en la que s'anomena la definició de cabotatge i les excepcions que pot contenir la definició:

“Navegación de cabotaje es la que, no siendo navegación interior, se efectúa entre puertos o puntos situados en zonas en las que España ejerce soberanía, derechos soberanos o jurisdicción.”

Capítol IV, article 257:

1. La navegación de cabotaje con finalidad mercantil queda reservada a buques mercantes españoles, salvo lo previsto a este respecto en la normativa comunitaria. Excepcionalmente, cuando no existan buques mercantes españoles aptos y disponibles, y por el tiempo que perdure tal circunstancia, las empresas navieras españolas podrán ser autorizadas por el Ministerio de Fomento para contratar y emplear buques mercantes extranjeros para efectuar navegaciones de cabotaje.



2. La realización, con finalidad mercantil, de navegaciones de línea regular de cabotaje que, a tenor del artículo 8.4, se considere de interés público, se prestará de acuerdo con lo previsto en dicho artículo. El Ministerio de Fomento determinará los requisitos que deberán cumplir las empresas navieras en orden a acreditar su capacidad económica, así como la de los buques para poder dedicarse a este tipo de navegaciones.

3. A los efectos de esta ley, tendrán la consideración de línea regular aquellos servicios de cabotaje que, sin denominarse de tal modo, se oferten de forma general a los posibles usuarios y se presten en condiciones de regularidad, publicidad y contratación asimilables a los servicios regulares de cabotaje.

4. Lo dispuesto en este artículo no será de aplicación a las Comunidades Autónomas con competencia en materia de transporte marítimo cuando éste transcurra entre puertos o puntos de la misma Comunidad sin conexión con puertos o puntos de otros ámbitos territoriales.”

En aquesta mateixa llei es va establir que temporalment, una sèrie d'embarcacions no serien aptes per navegar dintre d'algunes zones:

“Artículo 6

1. Con carácter excepcional, estarán excluidos temporalmente de la aplicación del presente Reglamento los siguientes servicios de transporte marítimo prestados en el Mediterráneo y en las costas de España, Portugal y Francia:

- los servicios de crucero, hasta el 1 de enero de 1995.*
- el transporte de mercancías de interés estratégico (petróleo, productos derivados del petróleo y agua potable), hasta el 1 de enero de 1997.*
- los servicios efectuados por buques de menos de 650 TB, hasta el 1 de enero de 1998.*
- los servicios regulares de pasajeros y de transbordadores, hasta el 1 de enero de 1999.”*

A continuació s'adjunta la normativa referent a quins tràmits burocràtics estatals s'han de seguir i completar de manera que una embarcació estigui totalment coberta legislativament per poder desenvolupar l'activitat del cabotatge. Aquesta normativa es troba al Real Decret 1516/2007, article 3.



1. *“El establecimiento de líneas regulares de cabotaje en tráficos que sean competencia de la Administración General del Estado deberá ser comunicado a la Dirección General de la Marina Mercante con un plazo de antelación mínimo de quince días indicando los puertos en los que se pretenda operar y los datos que figuran en los puntos 1, 2 y 3 del anexo. Tales datos deberán ser actualizados cada vez que se produzca la inclusión o la sustitución de un buque en la línea. Asimismo deberá ser comunicado, con al menos 15 días de antelación, el abandono del servicio y cualquier cambio en los puertos del itinerario.*

2. *A la comunicación se acompañará documentación acreditativa de su condición de empresa naviera, de que los buques a adscribir a la línea o líneas tengan los certificados reglamentarios en vigor, cumplan los requisitos de seguridad aplicables de conformidad con la normativa internacional y comunitaria así como la nacional que se dicte al amparo de éstas y estén inscritos en los Registros en los que tal inscripción sea obligatoria para poder efectuar navegación de cabotaje en su país de bandera.*

3. *Toda la documentación que deba aportarse se acompañará de su traducción al castellano por intérprete jurado, si no viniese redactada en dicha lengua.*

4. *Si la Dirección General de la Marina Mercante, previo examen y evaluación de la documentación aportada, detectase omisiones, incumplimientos o errores los pondrá de manifiesto a los interesados y dará un plazo de diez días para que los subsanen o acompañen la documentación preceptiva, abriendo, en su caso, un período de prueba.*

5. *Si no se subsanasen las omisiones, incumplimientos o errores, la Dirección General de la Marina Mercante, mediante resolución motivada que se notificará al interesado, procederá a la inmediata paralización del servicio o prohibirá que el mismo llegue a iniciarse, todo ello durante el tiempo que perdure la omisión, incumplimiento o error, sin perjuicio de la imposición de las sanciones administrativas a que hubiera lugar.*

6. *La resolución mencionada en el punto 5 anterior agotará la vía administrativa.”*

Per altra banda, en aquest decret però en l'article 8 es defineix la periodicitat amb la qual s'han de realitzar, com a mínim, les activitats de cabotatge per poder ser considerades com a tal. Aquesta mesura es va prendre com a mesura per tal d'evitar que algunes embarcacions comercials esporàdiques es poguessin beneficiar de la normativa de cabotatge. Com es pot veure, la



normativa marca una regularitat en les rutes de treball bastant exigents si no es té una bona organització i logística comercial a l'empresa.:

“1. Las obligaciones de servicio público previstas en este artículo, que tienen carácter de mínimos, son las indicadas a continuación y para las líneas que igualmente se determinan:

a) Frecuencias mínimas de los servicios:

Línea Cádiz-Las Palmas y viceversa: 1 viaje semanal.

Línea Cádiz-Santa Cruz de Tenerife y viceversa: 1 viaje semanal.

Línea Barcelona-Palma de Mallorca y viceversa: 3 viajes semanales.

Línea Valencia-Palma de Mallorca y viceversa: 3 viajes semanales.

Línea Denia-Palma de Mallorca y viceversa: 3 viajes semanales.

Línea Barcelona-Ibiza y viceversa: 3 viajes semanales.

Línea Valencia-Ibiza y viceversa: 3 viajes semanales.

Línea Denia-Ibiza y viceversa: 3 viajes semanales.

Línea Barcelona-Mahón y viceversa: 3 viajes semanales.

Línea Valencia-Mahón y viceversa: 3 viajes semanales.

Línea Algeciras-Ceuta y viceversa: 3 viajes diarios.

Línea Málaga-Melilla y viceversa: 3 viajes semanales.

Línea Almería-Melilla y viceversa: 3 viajes semanales.

Las frecuencias señaladas deberán cumplirse bien de forma individual por cada una de las empresas prestatarias del servicio o bien colectivamente por el conjunto de todas ellas, mediante el oportuno compromiso de las mismas ante la Dirección General de la Marina Mercante. Asimismo, los trayectos podrían prestarse directamente o combinados entre sí.

b) Tiempo mínimo de los Servicios: El tiempo mínimo de prestación del servicio en las líneas regulares a que se refiere el apartado anterior será de dos años a contar del momento en que la línea haya iniciado o inicie su prestación. Transcurrido el tiempo mínimo de prestación del servicio, su titular podrá cesar en la prestación del mismo sin más requisito que notificarlo previamente a la Dirección General de la Marina Mercante con un plazo de antelación de un mes. La suspensión del servicio, imputable a quien lo presta, por el plazo



ininterrumpido de treinta días o de cuarenta y cinco días con interrupciones, computadas en un período de trescientos sesenta y cinco días consecutivos, se considerará abandono, lo que conllevará la imposición de la sanción administrativa que proceda.”

Aquestes són les principals normatives vinculades al tràfic de cabotatge marítim a la comunitat europea i a Espanya. Com ja s'ha comentat anteriorment, s'obvien una gran quantitat degut a la poca rellevància que tenen amb el fi del treball. Per a poder fer una petita síntesi de les normatives que s'han anomenat i les que no s'han comentat, es pot dir que les principals són les que es comenten a continuació:

- Per a que les activitats d'una embarcació siguin reconegudes com a activitat de cabotatge en un estat en concret, aquella embarcació ha d'estar subjecte al pavelló d'aquell país.
- La tripulació d'una embarcació ha de ser de la nacionalitat on es durà a terme el cabotatge o de la Comunitat Europea.
- El territori declarat per un país com a zona de cabotatge no ha de ser necessàriament pertanyent al país.
- Si una embarcació declarada com de cabotatge carrega o descarrega mercaderies en un port extern a la seva zona de cabotatge, dita mercaderia serà declarada com a importada o exportada (en el cas que convingui) i se li haurà d'aplicar la normativa pertinent internacional.
- S'establirà una mínima periodicitat per totes les rutes existents de manera que en cas de no arribar al mínim pertinent, aquella activitat no podrà ser considerada cabotatge.
- Si una empresa espanyola no disposa d'embarcacions amb pavelló espanyol, podrà fer servir altres de nacionalitat europea sempre i quan es presentin els pertinents documents a temps i la situació sigui circumstancial i temporal.
- Les embarcacions de cabotatge que carreguin mercaderia d'interès estratègic (petroli, gas, etc.) estaran subjectes a prohibicions de navegació o canvis de ruta per part de les autoritats pertinents.



7. Combustibles marins: evolució, composició, ús i tractaments

7.1 Història i evolució dels combustibles

Des de l'inici dels motors de combustió, s'ha buscat un combustible que pogués proporcionar un rendiment alt, que la seva elaboració o tractament no fos car i que un cop usat, es pogués tornar a fer servir.

A l'inici de la història dels combustibles tenen gran protagonisme els combustibles fòssils, en concret, el carbó. Aquest mineral s'extreia i s'extreu de les mines per més tard fer-lo servir com a combustible per cremar. Degut al gran poder calorífic del carbó quan aquest es sotmet a gran temperatura, desprèn una quantitat de calor o energia que es pot fer servir per a escalfar aigua o aire, en funció del sistema que faci servir la màquina. Com es pot veure, aquesta descripció marca el funcionament d'una màquina de vapor o, dit més genèricament, una màquina de combustió externa.

Un altre combustible que es feia servir a l'inici de les màquines era l'oli i els greixos. Aquests podien ser obtinguts a partir dels greixos d'animals o vegetals. Els processos que es seguien per a obtenir-los eren lents i ocupaven molt espai, ja que s'havien de tenir grans tancs per decantar els líquids o purificar-los. Per altra banda, el fet de que la seva obtenció depengués dels orígens vegetals o animals, la feia més vulnerable als canvis climàtics o de la demanda de les poblacions. L'oli que s'extreia es feia servir com a combustible degut a que al ser cremat desprenia energia. Com es va veure més tard, l'oli era la més ineficaç de les opcions que existien però a la vegada la més assequible, així que no va caure en desús. Aquest material es va anar especialitzant per a usos domèstics com poden ser espelmes o làmpades o com a element important de la cuina. Actualment, l'oli està tornant a entrar en el pla dels combustibles per a automòbils degut a la gran investigació que s'ha portat a terme amb ell, a l'alt preu que el petroli està tenint i al més que inevitable esgotament de les existències d'aquest en un futur no molt llunyà.

Un altre material que es feia servir com a combustible però que va tenir molt poca acceptació al món dels motors de combustió degut al seu reduït poder calorífic va ser la fusta. La fusta ha estat un material molt present des de l'inici de la història de l'home degut a la seva gran abundància.

Temps enrere, l'explotació d'un combustible o un altre depenia fortament del punt geogràfic en el que cadascú es trobés. Des de fa temps hi ha diferents punts arreu del món reconeguts internacionalment com a grans productors de carbó. Per altra banda, els olis vegetals i animals depenen de les races i espècies dels quals s'extreu, per tant, també guarden una gran relació amb la gran diversitat animal que es reparteix per tot el món.



Amb el pas del temps i l'evolució de les màquines es va descobrir que el carbó era un combustible útil però que si es volia aconseguir uns millors rendiments i, més important, una potència útil major, s'hauria de buscar una font d'energia amb un poder calorífic més alt.

Per tant, era qüestió de temps que es trobés una nova font d'energia més eficaç i útil per totes les màquines i motors que es feien servir.

El petroli o cru és una font d'energia que és molt difícil de trobar a la superfície, quasi la totalitat de les existències que hi ha a la Terra es troben sota terra i a una gran distància de la superfície. És per això que l'ús del petroli no s'ha estès fins fa relativament poc temps.

A l'inici, els egipcis i els fenicis feien servir les reserves de cru que existien a la superfície per encendre làmpades o llums, com a lubricant per a les rodes de les carretes o com a material per portar a terme el calafatejat de les embarcacions. Evidentment, la falta de tecnologia, medis i coneixement feia que no poguessin ni imaginar el potencial que tenia aquell material.

Després d'aquestes civilitzacions, el cru va caure en l'oblit i el seu ús va deixar de ser inclús testimonial.

Amb l'evolució tecnològica també van anar evolucionant les expectatives i les exigències sobre les màquines i els seus rendiments, per tant, era qüestió de temps que es plantegés seriosament la recerca i l'obtenció d'una nova font d'energia.

L'ús del cru es va començar a fer servir durant la revolució industrial del S. XIX. L'evolució de la tecnologia va provocar una gran millora en els aparells de localització i extracció d'aquest líquid.

Aquest cop sí que es va saber entreveure el gran potencial que tenia aquest material i es van dedicar recursos a la seva investigació i a la millora de les tècniques de detecció i extracció. El primer pou petrolífer fabricat va ser a l'any 1859 als Estats Units d'Amèrica, prop de Oil Creek (Pennsylvania) per part de Edwin Drake. Va ser un pou poc profund (21.2m) i el petroli que hi havia en aquell jaciment era de tipus parafínic, molt fluid i fàcil de destil·lar. Aquest punt va marcar la inflexió de la indústria petroquímica, ja que a partir d'allà, sempre que es necessitava una font d'energia útil i eficaç es recorria al petroli.

El punt de màxima demanda i investigació mundial per al petroli i, en concret, la gasolina, va ser amb la creació del motor de combustió interna (1853). Aquestes dues innovacions juntes van suposar un punt remarcable a la història dels motors i dels automòbils. En poc temps, tots els automòbils van passar a tenir un motor de combustió interna propulsat per gasolina provinent del petroli. Els trens, en canvi, van seguir fent servir el carbó com a combustible. La tecnologia implantada i moderna es va acabar establint degut a la Primera Guerra Mundial. Durant la guerra, l'ús dels automòbils i altres vehicles dedicats a la guerra com els avions i els tancs, era constant i, per tant, es necessitava



que aquestes màquines disposessin de la millors de les tecnologies amb les millors eficiències.

Aquesta constant necessitat de millora i augment de les exigències que es dipositaven sobre les màquines, en gran part provinents dels departaments bèl·lics dels països que entraven en guerra, va provocar que el petroli, el seu ús i la tecnologia relacionada tingués un creixement exponencial.

A continuació, es farà un petit esquema en el que es detallarà l'evolució que ha seguit l'ús del petroli, les seves tècniques d'extracció i els seus principals usos.

- Període prehistòric i època medieval: es fa servir el cru que es troba en reserves de la superfície. Els usos que se li donen són quotidians i encara no mostren la gran utilitat i valor que té el cru en segles posteriors. Es fa servir el petroli com a combustible per encendre les torxes, per a lubricar les rodes de les carretes i com a líquid per a fer estanques les embarcacions que es construïen aleshores. Hi ha indicis que mostren que en alguns punts d'Àsia es podrien haver realitzat excavacions de manera que s'extreia el cru de sota la superfície, però són uns indicis que encara estan per confirmar. Alimenten aquestes creences el fet de que s'han trobat eines i descripcions d'eines per realitzar perforacions a la terra i extreure líquids. Evidentment, el gran nombre d'opcions que descriu l'ús d'un objecte així no permet assegurar res. Per altre banda, la pèrdua de l'interès pel cru i les seves aplicacions en les èpoques posteriors demostra que no es va saber obtenir un ús tan positiu com per a seguir investigant.
- 1800-1900: El pou obert per Edwin Drake a USA l'any 1853 marca un punt inicial en el llibre històric del petroli que s'anirà ampliant de forma molt notable en els següents anys. L'any 1881, Cuba descobreix 4 pous d'extracció nous i abans d'acabar el segle, una zona en la que s'extreu nafta a menys de 300m de profunditat. Aquest explosió que va tenir la recerca i l'extracció de petroli des de diferents punts del món va provocar un gran nombre d'innovacions al món tecnològic i sobretot en el motors de combustió degut a les noves possibilitats que oferien les propietats i l'abundància del cru.
- 1900-1945: Període més remarcable pel que fa a descobriments relacionats amb el petroli. Durant aquesta època els principals països punters del món van dedicar departaments de científics exclusivament a la recerca, a l'explotació i a la investigació sobre aquest nou producte. L'esclat de la Primera Guerra Mundial l'any 1914 va provocar que totes les investigacions i innovacions que cada país havia estat fent i que tan gelosament havien estat guardant,



sortissin a la llum de manera que els hi poguessin oferir una mínima avantatge davant dels països enemics. Al finalitzar la guerra, els serveis d'investigació científica dels països que havien participat, havien pres idees de tecnologies d'altres països i es van proposar millorar-les per tal d'aconseguir un millor rendiment a les maquinàries o les aplicacions. Per tant, quan l'any 1939, va iniciar la Segona Guerra Mundial, les tecnologies de cada país ja estaven bastant globalitzades, encara que cadascuna mantenia algun tipus d'innovació pròpia del servei científic del seu país.

Aquestes dues guerres van ser molt productives a nivell tecnològic i d'investigació, ja que tots els països que hi participaven dedicaven el màxim dels seus recursos disponibles en investigar com trobar una màquina millor, més eficient i que els hi pogués donar una lleuger avantatge sobre el país enemic. Així, l'any 1931, Braun Corporation presentava un hidròmetre que permetia saber si podia haver indicis de trobar petroli en una superfície concreta. L'any 1931 apareix el viscosímetre Stonner que va tenir molta popularitat en el seu moment però que més endavant va quedar relegat per nous models més moderns i més precisos.

- 1945-1965: Aquests anys es van anomenar "període experimental" degut al gran nombre d'investigació i experimentació que es van dedicar al petroli i derivats i a la seva extracció. Durant aquest període no es van donar masses canvis en el que a l'extracció es refereix, ja que pràcticament es fa servir el mateix mètode i mitjançant pràcticament el mateix procés, però si es va notar un gran avenç en el que a acondicionament i zones d'extracció es refereix. Es van instaurar les plataformes petrolíferes a alta mar i es van preparar bucs per a realitzar extraccions i també per a poder-lo transportar. La destrucció de la barrera del mar va comportar un augment molt notable del volum de petroli que s'extreia al cap de l'any. Per altra banda, aquestes zones a alta mar productores de petroli van revaloritzar-se a l'alça de manera molt exagerada i això va comportar disputes entre països per a fer-se amb la propietat d'aquestes aigües internacionals i que abans restaven oblidades. Alguns d'aquests conflictes encara estan per resoldre i normalitzar la situació.
- 1965-actualitat: en aquests anys l'extracció de petroli ha tingut millores en el que l'extracció respecta. Actualment s'han reduït els temps de perforació degut a la millora de les barrines de perforació i als olis lubricants de perforació que s'utilitzen. Aquestes millores en les barrines de perforació permeten que es realitzi la perforació més ràpid i que no s'hagin de substituir tan sovint, el qual agilitza les operacions de manera notable.



- Futur: Hi ha previstes millores tecnològiques pel que fa l'extracció i els tractaments sobre el cru. D'altre banda, cada cop s'està dedicant menys recursos a la investigació sobre aquest fluid ja que les seves existències són limitades i no es té previsió de que les reserves que es calcula que existeixen donin pel subministrament de masses anys més.

Aquestes han estat explicades breument les diferents etapes per les quals ha avançat el petroli i el comerç que ha anat lligat amb ell des de l'inici.

7.2 Enumeració i descripció dels principals combustibles marins

A mesura que ha anat passant el temps i que la ciència, els descobriments i el coneixement han anat evolucionant, ha estat possible crear uns combustibles més acurats i eficients per cada un dels usos que se'ls hi volen donar. Actualment existeixen milers de combustibles diferents que comparteixen la essència però que contenen detalls que fan que siguin totalment especialitzats per a un ús concret. Per exemple, el combustible que es pot fer servir en una embarcació no serà el mateix que el que es fa servir en un cotxe. Dintre del món naval també existeixen especialitzacions, per exemple, el combustible de gasoil que pot fer servir un petrolier mai serà igual que el que faci servir un velero o una embarcació d'esbarjo.

Per poder tenir un control i un reconeixement sobre els tipus de fuel-oil que es fan servir al món, existeix una classificació que facilita poder discernir cada combustible en funció de les seves característiques principals com són: punt d'ebullició, composició i ús. També entra en consideració la longitud de la cadena de carboni i la viscositat del combustible. Un combustible amb una cadena de carbonis més llarga és més pesada i s'ha d'escalfar més temps per tal de que pugui fluir per a ser utilitzada. Les classes de combustible que existeixen són les següents, s'ordenen en números del 1 al 6:

- Número 1: té propietats semblants al querosè i és el més lleuger de tots. El seu punt d'ebullició es troba just passat el de la gasolina.
- Número 2: és el combustible que fan servir els motors dièlsels. Es fa servir en l'automoció, en vehicles de fins a tonatges petits i en maquinària. Aquest fuel és el que es fa servir també en les calefaccions que es tenen a les llars domèstiques.
- Número 3: combustible poc usat degut a les seves propietats. No és un combustible molt lleuger ni tampoc és dels tipus pesats. El seu punt d'ebullició és a una temperatura mitjana i la seva viscositat és alta en funció del poder calorífic que aporta.



Figura 7: Senyal de càrrega de Fuel Oil tipus 3

- Número 4: És una barreja entre fuel-oil destil·lats i residuals. Normalment format a partir de la barreja de tipus 2 i 6, encara que a vegades és només un destil·lat fort. Pot ser classificat tant com a dièsel, com a destil·lat o com a residual.
- Número 5: tipus de fuel-oil residual que necessita d'un precalentament a una temperatura compresa entre 77°C i 104°C per a obtenir una millor atomització als cremadors. També es conegut com Bunker B. A vegades també es barreja amb fuel de tipus 2 de manera que la seva viscositat disminueix i no cal precalentar-lo per a que pugui ser bombat.
- Número 6: És un fuel-oil residual molt viscos i que necessita un precalentament més elevat que el número 5 (entre 104°C i 127°C). Al ser residual els components del fuel més efectius ja han desaparegut degut a la sèrie de destil·lacions que ha patit. Normalment conté un percentatge petit d'aigua i minerals. Aquest fuel és conegut també com a tipus Bunker C.

Un fuel-oil residual barrejat amb fuel destil·lat és anomenat fuel-oil lleuger, mentre que un destil·lat barrejat amb un residual s'anomena pesat.

Aquesta és la classificació existent a l'hora de diferenciar els fuels, però quan parlem de fuels que es faran servir en el món marítim també es fan servir altres noms i altres classificacions. Aquestes són les següents:

- **MGO (Marine gas oil):** seria el fuel equivalent al número 2. Només destil·lat un cop.
- **MDO (Marine diesel oil):** Una barreja de gasoil pesat que té una baixa viscositat de manera que necessita un precalentat abans de que es faci servir.
- **IFO (Intermediate fuel oil):** Barreja de gasoil i fuel oil pesat, però amb menys gasoil que el dièsel marí.
- **HFO (Heavy fuel oil):** Purament fuel oil residual. És l'equivalent al fuel oil número 6.



Tenint en compte aquestes classes de fuel que existeixen, les embarcacions faran servir un tipus o un altre en funció del seu propòsit, tipus d'embarcació i legislació vigent del lloc geogràfic on naveguen.

Com és lògic, no tots els combustibles poden ser usats en les embarcacions, existeix una legislació internacional que els regula i assegura que es tingui cura de preservar el medi ambient i garanteix una sostenibilitat en aquest camp. La normativa que les empreses de combustibles han de seguir ve descrita a la ISO 8217-2010. En aquesta normativa es defineixen una sèrie de paràmetres i en ells es mostren els valors màxims i mínims en els quals s'ha de trobar el fuel per a que pugui ser usat en un motor marítim i la classificació que li atorga la societat de classificació en funció del valor que tinguin dits paràmetres. Com és lògic i ja hem explicat, no tots els fuel-oil són iguals i per tant, existeix una diferenciació en els rangs acceptables del fuel destil·lat i els residuals. A continuació s'adjunten les taules en les que es mostren els límits establerts en funció de la classificació que la societat dona a cada fuel. Existeix una taula de valors per als fuel oils destil·lats i una altra per als fuel oils residuals. Al final s'inclou un resum del que signifiquen les mesures a tenir en compte.



Characteristics	Unit	Limit	Category ISO-F-				Test method reference	
			DMX	DMA	DMZ	DMB		
Kinematic viscosity at 40°C ^a	mm ² /s	max.	5,500	6,000	6,000	11.00	ISO 3104	
		min.	1,400	2,000	3,000	2,000		
Density at 15°C	kg/m ³	max.	–	890.0	890.0	900.0	see 7.1 ISO 3675 or ISO 12185	
Cetane index	–	min.	45	40	40	35	ISO 4264	
Sulfur ^b	mass %	max.	1.00	1.50	1.50	2.00	see 7.2 ISO 8754 ISO 14596	
Flash point	°C	min.	43.0	60.0	60.0	60.0	see 7.3 ISO 2719	
Hydrogen sulfide ^c	mg/kg	max.	2.00	2.00	2.00	2.00	IP 570	
Acid number	mg KOH/g	max.	0.5	0.5	0.5	0.5	ASTM D664	
Total sediment by hot filtration	mass %	max.	–	–	–	0.10 ^a	see 7.4 ISO 10307-1	
Oxidation stability	g/m ³	max.	25	25	25	25 ^f	ISO 12205	
Carbon residue: micro method on the 10% volume distillation residue	mass %	max.	0.30	0.30	0.30	–	ISO 10370	
Carbon residue: micro method	mass %	max.	–	–	–	0.30	ISO 10370	
Cloud point	°C	max.	-16	–	–	–	ISO 3015	
Pour point (upper) ^d	winter quality	°C	max.	-1	-6	-6	0	ISO 3016
	summer quality	°C	max.	-1	0	0	6	ISO 3016
Appearance	–	–	Clear and Bright ^a			**a	see 7.6	
Water	volume %	max.	–	–	–	0.30 ^a	ISO 3733	
Ash	mass %	max.	0.010	0.010	0.010	0.010	ISO 6245	
Lubricity, corrected wear scar diameter (wsd 1.4) at 60°C ^e	µm	max.	520	520	520	520 ^g	ISO 12156-1	

Taula 7: Taula de requisits per al fuel-oil destil·lat

En la taula mostrada al superior veiem les diferents classificacions i els diferents paràmetres que s'usen per a determinar quina qualificació se li atribuirà. A continuació s'explica el significat de les 4 classes que existeixen.

DMX: És un destil·lat especial més lleuger i que només s'utilitza en els motors dissenyats per a ser usats en cas d'emergència. Per tant, motors de poc ús i que en principi romandran temps sense que siguin utilitzats.

DMA: El DMA també és conegut com MGO (Marine Gas Oil) és un combustible destil·lat per a qualsevol tipus d'ús que no conté fuel residual, o sigui que és



totalment pur. Tant el DMA com el DMX són combustibles que s'acostumen a utilitzar quasi sempre en motors marins de categoria 1, els quals tenen un volum inferior a 5 litres per cilindre.

DMB: El DMB, també conegut com MDO (Marine Diesel Oil), és un tipus de combustible en el qual està permesa la presència de fuels residuals que, a més, poden tenir un alt contingut de sofre. La contaminació d'aquest combustible amb els residuals es produeix en el moment de la càrrega de combustible a bord, ja que es fan servir les mateixes vies (mànegues) que es fan servir en altres embarcacions i per tant, es contamina. Aquest combustible es fa servir en motors de categoria 2 (volum de 5-30 litres per cilindre) i en motors de categoria 3 (volums superiors a 30 litres per cilindre).

DMZ: És un tipus de fuel igual que el DMA amb les mateixes característiques per al fuel marí però que té el mínim de viscositat acceptada una mica més elevat .

Aquests són les 4 principals classificacions per al fuel que existeixen i que s'usen en el món naval. A continuació s'explicaran en que consisteixen els paràmetres normalitzats i els seus màxims i mínims. En la taula superior, % m/m vol dir percentatge de massa de solut sobre la massa de la dissolució.

Viscositat a 40°C: Aquest paràmetre s'ha de tenir en compte sobretot a l'hora de bombar el fuel a través de las línies de distribució ja que si és molt viscos perd efectivitat i si és molt viscos es necessiten pre-escalfaments abans de bombejar-lo per tot el circuit.

Densitat a 15°C: La viscositat i la densitat són dos paràmetres que van sempre molt lligats. En aquest cas, igual que amb la viscositat la densitat és molt important ja que un volum concret de combustible que tingui un pes molt elevat serà molt complicat de bombejar per les vies i durant el procés de barreja.

Índex de cetà: Aquest paràmetre té una importància destacada ja que és el que marca l'espai de temps que separa l'entrada de combustible al cilindre fins que es dona l'explosió. També guarda molta relació amb aquest índex la qualitat de la combustió i la totalitat de la crema de tot el combustible injectat. Aquest paràmetre exigeix un mínim ja que com més alt sigui el valor, més ràpida i de més qualitat serà l'explosió.

Sofre: El sofre és un element químic molt nociu després de ser cremat pels gasos d'escapament que produeix. Per això es limita la quantitat de sofre màxim que pot tenir un combustible de manera que els gasos que emeti es mantinguin dintre dels límits sostenibles.



Punt de combustió (flash point): El punt de combustió marca la temperatura mínima a la que ha d'estar el combustible per a que es pugui encendre i produir una explosió. Aquesta propietat és important ja que un punt de combustió baix pot portar a explosions dintre del motor descontrolades i fora de temps, mentre que un punt d'explosió a una temperatura molt alta pot provocar dificultats a l'hora d'encesa.

Sulfur d'hidrogen o àcid sulfhídric: L'àcid sulfhídric és un element a tenir molt en compte en la composició del fuel. Aquests components generen uns vapors àcids que en el cas de que existeixi una condensació i passin ser líquid o vapor precipitat, poden atacar químicament els components metàl·lics del motor i fer-lo envellir deu vegades més ràpid i reduir la seva efectivitat d'una manera molt destacada. És per això que es marca un valor màxim per aquesta sal que no conté oxigen.

Nombre àcid: El nombre àcid és la quantitat de base d'una molècula expressada en mil·ligrams d'hidròxid de potassi que necessita per neutralitzar tots els components àcids que es troben en un gram de mostra. Els fuels amb un alt nombre àcid poden causar uns danys considerables en els components del motor i en especials en els equips d'injecció degut a que necessiten molta quantitat d'hidròxid de potassi per neutralitzar els components àcids que existeixen en el fuel i per tant, en la barreja.

Estabilitat d'oxidació: En qualsevol fuel existeix una característica química anomenada estabilitat. Aquest paràmetre mesura si la reacció es troba equilibrada químicament. El paràmetre d'estabilitat és molt important ja que un fuel que s'oxida pot formar coàguls que poden obstruir les canonades o els filtres. És per això que es marca un nombre màxim que garanteix que les reaccions químiques que podran tenir lloc amb el combustible mai no arribaran a generar partícules sòlides o viscoses que puguin obstruir o taponar algun dels diferents components del circuit.

Residu de partícules de carbó en un 10% de residu: Aquest paràmetre es fa servir de manera que serveix per avaluar la qualitat del fuel i així evitar problemes tant en la combustió i la barreja del combustible com a l'hora de donar sortida als gasos d'escapament. En el fuel tipus DMB no existeix un valor màxim establert, el qual dóna llibertat en quant a la quantitat de residus de carbó que pot contenir.

Punt d'enterboliment (cloud point): Tots els combustibles dièsel contenen un percentatge de parafina a la seva composició. Aquesta parafina a partir d'una determinada temperatura emulsiona amb l'aigua i ja no es pot dissoldre de



manera que es queda en suspensió al gasoil i pot provocar l'obstrucció dels filtres i de les canonades.

Punt de solidificació (pour point): Aquesta temperatura marca el punt en el que el líquid comença a augmentar la seva viscositat. Aquesta propietat es limita en el màxim ja que si la temperatura augmentés, augmentaria la viscositat i apareixeria el problema comentat anteriorment. Com es pot veure a la taula, es diferencia el punt de solidificació a l'estiu i a l'hivern. Això es deu a la diferència de condicions tèrmiques en les que es pot trobar el combustible en funció de l'època de l'any en la que es trobi.

Aparença: Una de les formes d'inspecció més bàsiques i primàries és la inspecció visual. En aquesta inspecció es tracta de poder trobar un diagnòstic ràpid de l'estat del material a analitzar. D'aquesta manera, la normativa exigeix que l'aparença que ha de tenir el fuel-oil de forma que es trobi en condicions òptimes de treball és aquella en que el combustible és clar i brillant.

Aigua: Una gran quantitat d'aigua en un combustible redueix la qualitat d'aquest i dificulta la mescla i la combustió.

Cendra: Conegut vulgarment com "carbonilla". Els residus que es generen de la combustió del combustible i que es cremen i es queden dintre dels components dels motors poden generar un baix rendiment, averies i fins i tot el trencament d'un motor. Per això, existeixen uns màxims de cendra que el combustible pot generar durant la combustió que, juntament amb un manteniment adequat, garantirà el bon funcionament del motor.

Lubricitat: La lubricitat és una propietat molt important en qualsevol màquina mecànica ja que assegura un bon funcionament dels components i possibles danys a les peces dels motors per sobreescalfaments, trencaments, fissures o altres tipus d'averies mecàniques.

Com és lògic, tots aquests paràmetres s'han de sotmetre a unes inspeccions i revisions de manera periòdica de tal manera que es pugui certificar i classificar conforme aquell combustible compleix les condicions òptimes per treballar i que manté la classificació que se li va assignar en la última inspecció. Per aquesta raó, a la taula, cada paràmetre té escrit el mètode de certificació que s'ha de seguir.

La taula 7 descriu la sèrie de paràmetres pel qual es governa el fuel destil·lat. A continuació es mostra la taula 8 que regeix els paràmetres dels fuels residuals.



Characteristics	Unit	Limit	Category ISO-F-										Test method reference		
			RMA	RMB	RMD	RME	RMG				RMK				
			10 ^a	30	80	180	180	380	500	700	380	500		700	
Kinematic viscosity at 50°C ^b	mm ² /s	max.	10.00	30.00	80.00	180.0	180.0	380.0	500.0	700.0	380.0	500.0	700.0	ISO 3104	
Density at 15°C	kg/m ³	max.	920.0	960.0	975.0	991.0	991.0				1010.0			see 7.1 ISO 3675 or ISO 12185	
CCAI	-	max.	850	860	860	860	870				870			see 6.3 a)	
Sulfur ^c	mass %	max.	Statutory requirements										see 7.2 ISO 8754 ISO 14596		
Flash point	°C	min.	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0				60.0			see 7.3 ISO 2719	
Hydrogen sulfide ^d	mg/kg	max.	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00				2.00			IP 570	
Acid number ^e	mg KOH/g	max.	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5				2.5			ASTM D664	
Total sediment aged	mass %	max.	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10				0.10			see 7.5 ISO 10307-2	
Carbon residue: micro method	mass %	max.	2.50	10.00	14.00	15.00	18.00				20.00			ISO 10370	
Pour point (upper) ^f	winter quality	°C	max.	0	0	30	30	30				30			ISO 3016
	summer quality	°C	max.	6	6	30	30	30				30			ISO 3016
Water	volume %	max.	0.30	0.50	0.50	0.50	0.50				0.50			ISO 3733	
Ash	mass %	max.	0.040	0.070	0.070	0.070	0.100				0.150			ISO 6245	
Vanadium	mg/kg	max.	50	150	150	150	350				450			see 7.7 IP 501, IP 470 or ISO 14597	
Sodium	mg/kg	max.	50	100	100	50	100				100			see 7.8 IP 501 IP 470	
Aluminium plus silicon	mg/kg	max.	25	40	40	50	60				60			see 7.9 IP 501, IP 470 or ISO 10478	
Used lubricating oils (ULO): calcium and zinc; or calcium and phosphorus	mg/kg	-	The fuel shall be free from ULO. A fuel shall be considered to contain ULO when either one of the following conditions is met: calcium > 30 and zinc > 15; or calcium > 30 and phosphorus > 15										see 7.10 IP 501 or IP 470 IP 500		

Taula 8: Taula de requisits per al fuel-oil residual

De la mateixa manera que s'ha procedit en la taula anterior, en aquesta es procedirà en explicar les diferències existents entre cada un dels fuels anomenats i posteriorment a descriure els paràmetres de mesura de dits fuels i el perquè dels seus valors.

RMA: També anomenat dièsel marí mesclat. Catalogat com a material inflamable de categoria 4 de color negre i que desprèn olor a petroli. Pot



reaccionar químicament amb àcids forts o agents oxidants agressius com clorats, nitrats i peròxids. És considerat un material estable químicament i s'ha de mantenir allunyat de les altes temperatures, el foc o les guspies, ja que és altament inflamable. Té una viscositat similar al DMB però el contingut de sofre permès és superior ja que escala fins al 3.5%. Aquest combustible és útil per propulsar tipus d'embarcacions ràpides i tot tipus d'unitats auxiliars, ja siguin elèctriques com mecàniques.

RMB: També anomenat Bunker Fuel. Catalogat com a material inflamable de categoria 4 de color negre i amb olor a petroli. Com el RMA pot reaccionar químicament amb clorats, nitrats i peròxids. Considerat potencialment perillós ha de ser manipulat amb els equips necessaris i per persones amb una formació específica.

RMD: Fuel produït de manera que té un baix punt de solidificació baix de manera que es fa servir en vaixell que no tenen la capacitat de realitzar un preescalfament al combustible

RME: Anomenat comercialment Intermediate Fuel Oil tipus RME 180, produït a partir de fraccionar fuel fort o de classe mitjana i obtingut a la primera o segona etapa de processament del fuel. És un fuel que només té ús en els motors navals o per a usos molt específics.

RMG: Anomenat comercialment Marine Fuel Oil tipus RMG 380. L'obtenció d'aquest combustible és igual a la del RME. L'ús d'aquest combustible està reservat principalment a motors marins. Aquest combustible es presenta sempre amb una densitat de 380 cSt i és un dels més comercials degut al seu preu i la seva eficiència.

RMK: Aquest combustible és molt semblant al RMG amb la diferència de la densitat i la viscositat. Embarcacions més modernes amb motors més potents i capaces d'acceptar combustibles més viscosos i densos són les que usen aquests combustibles ja que és més barat i per tant, a la llarga representa un benefici econòmic.

Igual que en la taula mostrada anteriorment, en aquesta també es nombra el mètode normalitzat i estandarditzat pel qual s'han de realitzar les avaluacions de qualitat pertinents a cadascun dels paràmetres.

8. Procés de combustió d'un motor marí

El procés que segueix a nivell químic, físic i mecànic un motor de combustió interna marítim és el mateix que segueix qualsevol altre motor de combustió interna. Com ja s'ha explicat anteriorment els motors de combustió interna alternatius marins tenen un tipus d'arquitectura diferent a la gran majoria i es deu a les característiques d'ús que tenen aquests motors.

Els motors marítics d'embarcacions de gran tamany són, la gran majoria, de 2 temps i de fuel-oil. També acostumen a tenir un plançó de manera que el moviment alternatiu es prolonga i evita que el moviment circular excèntric de la biela tingui un major diàmetre i així redueix l'espai ocupat pel mecanisme. Per altra banda, degut també al gran volum dels components del motor, no és possible que aquests tinguin una velocitat de gir molt elevada. Aquest és el motiu per el qual els motors de combustió marítima que propulsen els bucs de càrrega no superen les 100 rpm i molts d'ells es mantenen en les 80 rpm d'ús nominal. L'explicació física que justificaria el perquè d'aquestes velocitats de gir és que els components mòbils d'un motor marí poden arribar a pesar tones, de manera que en cas de que un motor d'aquestes característiques girés a la velocitat d'un motor terrestre, la força d'inèrcia que es generaria seria tan gran que no hi hauria material resistent per a suportar els esforços que es generarien, o el material tindria un cost massa alt com per destinar-lo a construir aquests motors.

Un cop explicada una de les principals característiques dels motors marítics es procedirà a explicar el procés que segueix un motor durant el seu procés de funcionament.

A continuació es mostra una il·lustració en la que es pot veure el procés detallat que segueix un motor de 2T en tots els seus cicles, des de l'admissió fins l'escapament.

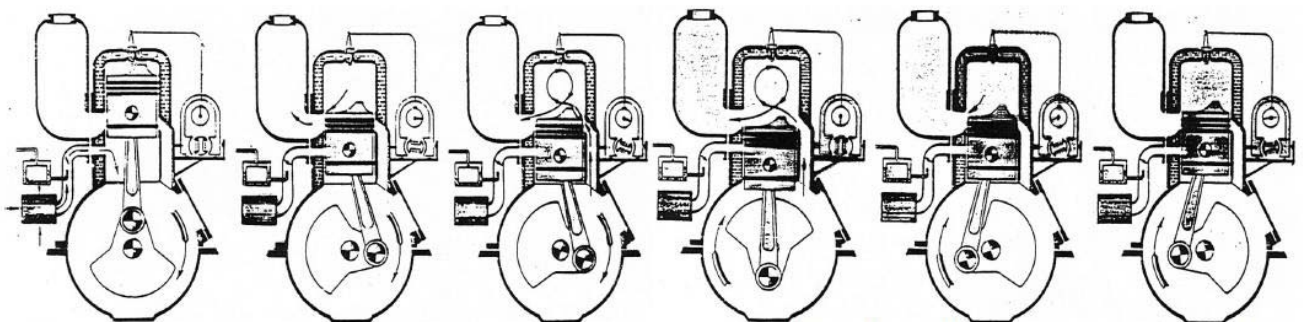


Figura 8: MCI 2 temps i gasolina

En la figura 8 podem veure el dos temps que componen el nostre motor, representat en 6 il·lustracions. Les tres primeres imatges ocorren de manera



successiva i corresponen al primer temps i les tres últimes són part del segon temps. L'arquitectura d'aquests motors és molt senzilla ja que en gran part és comuna amb els motors de 4 temps i els dièsel. El motor de la imatge pertany a un motor de 2 temps i gasolina, pel que provoca que necessàriament hi hagi una bugia que produeixi la guspira. Per altra banda, en aquest tipus de motors no existeix una vàlvula d'admissió sinó que hi ha una llumenera. Una llumenera és un espai que existeix en un dels costats del cilindre i que comunica l'interior del pistó amb l'exterior. A l'exterior d'aquest es troba el combustible barrejat amb aire i junt amb el moviment alternatiu del pistó, el cap d'aquest permet l'entrada de la barreja a la zona inferior del càrter. Per tant, podem dir que el mateix pistó és el que s'encarrega de l'admissió. Al costat oposat d'on es troba la llumenera però situat més amunt, es troba l'escapament dels gasos. Per aquest orifici es per on els gasos que es generen de la combustió es deixen escapar per tal de lliurar la cambra de combustió dels gasos residuals de la combustió anterior. Moltes vegades, aquest gas d'escapament es fa passar a través de turbocompressors de manera que s'aconsegueix subministrar una sobrepressió a l'aire d'entrada de la següent mescla de manera que aquesta major pressió ajuda a aconseguir una combustió més ràpida (el motor de la imatge mostrada anteriorment no està equipat amb el turbocompressor que s'acaba d'anomenar).

En el cas d'un motor 2 temps propulsat amb dièsel, l'arquitectura del motor seria molt semblant amb la diferència de que no existeix una llumenera d'entrada de combustible i que no trobem una bugia que serveixi per iniciar la combustió. Igual que en el motor de gasolina, en aquest no existeix una vàlvula d'admissió, l'entrada de combustible es realitza a través d'un inductor situat a la part superior de la cambra de combustió. El procés que segueix és el següent:

- 1er temps: L'aire destinat a formar part de la mescla entra dins de la cambra de combustió aprofitant que el pistó es troba en el punt mort inferior i deixa la llumenera oberta. Simultàniament a l'entrada d'aire nou, l'aire cremat de la combustió anterior es desallotja per la vàlvula d'escapament que es troba a la part superior del cilindre.
- 2on temps: El pistó segueix el seu moviment alternatiu i puja de manera que el cap exerceix una pressió contra l'aire nou que ha entrat i el comprimeix contra l'estructura superior del cilindre. En el moment en que la compressió és la indicada, l'injector subministra la quantitat de combustible adequada a la cambra de combustió i la temperatura assolida per l'aire en la compressió provoca la combustió i generen el moviment alternatiu que més tard serà transformat en un circular gràcies a la biela i el cigonyal.



A continuació es mostra la figura 9 on es poden veure amb claredat les dues estacions del funcionament d'aquest tipus de motor. Com es pot veure, en l'entrada de l'aire (esquerra del dibuix) es troba un mecanisme que es fa servir per a poder introduir l'aire net a dins del cilindre amb una pressió superior de manera que la combustió es pugui iniciar més fàcilment. Aquest factor junt amb un gasoil d'índex de cetà adequat proporciona unes combustions equilibrades, ràpides, eficients i efectives.

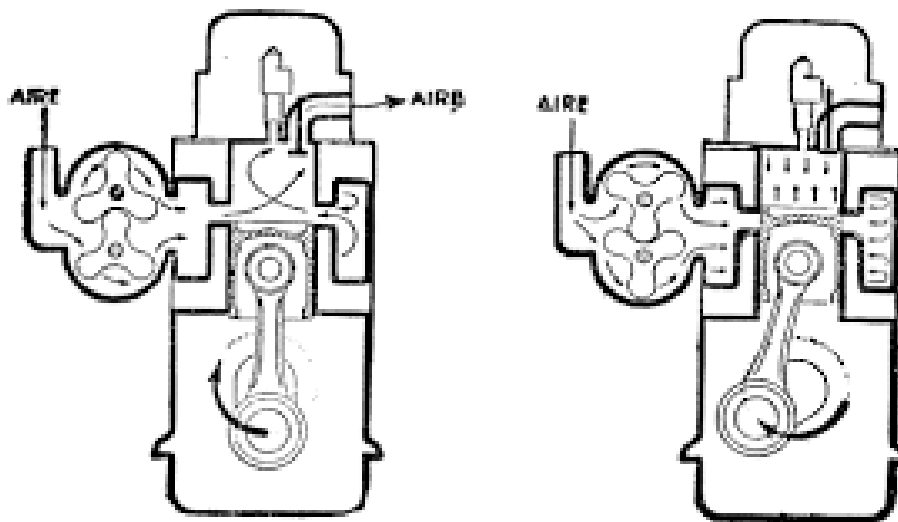


Figura 9: MCI 2 temps dièsel

Un cop explicat el funcionament mecànic dels motors de 2 temps, es procedirà a explicar el funcionament dels motors des d'una vessant química.

A continuació, s'explicaran una sèrie de conceptes bàsics necessaris per a la comprensió del funcionament d'un motor de combustió interna, de manera que posteriorment es donarà una explicació detallada:

- Combustió: La combustió és un procés químic en el que es desprèn una gran quantitat d'energia que es manifesta en forma de temperatura i llum. Per a que la combustió tingui lloc és totalment necessari el que s'anomena "triangle de la combustió". Aquest triangle està format per tres elements que són calor, combustible i comburent. El calor ve donat per la temperatura d'ignició de cada combustió concreta. La temperatura d'ignició és aquella que mesurada en °C i a una pressió de 1 atmosfera aconseguix que es generi una combustió espontània. Per altra banda, la temperatura d'inflamació és aquella temperatura mínima necessària que amb les mateixes condicions anteriors, permet que una flama es mantingui encesa per si mateixa durant la combustió. El segon component del triangle és el combustible. Un combustible és qualsevol material



capaç d'alliberar energia quan s'oxida de forma violenta amb un despreniment de calor. Existeixen un gran nombre de combustibles i un tipus d'ells han estat explicats en aquest treball en anterioritat. Per últim, el tercer component necessari per a que una combustió existeixi és el comburent. El comburent és el material necessari per a que s'oxidi la reacció i així es pugui produir la combustió. El comburent més habitual és l'oxigen i és per això que en els motors de combustió es necessita que existeixi una mescla entre combustible i oxigen. La mescla de combustible i comburent ha d'existir amb un equilibri i unes proporcions, del contrari mai es produirà la combustió o es produirà generant un resultat no útil a l'hora de fer servir el motor.

- Índex de cetà: L'índex de cetà marca la rapidesa amb la qual s'inicia la combustió prenent com a inici el moment en el que s'injecta el combustible dins de la cambra. Quant més gran és dit índex, més ràpid és l'inici de la combustió, mentre que un índex petit indica un major temps a l'hora d'iniciar la crema del combustible. Un índex de cetà petit suposa una crema inadequada del combustible, augmenta les emissions de gas, genera més soroll durant l'explosió i augmenta el desgast del motor. Pel contrari, un índex de cetà massa alt genera una combustió abans del punt ideal i per tant, una pèrdua d'eficiència del motor. Generalment els combustibles dièsel tenen un índex de cetà entre el 45 i el 55 depenent de la qualitat i els mètodes d'obtenció que s'hagin fet servir. Els combustibles dièsel són els que més alt índex de cetà tenen ja que al generar-se la combustió a partir d'una sobrepressió i no per una guspira necessita una facilitat major per poder generar la combustió.
- Índex d'octà: Al contrari que l'índex de cetà, l'índex d'octà marca la capacitat antidetonant d'un combustible. Aquest índex és bàsic en la gasolina ja que ajuda a retardar i sobretot a estabilitzar la combustió. Aquest índex guarda relació amb les condicions de compressió pròpies del motor. De manera que un motor que tingui un índex d'octà adequat però que l'índex de compressió no sigui el necessari donarà lloc a una combustió retardada o al vulgarment anomenat "petardejos", que són una sèrie d'explosions molt seguides però de molt poca potència i, per tant, inútils i inefectives.

Un cop explicats els principals conceptes químics per a poder comprendre el funcionament d'un motor de combustió interna marítim, procedirem a realitzar l'explicació des de la vessant química. Cal dir que no existeix cap diferència química en un motor marítim respecte a la resta de motors de combustió interna que existeixen. Les úniques diferències que existeixen es troben en els



valors en els quals es produeixen els diferents processos i la pròpia arquitectura del motor, com ja s'ha comentat amb anterioritat. Per altra banda, s'explicaran els principals fets químics que es duen a terme durant la combustió però no es detallaran en excés ja que no és el propòsit del projecte.

Per a poder donar una explicació detallada, es procedirà a realitzar seguint l'ordre cronològic en el qual ocorren els passos durant el funcionament del motor. Igual que durant tot el treball, el motor del qual parlarem serà un 2T dièsel.

1. Entrada de combustible al cilindre: Com ja s'ha explicat anteriorment, l'entrada del combustible a l'interior del cilindre es realitza mitjançant un injector. Aquest injector s'encarrega d'atomitzar el combustible de manera que entri a una gran pressió a la cambra de combustió. La pressió a la qual s'injecta acostuma a oscil·lar en funció del motor, però té uns valors d'entre 180 bar fins a 400. Tenint en compte aquests valors de pressió és comprensible que s'hagi de seguir un manteniment adequat i al dia dels injectors, sobretot netejar-los de manera que no es quedin partícules de combustible residuals que puguin obstruir la sortida del combustible o la uniformitat de la sortida. El combustible, abans d'arribar a l'injector ha estat escalfat de manera que tingui una major fluïdesa i sigui més fàcil de bombejar a través dels circuits i també per a una combustió millor i més ràpida un cop injectat a la cambra de combustió. El procés d'injecció del combustible es du a terme a la vegada que el pistó es troba ascendint quasi al punt mort superior.
2. Compressió: Un cop el combustible i l'aire són dins de la cambra de combustió, el pistó es troba en la seva carrera ascendent i per tant, redueix el volum de la cambra. Aquesta reducció de l'espai provoca un augment de la pressió i la temperatura, condicions que provocaran la combustió posteriorment.
3. Combustió: En el procés de la combustió, tota l'energia química que hi havia emmagatzemada en el combustible i els gasos es transforma en cinètica degut a que els gasos s'expandeixen i aquests transmeten la seva energia al cap del pistó que aprofita l'energia per iniciar el moviment alternatiu. Aquest procés es realitza de forma adiabàtica, el que vol dir que no perd ni guanya calor durant el mateix.
4. Escapament: Un cop la combustió ha estat realitzada, a la cambra de combustió i queden els gasos d'escapament. Aquests gasos es formen a partir de la combustió que s'ha generat amb l'aire i el gasoil. Un cop l'explosió ha acabat, una vàlvula situada a la part



superior del cilindre s'obre i deixa un espai de manera que els gasos puguin sortir del cilindre. La diferència de pressions que existeix entre l'interior i l'exterior del cilindre provoca que aquests gasos surtin sense l'ajuda de cap mecanisme. Un cop aquests gasos són evacuats del cilindre comencen els mecanismes per a que quan siguin expulsats a l'atmosfera no siguin tan contaminants i respectin les normatives mediambientals vigents.

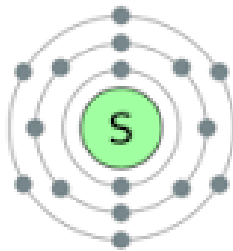
Com es pot veure, aquesta explicació ha estat separada en 4 moments o etapes, però s'ha de tenir en compte que al ser un motor de 2 temps i que hi ha processos que ocorren de manera simultània.

Per altra banda, s'han donat diferents paràmetres i amb uns valors que poden variar i oscil·lar però que és important que sempre es mantinguin dintre dels marges donats ja que els mecanismes han estat dissenyats per treballar dins d'aquests marges.



9. El sofre

Una gran part d'aquest treball es centra en aconseguir que els gasos d'escapament continguin menys contingut de sofre, ja que aquest és perjudicial per a l'atmosfera i per al medi ambient. Per tant, es realitzarà una investigació basada únicament en conèixer el sofre, les seves característiques, propietats i usos.



El sofre és l'element amb nombre atòmic 16 i símbol **S** degut a l'origen de la paraula llatina "sulphur". Pertany a la classificació d'elements no metàl·lics, pertany al grup 16, període 3 i bloc p. La seva configuració electrònica és $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$. La configuració per capes és molt senzilla. En la primera capa hi trobem només dos

electrons. En la segona capa ja en trobem vuit. Aquestes dues primeres capes es troben complertes, ja no tenen espai per a cap electró més, mentre que l'últim nivell que està ocupat per 8 electrons encara tindria lloc per a 12 electrons més. Té uns nombres de valència corresponents al 2,4 i 6, tant positius com negatius.



El sofre es pot trobar amb gran abundància a la naturalesa i es pot reconèixer fàcilment degut al seu olor característic. Té un color entre groguenc i marró i al cremar, la flama és de color blau. El seu punt de fusió es troba als 116.21 °C i el punt d'ebullició a 445.72 °C. Es pot trobar en forma de sulfurs i sulfats. A la naturalesa es troba a prop d'aigües termals i zones volcàniques. Per obtenir el sofre, es segueix una tècnica anomenada "Frasch". Aquest mètode consisteix en injectar vapor d'aigua sobre-escalfat al jaciment de sofre de manera que aquest es fongui i posteriorment ser bombejat a l'exterior mitjançant aire comprimit. El sofre també es troba present en petites quantitats en els combustibles fòssils com el carbó i el petroli, que al patir una combustió emanen diòxid de sofre. Dit diòxid és el principal causant de l'acidesa de l'atmosfera i com a conseqüència, la pluja àcida. És per aquest motiu que existeixen legislacions que regulen el component de sofre que contenen els combustibles, ja que la gran presència d'aquest en els combustibles usats en qualsevol motor de combustió representaria un gran dany per al medi ambient.



A continuació s'explicaran breument els principals usos que se li donen al sofre:

- La gran majoria de sofre es converteix en àcid sulfúric. Aquest és extremadament important ja que es fa servir per a la fabricació de fertilitzants, refineries de petroli, tractaments d'aigües residuals, bateries de plom, entre altres.
- El sofre és també un pesticida natural. En molts cultius orgànics naturals es fa servir el sofre ja que no disminueix la qualitat del producte.
- El sulfat de magnesi, que conté calci, es fa servir per a laxants, sals de mar i com a suplement vitamínic per a plantes.
- El sofre també es fa servir per a la vulcanització del cautxú. Aquesta tècnica es fa servir per a que el resultat final sigui un cautxú capaç de mantenir la seva forma i ser més dur.
- El sofre també s'utilitza per a la fabricació del niló, material de gran rellevància en el dia a dia actual.
- El sofre també és un dels components necessaris a l'hora de crear la pólvora ja que el diòxid de sofre és altament explosiu.



Figura 12: Pneumàtic fet de cautxú



Figura 13: Pólvora



10. El sofre als combustibles marins

Com ja s'ha vist, en el món nàutic existeixen un gran nombre de combustibles específics. Els factors que determinen l'elecció d'uns o altres depenen de l'ús de les embarcacions, del motor amb el qual és propulsada l'embarcació i altres. Com ja s'ha comentat anteriorment, els combustibles apart de tenir una classificació degut a la manera de ser obtinguts i els tractaments que se'ls hi aplica, també tenen unes classificacions que venen ofertes per les classificacions que atorguen les diferents societats de classificació. Tenint en compte les classes en les que separen les societats els fuels, el tipus DMB és el tipus que accepta una major quantitat de sofre en els seus combustibles amb un 2% del total de la seva massa. Els fuels classificats com a DMZ i DMA accepten el mateix nivell de sofre al combustible i té un valor de 1.50% de la massa total mentre que el fuel classificat com a DMX només accepta que 1% del total de la seva massa sigui sofre. De totes maneres, en les especificacions del motor, es concreta que els combustibles amb un percentatge inferior al 4.5% de sofre, serien adequats per al funcionament d'aquest. Mai no s'arribarà a un percentatge tal com aquest, ja que aleshores no accediria a la classificació de les societats i no es podria comercialitzar en gairebé cap punt.

Un cop explicada per sobre la importància del sofre en els combustibles destil·lats, a continuació es procedirà a fer una explicació detallada del protagonisme del sofre en els combustibles classificats com a DMB, ja que són els que accepten més percentatge de sofre en la seva composició i apart, és un dels combustibles recomanats per a fer servir en el motor de l'embarcació del projecte.

Quan es parla de Marine Diésel Oil podem parlar d'un combustible destil·lat, que s'obté del cru i que conté porcions de fuel-oil, tant lleuger com pesat. Aquest combustible, en la seva fórmula més comercial i fet servir té un índex de cetà inferior al del Marine Gasoil i una densitat major. El MDO també pot contenir un major percentatge d'oli de cicle "LC(G)O". La G fa referència al gas, en cas de que fos necessari.

A continuació es procedirà a fer l'explicació de que és l'oli de cicle: L'oli de cicle és un oli residual que apareix al convertir fraccions d'hidrocarburs pesats de les primeres etapes de refinament en materials més lleugers i valuosos. Aquest mateix oli de cicle, posteriorment és tractat de manera que es pugui aconseguir algun tipus de material útil. La opció més comuna és barrejar-lo amb productes més pesats o inicials i fer-lo passar altre cop pel procés de refinament de manera que no es perd tan volum des del material que s'ha extret fins que, finalment, és útil per a ser comercialitzat.



El sofre es troba en els combustibles degut a que aquests provenen de restes fòssils. Aquestes restes porten enterrades des de fa milions d'anys i gràcies al petit percentatge que ja contenien els éssers vius en el seu ser acompanyat de la sèrie de reaccions químiques que s'han dut a terme durant tot el temps que han estat enterrats, provoca que els bancs de proto-combustible que existeixin continguin quantitats de sofre. De fet, uns dels factors que s'ha de tenir en compte a l'hora de realitzar una excavació és la de no aplicar molta temperatura sobre un banc, ja que al cremar-se el sofre es converteix en diòxid de sofre, el qual és un material altament explosiu.

Es podria pensar que degut als petits percentatges que existeixen de sofre en els combustibles, no cal tenir-lo en compte. Cal recordar que la gran quantitat de combustible que fan servir les embarcacions de les dimensions com la del treball. D'aquesta manera, un percentatge del 2%, que pot semblar insignificant, és una gran quantitat que, de no ser ben tractada a la sortida dels gasos d'escapament, va directe a l'atmosfera provocant, com ja s'ha comentat, pluja àcida. Per altra banda, el diòxid de sofre que es genera a partir de la combustió de combustibles amb contingut de sofre també genera partícules que dificultin l'entrada de la llum solar en zones en les que hi tinguin molta presència.

És per aquest motiu que les diferents entitats existents vinculades amb el món nàutic, la preservació del medi ambient i les societats de classificació han establert una sèrie de normatives referents a la quantitat de sofre que una embarcació pot abocar en els seus gasos d'escapament. En l'apartat de continuació es farà un breu resum en el que es nombraran i s'explicaran les principals normes existents referents a les emissions de sofre per a embarcacions de cabotatge.

10.1 Normativa referent a les emissions de sofre en embarcacions de cabotatge

Com ja s'ha dit existeixen unes normatives creades per a limitar les emissions de sofre a l'atmosfera. Apart de dites limitacions també existeixen unes zones de control d'emissions. Aquestes zones existeixen de manera que és obligatori la limitació de les emissions d'òxids de sofre ja que han estat considerades més vulnerables. Aquesta consideració s'atorga per diferents motius, els principals són el gran volum de naus que hi viatgen periòdicament, les condicions en les que es troba el medi ambient en aquella zona geogràfica i les condicions climàtiques que existeixen. Per a que una zona de control sigui totalment definida com a tal es necessita que compleixi i estiguin ben definits els següents punts: clara delimitació de la zona, ha de ser una zona en la que l'emissió de SO_x suposi un efecte negatiu, tant terrestre com marítim, avaluació que demostrï que les emissions són totalment nocives en aquella zona per a la



capa d'ozó o per a la pluja àcida, informació complerta meteorològica de la zona, naturalesa del tràfic marítim, densitat del tràfic marítim i per últim descripció de les mesures que es prendran per a combatre les emissions de SO_x.

A continuació es detallen les principals normatives que regulen i limiten les emissions de sofre per part de la IMO (International Maritime Organization), les quals es troben a l'annex VI del conveni MARPOL, regla 14.

1. *“El contenido de azufre de todo fueloil utilizado a bordo de los buques no excederá del 45% masa/masa”.*
2. *“El contenido medio de azufre a escala mundial del fueloil residual suministrado para uso a bordo de los buques se vigilará teniendo en cuenta las directrices que elabore la Organización”.*
3. *“A los efectos de la presente regla las zonas de control de las emisiones de SO_x incluirán:*
 - a. *la zona del mar Báltico definida en el **apartado 1) b) de la regla 10 del Anexo I.***
 - b. *cualquier otra zona marítima o portuaria designada por la Organización de conformidad con los criterios y procedimientos para la designación de zonas de control de las emisiones de SO_x, en lo que respecta a la prevención de la contaminación atmosférica ocasionada por los buques, que figuran en el **apéndice III del presente anexo.***
4. *“Mientras los buques se encuentren dentro de una zona de control de las emisiones de SO_x, cumplirán al menos una de las siguientes condiciones:*
 - a). *El contenido de azufre del fueloil que se utiliza a bordo de los buques en una zona de control de las emisiones de SO_x no excede del 1,5% masa/masa.*
 - b). *Se utiliza un sistema de limpieza de los gases de escape, aprobado por la Administración teniendo en cuenta las directrices que elabore la Organización, para reducir la cantidad total de las emisiones de óxidos de azufre del buque, incluidas las de los motores propulsores principales y auxiliares, a 6,0 g de SO_x/ kWh o menos, calculada en forma de emisión total ponderada de dióxido de azufre. Los flujos de desechos procedentes de la utilización de dicho equipo no se descargarán en puertos cerrados ni en estuarios, a menos que se pueda demostrar de forma detallada con documentos que tales flujos de desechos no tienen un efecto negativo en los ecosistemas de esos puertos y estuarios, basándose*



en los criterios notificados por las autoridades del Estado rector del puerto a la Organización. La Organización notificará esos criterios a todas las partes en el convenio.

c). Se utiliza cualquier otro método o tecnología verificable y que se pueda hacer aplicar para reducir las emisiones de SOx a un nivel equivalente al que se indica en el apartado b). Esos métodos deberán estar aprobados por la Administración teniendo en cuenta las directrices que elabore la Organización.”

- 5. “En los buques que utilicen fueloil de distintos tipos para cumplir lo prescrito en el apartado 4) a) de la presente regla, se preverá tiempo suficiente para limpiar todos los combustibles que tengan un contenido de azufre superior al 1,5% masa/masa del sistema de distribución de fueloil, antes de entrar en una zona de control de las emisiones de SOx. Se indicarán en el libro registro prescrito por la Administración el volumen de fueloil con bajo contenido de azufre (igual o inferior al 1,5 %) de cada tanque, así como la fecha, la hora y la situación del buque cuando se llevó a cabo dicha operación”.*
- 6. “Durante los doce meses siguientes a la entrada en vigor del presente Protocolo, o de una enmienda al presente Protocolo por la que se designe una zona específica de control de las emisiones de SOx en virtud de lo dispuesto en el apartado 3) b) de la presente regla, los 446 Anexo VI: Reglas para prevenir la contaminación atmosférica Anexo VI buques que penetren en una zona de control de las emisiones de SOx mencionada en el apartado 3) a) de la presente regla o designada en virtud de lo dispuesto en el apartado 3) b) de la presente regla, estarán exentos de las prescripciones de los párrafos 4) y 6) de la presente regla y de las prescripciones del párrafo 5) de la presente regla en lo que respecta al apartado 4) a) de la misma.”*

Com ja es pot veure, la normativa oficial estableix una sèrie de situacions en les que es limita el volum de sofre o diòxid de sofre que es pot abocar a l'atmosfera. Com es veu, un dels principals paràmetres que marca la quantitat de sofre es la zona de la navegació de l'embarcació. Altres paràmetres són el desplaçament de l'embarcació, l'any de construcció o l'any en que es va realitzar l'última revisió o substitució del motor i de la planta purificadora de gasos d'escapament.

Per altra banda, existeixen algunes de les normatives de les esmentades que, a la vegada, fan referència a altres normatives de la normativa. A continuació venen les normatives a les quals es fa referència:



- Annex 1, regla 10, apartat 1B: *“Por zona del mar Báltico se entiende este mar propiamente dicho, con los golfos de Botnia y de Finlandia y la entrada al Báltico hasta el paralelo que pasa por Skagen, en el Skagerrak, a 57°44,8’ N.”*
- L’apèndix III del present Annex està format per 4 apartats els quals es nomenaran a continuació:
 1. **Objetivos**
 - 1.1. *“El presente apéndice tiene por objeto proporcionar los criterios y procedimientos para la designación de zonas de control de las emisiones de SOx. La finalidad de las zonas de control de las emisiones de SOx es prevenir, reducir y controlar la contaminación atmosférica ocasionada por las emisiones de SOx de los buques y sus consiguientes efectos negativos en zonas marítimas y terrestres.”*
 - 1.2. *“La Organización considerará el establecimiento de una zona especial de control de las emisiones de SOx cuando se demuestre que es necesario para prevenir, reducir y controlar la contaminación atmosférica ocasionada por las emisiones de SOx de los buques.”*
 2. **Criterios aplicables a las propuestas de designación de zonas de control de las emisiones de SOx**
 - 2.1. *“Sólo los Estados Contratantes del Protocolo de 1997 podrán proponer a la Organización la designación de una zona de control de las emisiones de SOx. Cuando dos o más Estados Contratantes compartan el interés por una zona particular deberían formular una propuesta conjunta.”*
 - 2.2. *Toda propuesta incluirá lo siguiente:*
 - 2.2.1. *“Una clara delimitación de la zona propuesta para la aplicación de las medidas de control de las emisiones de SOx, junto con una carta de referencia en donde se indique dicha zona”*
 - 2.2.2. *“Una descripción de las zonas marítimas y terrestres en las que las emisiones de SOx de los buques pueden tener efectos negativos.”*
 - 2.2.3. *“Una evaluación que demuestre que las emisiones de SOx de los buques que operan en la zona propuesta para la aplicación de las medidas de control de las emisiones de SOx contribuyen a la contaminación atmosférica por SOx, incluida la deposición de SOx, y a los consiguientes efectos*



negativos en las zonas marinas y terrestres de que se trata. Tal evaluación incluirá una descripción de los efectos de las emisiones de SOx en los ecosistemas acuáticos y terrestres, las zonas de productividad natural, los hábitat críticos, la calidad del agua, la salud del hombre y, cuando proceda, las zonas de importancia cultural y científica. Se indicarán las fuentes de los datos pertinentes así como las metodologías utilizadas”

2.2.4. “Información pertinente acerca de las condiciones meteorológicas de la zona propuesta para la aplicación de las medidas de control de las emisiones de SOx y de las zonas marinas y terrestres que pueden ser afectadas, en particular los vientos dominantes, o las condiciones topográficas, geológicas, oceanográficas, morfológicas u otras condiciones que puedan favorecer el aumento de la contaminación atmosférica local o de los niveles de acidificació.”

2.2.5. “la naturaleza del tráfico marítimo en la zona de control de las emisiones de SOx propuesta, incluidas las características y densidad de dicho tráfico”.

2.3. “Los límites geográficos de la zona de control de las emisiones de SOx se basarán en los criterios pertinentes antes mencionados, incluidas las emisiones y deposiciones de SOx procedentes de los buques que naveguen en la zona propuesta, las características y densidad del tráfico y el régimen de vientos.”

2.4. “La propuesta para designar una zona determinada como zona de control de las emisiones de SOx se presentará a la Organización de conformidad con las reglas y procedimientos establecidos por ésta.”

3. Procedimientos para la evaluación y adopción de zonas de control de las emisiones de SOx por la Organización

3.1. “La Organización examinará toda propuesta que le presenten uno o varios Estados Contratantes.”

3.2. “La designación de una zona de control de las emisiones de SOx se realizará por medio de una enmienda del presente anexo, que se examinará y adoptará y que entrará en vigor de conformidad con el artículo 16 del presente Convenio.”



- 3.3. *“Al evaluar la propuesta, la Organización tendrá en cuenta tanto los criterios que se han de incluir en cada propuesta que se presente para su aprobación, según se indican en la sección 2 supra, como los costos relativos de la reducción de las deposiciones de azufre procedentes de los buques por comparación con las medidas de control en tierra. También se tendrán en cuenta los efectos económicos en el transporte marítimo internacional.”*
4. Funcionamiento de las zonas de control de las emisiones de SO_x
- 4.1. *“Se insta a las partes cuyos buques navegan en la zona que tengan a bien comunicar a la Organización todo asunto de interés relativo al funcionamiento de la zona.”*

Aquestes són les principals normatives que recull la IMO per a que tinguin compliment obligatori. Val a dir que algunes d'elles entren en vigor a partir de certa data. Aquesta mesura es pren per a poder donar el temps necessari a les embarcacions i empreses per a que realitzin les modificacions necessàries per adaptar-se a les noves normatives.



11. Repercussions de l'ús del sofre als combustibles marins i presentació del problema

Ja s'ha comentat de manera somera i superficial quina és principal repercussió que té l'emanació de diòxid de sofre a l'atmosfera (pluja àcida). L'objectiu del següent apartat és donar una explicació més concreta sobre aquest fenomen i donar a conèixer altres que són igual de perjudicials.

L'explicació detallada de com es forma la pluja àcida és la següent: un cop els gasos d'escapament són abocats a l'atmosfera, aquest s'oxiden. Al oxidar-se, dit gas forma sulfats o també anomenades sals, que poden ser transportades en material particulat transportable (PM10) i que en presència d'humitat formen àcids. El SO_2 és higroscòpic, el que significa que reacciona amb la humitat i forma aerosols d'àcid sulfúric i sulfurós. La intensitat de formació d'aerosols i del període de permanència d'aquests a l'atmosfera depèn de les condicions meteorològiques predominants i de la quantitat d'impureses catalitzadores que existeixin, tant en l'atmosfera com en el propi gas. El temps mitjà que romanen a l'atmosfera comprèn des dels 3 fins als 5 dies. Durant aquest temps, dit gas pot recórrer grans distàncies. Recordem que una sal és un compost iònic format pels cations de les bases i pels anions dels àcids.

A continuació es dóna una explicació complerta de com afecta el diòxid de sofre a la salut de les persones:

- Opacament de la còrnia (queratitis).
- Inflamació de les vies respiratòries.
- Dificultats per respirar.
- Irritació ocular degut a la formació d'àcid sulfurós a les mucoses humides.
- Alteracions psíquiques.
- Edemes pulmonars.
- Parades cardíaques.

El diòxid de sofre també s'ha anomenat com a possible causant d'asma, bronquitis crònica i col·lapse respiratori.

Un altre de les repercussions que té l'emissió de diòxid de sofre a l'atmosfera és l'anomenat mal de pedra. Aquest fet es presenta en monuments i escultures que es troben a la intempèrie i es mostra en forma de picadures i gran deteriorament de la pedra degut a la gran acidesa que es troba present a l'atmosfera.



12. Càlculs i dimensionament dels gasos d'escapament del motor del treball

Un dels punts més rellevants a l'hora de limitar el sofre en els gasos d'escapament produïts per un motor de combustible és definir quines són les característiques de dits gasos d'escapament. Per regla general, cada motor té un llibret que recull totes les característiques, manteniment, components, dimensions, etc. necessàries per a poder adaptar cada motor al rang d'ús que se li donarà en funció del lloc geogràfic de navegació i el tipus d'embarcació.

En aquest cas, el document descriptiu del motor (veure link a la webografia) mostra com obtenir la massa dels gasos d'escapament i la vegada, la temperatura d'aquests. Per a realitzar aquests càlculs s'han agafat les dades meteorològiques de Barcelona a 30 de Setembre de 2016. Per a realitzar els càlculs ha estat necessari definir uns índexs de càrrega de treball del motor que s'aniran explicant detalladament a l'hora que els càlculs. Per altra banda, en aquest document es mostraran els processos pas per pas, les fórmules usades, les dades i la font d'origen i els resultats. Existeix un fitxer Excel anomenat "Càlcul gasos escapament" en el qual s'han realitzat tots els càlculs i es mostren els resultats que apareixen en aquest document. A més, dit fitxer està programat de manera que en cas que es vulgui canviar alguna de les dades variables, el resultat apareixerà de manera automàtica.

A continuació es presenta les equacions i els respectius càlculs per a obtenir el caudal de gas d'escapament i la temperatura a la qual surt de tal manera que posteriorment es puguin treure conclusions i prendre mesures.

12.1 Càlcul del caudal de gasos d'escapament

La fórmula necessària per a trobar la massa de gasos d'escapament desallotjada pel motor és la següent:

$$M_{\text{exh}} = M_{L1} \times \frac{P_M}{P_{L1}} \times \left\{ 1 + \frac{\Delta m_{M\%}}{100} \right\} \times \left\{ 1 + \frac{\Delta M_{\text{amb}\%}}{100} \right\} \times \left\{ 1 + \frac{\Delta m_{s\%}}{100} \right\} \times \frac{P_{S\%}}{100}$$

Figura 14: Equació de massa dels gasos d'escapament

On:

M_{exh} : representa el cabdal de gas abocat a l'atmosfera en kG/h.

M_{L1} : massa de gas abocada a l'atmosfera quan el motor treballa en nominal.
Aquest punt es troba en L1 i la massa ve determinada pel document



informatiu del motor. Com es pot veure en les especificacions del motor té un valor de 85400 kg/h.

P_M : Potència específica subministrada pel motor en MCR (màxim continuous rating). Té un valor de 8964 kW.

P_{L1} : Potència del motor en el punt nominal L1. El manual d'especificacions marca el valor en 9960 kW.

$\Delta m_{M\%}$: Percentatge de variació entre la massa de gasos emesa real i la que s'emetria si el motor treballés en la zona nominal (L1). Aquest té un valor de -0.25%. Per aconseguir aquest valor s'ha seguit la fórmula de continuació:

$$\Delta m_{M\%} = 14 \times \ln (P_M/P_{L1}) - 24 \times \ln (n_M/n_{L1})$$

Figura 15: Equació de la variació de massa de gasos d'escapament

Els paràmetres P_M i P_{L1} ja han estat explicats anteriorment, per tant només es realitzarà l'explicació dels dos paràmetres restants:

n_M : Velocitat de gir del motor expressada en rpm en funcionament en MCR. Té un valor de 120.7 rpm.

n_{L1} : Velocitat de gir del motor expressada en rpm en el punt L1. Té un valor de 127 rpm.

ΔM_{amb} : Percentatge de variació entre la massa de gasos emesa real i la que s'emetria fent servir les condicions definides per la ISO. Aquest té un valor de +1.203% i aquest valor s'obté amb la següent fórmula.

$$\Delta M_{amb\%} = -0.41 \times (T_{air} - 25) + 0.03 \times (p_{bar} - 1000) + 0.19 \times (T_{CW} - 25) - 0.011 \times (\Delta p_M - 300) \%$$

Figura 16: Equació de la variació de la massa dels gasos d'escapament amb els paràmetres ISO

T_{air} : Aquest paràmetre marca la temperatura ambiental de la posició geogràfica en la que es troba l'embarcació.

P_{bar} : Pressió atmosfèrica del lloc geogràfic on es troba l'embarcació. Com es pot imaginar, aquests paràmetres són variables i dependents de la posició de la nau. Per a poder realitzar els càlculs, s'ha pres la temperatura i la pressió corresponents a la ciutat de Barcelona el dia 30 de Setembre. Aquests són una temperatura de 20°C i una pressió ambiental de 1016.1 mbar.

T_{CW} : Temperatura de l'aire de refrigeració. Aquesta temperatura ve marcada pel manual del motor i la marca a 18°C.

Δp_M : Pressió de sortida dels gasos d'escapament. Ve marcada pel manual del motor i té una magnitud de 300 mm WC.



$\Delta m_s\%$: Percentatge de variació de la massa quan el motor treballa en servei continu i en un nivell de potència diferent a MCR comparat amb la potència quan treballa en el punt de MCR.

$P_s\%$: Percentatge representatiu de la potència en la que treballa el motor.

Per a determinar $\Delta m_s\%$ es fa servir una gràfica en la qual, en funció del percentatge de potència que s'usi s'obté la variació de massa. A continuació s'adjunta la gràfica i s'expliquen els valors utilitzats per als càlculs de l'embarcació del treball.

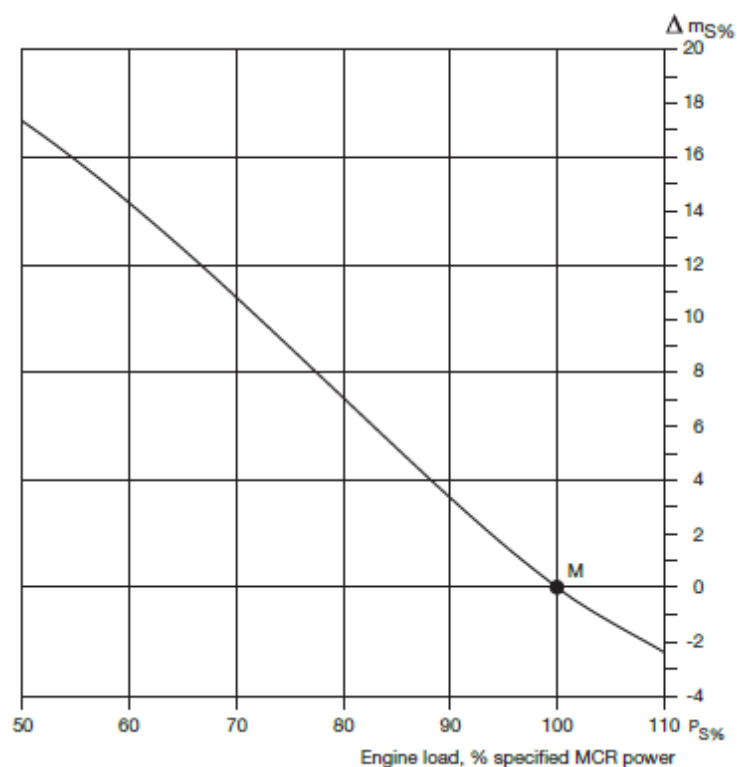


Figura 17: Gràfic càrrega del motor vs massa de gasos d'escapament

El percentatge del total de potència que s'ha elegit és del 95%. Per a aquest valor, la variació percentual de massa és del 2% aproximadament. Aquests dos valors s'introdueixen a la fórmula per a poder acabar de completar el càlcul de la massa de gasos d'escapament que genera el motor.

Tenint en compte les fórmules que s'han explicat i els valors de les dades, s'obté un cabdal de massa de gasos d'escapament generada de **75181.89 kg/h**, que expressat en segons és **20.88 kg/s**. S'ha de tenir en compte que aquestes xifres tenen un marge de variació del +/- 5%.

Un cop explicat el càlcul de la massa dels gasos d'escapament es procedirà a explicar com es calcula la temperatura de sortida dels gasos.



12.2 Càlcul de la temperatura dels gasos d'escapament

La fórmula que s'ha seguit per a calcular la temperatura de sortida dels gasos d'escapament és la següent:

$$T_{\text{exh}} = T_{L1} + \Delta T_M + \Delta T_{\text{amb}} + \Delta T_S$$

Figura 18: Equació de temperatura de sortida dels gasos d'escapament

T_{L1} : Temperatura de sortida dels gasos d'escapament quan el motor treballa en el punt nominal (L1). Aquest valor correspon a 235°C i ve donat per la fitxa tècnica del motor.

ΔT_M : Diferència entre la temperatura de sortida del gas en el punt nominal (L1) i la temperatura al sortir del turbo del motor. Aquest paràmetre a partir de la següent fórmula:

$$\Delta T_M = 15 \times \ln(P_M/P_{L1}) + 45 \times \ln(n_M/n_{L1})$$

Figura 19: Equació diferència de temperatura dels gasos d'escapament amb el punt nominal

Tenint en compte que es prenen els valors ja anomenats anteriorment, el resultat de la diferència de temperatura és de -3.87°C.

ΔT_{amb} : Variació de la temperatura de sortida dels gasos d'escapament en comparació amb la temperatura de sortida amb les condicions marcades per la ISO. A continuació es mostra la fórmula que s'usa per a calcular dit valor.

$$\Delta T_{\text{amb}} = 1.6 \times (T_{\text{air}} - 25) - 0.01 \times (p_{\text{bar}} - 1000) + 0.1 \times (T_{\text{cw}} - 25) + 0.05 \times (\Delta p_M - 300)$$

Figura 20: Equació diferència de temperatura real respecte les condicions ISO

Els paràmetres variables ja han estat definits durant el càlcul de la massa. La variació de temperatura és de -8.861°C. Aquest valor marca que la temperatura de sortida dels gasos d'escapament amb les condicions marcades respecte a les marcades per la ISO és de 8°C menys.

ΔT_S : Variació de la temperatura dels gasos d'escapament entre el punt MCR i un de diferent definit. Per a trobar aquesta temperatura es fa servir la gràfica que es mostra a continuació. Com ja s'ha comentat anteriorment, s'ha pres per a realitzar els càlculs un índex de potència del motor del 95%.

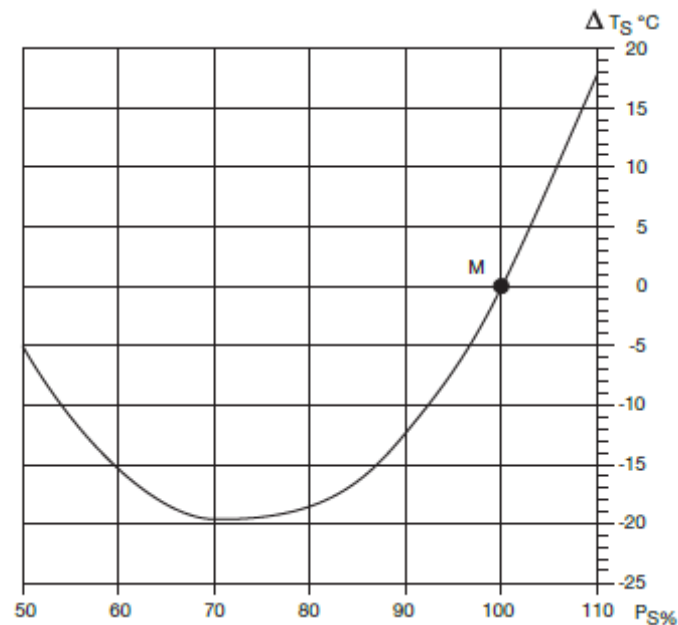


Figura 21: Gràfica càrrega del motor vs diferència de temperatura

Com es pot veure, per dita càrrega, el valor de la diferència de temperatura és de -7.1°C .

Tenint en compte tots aquests factors, s'obté que la temperatura de sortida dels gasos d'escapament és de **215.16°C** .

El combustible que fa servir aquest motor és un MDO (Marine Diesel Oil) amb classificació DMB. Aquesta classificació garanteix que dit combustible contindrà com a màxim un 2% de contingut de sofre sobre el volum total del combustible. Gràcies a aquesta limitació es pot conèixer quin volum del total dels gasos d'escapament és de sofre. La quantitat de sofre que aquest motor desallotja pels gasos d'escapament és de 0.417 kg/s . No és necessari dir que aquesta quantitat és molt elevada i que és evident que existeixi la preocupació per a reduir dita quantitat.

Cal repetir que tots els càlculs que s'han realitzat estan expressats en el fitxer d'Excel "Càlcul gasos escapament" que s'adjunta al document present.



13. Solucions possibles per a l'emissió de sofre

Com s'ha comentat en apartats exteriors, les emissions de sofre produïdes per la combustió de combustibles fòssils en motors marins és un problema a tenir en compte degut al gran impacte que tenen en la natura, el ser humà i l'ambient. Un dels fenòmens més nocius que s'han esmentat és la pluja àcida, que té un factor afegit que és la localització. Les emissions tenen lloc al mar però degut al vent i a altres característiques meteorològiques, la precipitació del sofre junt amb la pluja es produeix en zones habitades on els danys es poden multiplicar.

És evident que eliminar dites emissions és complicat i pràcticament impossible, però sí que existeixen mètodes per a reduir les emissions. Existeixen diferents opcions, algunes basades en l'ús de combustibles amb menor contingut de sofre, altres basats en la instal·lació de rentadors, ja siguin humits o secs, etc. A continuació es procedirà a explicar les principals opcions:

13.1 Dièsel amb contingut de sofre ultra-baix

El dièsel amb contingut de sofre ultra-baix, en anglès ULSD, és un tipus de combustible que s'obté a partir d'un dur i car procés en el que es retira una gran quantitat, quasi per complet, de sofre del combustible. És un combustible amb menys poder energètic i més car d'aconseguir. Des de l'any 2006, la majoria de dièsel que es comercialitza a Europa és del tipus de baix contingut de sofre encara que, de moment, no existeix cap normativa que marqui l'obligació de l'ús d'aquest o restringeixi l'ús del dièsel convencional.

Aquesta és una gran opció ja que redueix molt notablement l'emissió de sofre a l'atmosfera en els gasos sense la necessitat d'instal·lar aparells al motor o al circuit de sortida de gasos ni de realitzar cap modificació estructural.

A nivell ambiental suposa una gran millora ja que redueix per complet les emissions de sofre a l'atmosfera. Per altra banda, un dels altres beneficis que genera aquest combustible és la reducció de la generació de gasos NO_x. Durant el procés de refinació per eliminar el sofre es redueix també una petita part de nitrogen, que produeix que als gasos d'escapament, hi hagi una quantitat menor.

A nivell econòmic, l'ús d'aquest combustible té un impacte important ja que té un cost aproximat de 1.3 cèntims de dòlar per litre. Com es pot imaginar al cap de l'any aquest valor es multiplica de gran manera i significa un increment en el cost de combustible.



13.2 "Scrubber" o rentadors de gasos d'escapament

Les plantes rentadores o "scrubber" no són una tecnologia nova, ja que el seu ús es va iniciar voltants l'any 1930 aplicat a plantes tèrmiques industrials instal·lades a terra. Fins al 1950 no va ser que aquesta tecnologia es va començar a utilitzar a bord d'embarcacions, i és que degut a l'alcalinitat natural de l'aigua natural, aquesta és ideal per a neutralitzar el sofre del gasos d'escapament. Als inicis, aquestes plantes es feien servir per a les calderes utilitzades en l'embarcació, però a mitjans dels anys 80 ja es trobaven naus en les que els motors principals tenien una planta rentadora. En l'actualitat també existeixen plantes que fan servir aigua dolça per mitjà de circuits interns de l'embarcació. Tota aquesta quantitat d'aigua que es necessita per neutralitzar el sofre, un cop utilitzada, no pot ser abocada al mar, per tant, es disposa en tancs a bord i quan s'arriba a port es realitza una purga de l'aigua o es transporta a una planta terrestre de residu i filtració. Com es pot imaginar, un dels gran avantatges que presenta l'ús d'aquestes plantes és la reducció del sofre en els gasos d'escapament. L'altre avantatge principal és la no necessitat de necessitar combustibles amb baix contingut de sofre per a controlar les emissions de diòxid de sofre. Aquest últim fet, a llarg termini surt més rentable econòmicament.

A continuació s'explicaran els diferents tipus de rentadors que existeixen, les principals característiques de cada un i els principals usos.

Existeixen dos tipus de rentadors, els secs i els humits. D'aquests últims existeixen tres variants que són de circuit obert, circuit tancat i circuit híbrid.

Independentment de si els rentadors són d'un tipus o un altre, existeix una estructura general que es compon de tres elements:

- Toveres que permeten el flux del gas d'escapament des de la sortida del motor d'escapament i que els transporten a un recipient amb aigua, tant dolça com salada. Normalment, per qüestions d'estabilitat i espai, aquest últim recipient on es troba l'aigua i on té lloc la filtració, està situat en les parts més altes de l'embarcació, prop de la sortida dels gasos.
- Una planta purificadora de l'aigua del rentador.
- Un tanc on dipositar els fangs generats pel sofre que es mantindran a bord fins que no es puguin desallotjar a un port que tingui les instal·lacions necessàries per garantir el bon tractament d'aquests.

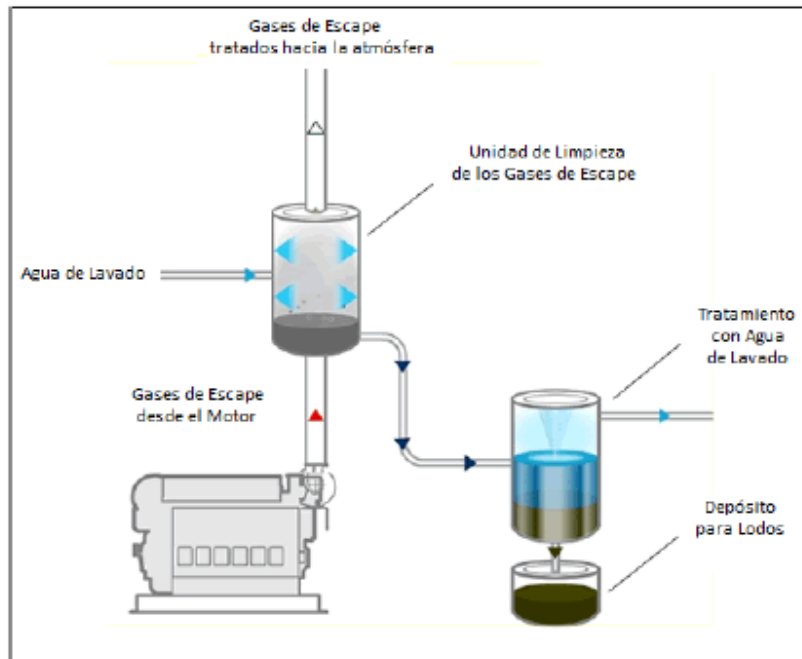


Figura 22: Esquema detallat simplificat d'un rentador.

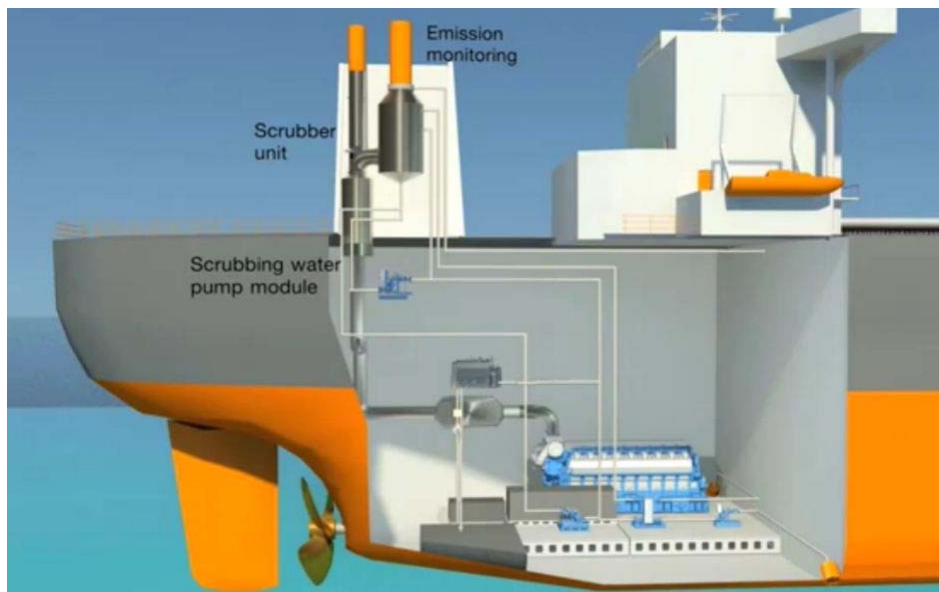


Figura 23: Localització del scrubber respecte l'embarcació.



13.2.1 “Scrubber” de tipus sec

La gran majoria de rentadors que hi ha instal·lats ens les embarcacions en l'actualitat són de tipus humit, encara que recentment s'està començant a implantar l'ús dels de tipus sec degut als avenços que estant existint en la investigació. Aquests sistemes són capaços d'eliminar fins el 99% del contingut de sofre del total dels gasos d'escapament, encara que de moment es veuen limitats a ser usats en potències inferiors a 200MW.

Els rentadors de tipus sec o semi-sec no filtren els gasos d'escapament de la combustió amb humitat. La diferència entre els rentadors secs i els semi-secs és que en els primers no s'injecta res de vapor d'aigua al sistema mentre que en el segon cas, s'afegeix una quantitat de vapor d'aigua que, amb el calor dels gasos, s'evaporarà sense que abans s'hagi condensat cap partícula. Com és evident, la primera avantatge és que no existeix una aigua residual que posteriorment s'hagi de filtrar ni emmagatzemar.

Existeixen varis tipus de rentadors de tipus sec, però tots estan formats pels següents dos aparells: l'injector del gas àcid sorbent del sofre a la xemeneia i el mecanisme per eliminar els productes de la reacció i els materials residuals.



Figura 24: Procés d'instal·lació d'un “scrubber” en una embarcació. Es pot apreciar el tamany real d'aquest.

Existeixen dos tipus de rentadors en sec: per injecció de material sorbent sec i absorbidors secs.



13.2.1.1 Per injecció de material sorbent sec:

S'injecta material alcalí com el bicarbonat sòdic al flux de gasos o en diferents punts del procés. Aquests punts poden ser el procés de combustió, la sortida immediata dels gasos del motor o, en cas de que existeixi, una cambra col·lectora de gasos. Al ser injectats, els materials àcids reaccionen amb el material alcalí i formen sals sòlides que es precipiten als filtres i que més tard són retirades. Aquest mètode és només útil amb dos tipus d'àcids (SO_2 i HCl) ja que són els únics que reaccionen amb els materials alcalins quan són injectats d'aquesta manera.

13.2.1.2. Per absorbidors secs

En aquest mètode, els gasos es fan circular a través d'una cambra on es troba una massa d'un material anomenat filtre o barrera que està formada per materials alcalins. Aquest filtre absorbeix els àcids que puguin haver als gasos d'escapament, mentre que permet la circulació de la resta del volum dels gasos. Els àcids al ser absorbits pels materials alcalins formen sals sòlides que quedaran dipositades a la mateixa cambra per a la seva posterior retirada.

13.2.1.3 Avantatges

- El consum energètic del sistema és gairebé nul.
- Elimina tant SO_x com NO_x , fet que elimina la necessitat de tenir dos equips a bord per eliminar els dos tipus d'àcids.
- Les sals sòlides que es generen són granulades, el qual facilita la retirada d'aquestes.
- No existeix la contaminació de l'aigua del mar.



Figura 25: Representació d'un rentador de tipus sec a bord.



Figura 26: Imatge real d'un rentador instal·lat a un buc

13.2.2. “Scrubber” de tipus humit

Aquest tipus de rentador es basa en fer passar els gasos d'escapament per un canaló on hi ha disposats estratègicament uns injectors. Aquests injectors, al pas del gas d'escapament expulsen unes gotes líquides formades per una barreja que conté material alcalí. Un cop les gotes són injectades al tub, aquestes s'encarreguen de neutralitzar els components d'àcid de sofre. Amb aquesta nova composició, les gotes que contenen òxids de sofre queden atrapades en les superfícies disposades a la part superior del rentador. Depenent de la potència de l'aparell, les gotes seran capaces de tenir contacte i, per tant, eliminar components de sofre, en funció del tamany de les partícules d'òxid. Un rentador amb una potència baixa neutralitzarà les partícules més grans mentre que un rentador amb una potència suficient eliminarà qualsevol rastre d'òxid de sofre, independentment del seu tamany.

A continuació es procedirà a explicar els principals tipus de rentadors humits que existeixen i es fan servir a bord.

13.2.2.1. “Scrubber” de tipus de circuit obert

Aquest tipus de rentador rep aquest nom degut a que l'aigua que utilitza per neutralitzar les partícules de diòxid de sofre que es generen es pren del mar i, un cop utilitzada i purificada, es torna a abocar al lloc d'on provenia. És un sistema que no necessita de gaires additius ni catalitzadors degut a que l'aigua salada del mar ja conté la suficient alcalinitat per poder neutralitzar les partícules del diòxid de sofre.

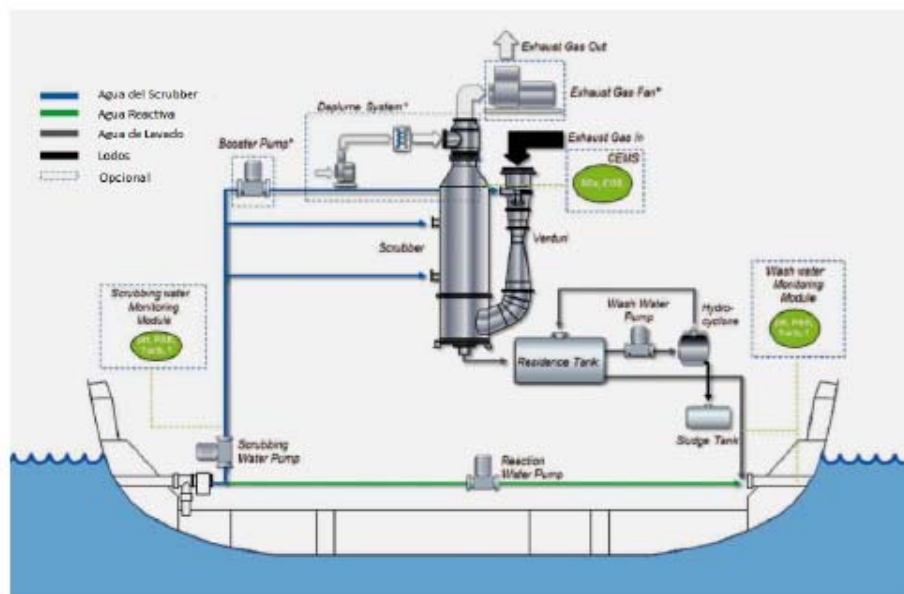


Figura 27: Il·lustració del circuit d'un rentador de tipus de circuit obert



Els gasos de la combustió entren a la torre del “Scrubber” per la part inferior on es fan circular per un tub. En aquest tub, l’aigua de mar es posa en contacte amb els gasos d’escapament mitjançant uns ruixadors. Allà l’aigua de mar dissolt els gasos d’escapament de manera que es produeix una reacció on el diòxid de sofre s’ionitza i forma bisulfit i sulfit, que més tard s’oxiden fàcilment en sofre i pot ser abocat de tornada a l’aigua. Els ruixadors es troben en la part superior del rentador, de manera que quan entren els gasos nocius, primer entren en contacte amb les superfícies de contacte que es queden impregnades amb el diòxid de sofre. Un cop l’aigua és ruixada, per gravetat i per la composició alcalina de l’aigua, arrossega les molècules de diòxid de sofre fins a la part inferior del rentador on s’acumularà per més tard ser filtrada. Aquest procés és aparentment senzill però necessita de punts de control per poder garantir que el resultat final serà l’adequat. Un punt a tenir en compte és la pressió amb la qual es bombeja l’aigua que farà contacte amb els gasos. Una pressió molt alta, produiria un consum energètic per part de la bomba molt alt que faria que el procés no fos rentable i, pel contrari, una pressió de bombeig molt baixa seria insuficient per aconseguir neutralitzar les partícules de diòxid de sofre. L’altre punt de control es troba a la sortida de l’aigua de mar. En dit punt es dur a terme un exhaustiu control en el que es comprova que l’aigua que es retorna al mar compleix tots els límits marcats per les normatives de les organitzacions oficials.

13.2.2.2 “Scrubber” de tipus de circuit tancat

Aquest tipus de rentador té un funcionament molt semblant al de tipus obert explicat anteriorment, amb la única diferència que l’aigua que s’utilitza per neutralitzar el diòxid de sofre és aigua dolça que corre per un circuit intern de l’embarcació i a la qual se li afegeix el material alcalí per a que elimini la presència de diòxid de sofre. Aquest material alcalí és soda càustica (NaOH), d’aquesta manera que se li atorga la propietat d’eliminar els residus de diòxid de sofre que posseïa l’aigua salada de manera natural. Una altra diferència important és que l’aigua no és ruixada a mesura que els gasos d’escapament avancen per la xemeneia, sinó que existeixen unes superfícies de contacte per on passen els gasos que provoca la mescla entre l’aigua i les partícules de diòxid de sofre del gas.

Un cop aquesta aigua és feta servir, passa un procés de purga per tal que quedi preparada per a una nova circulació pel rentador. Periòdicament, aquest circuit tancat és obert i l’aigua del seu interior és substituïda per tal de garantir la millor eficiència i així complir amb les normatives respectives. Un cop les aigües han estat purificades després del seu ús, poden ser abocades al mar si calgués, ja que no suposen cap mena de perill per al medi ambient. En cas de que aquestes aigües no poguessin ser abocades al mar perquè l’embarcació es



cau a la part inferior del rentador, on mitjançant uns filtres, els components nocius (diòxid de sofre i altres) queden atrapats dins unes masses sòlides anomenades fangs. Un cop aquesta operació s'ha portat a terme, si és necessari, es procedeix a la purga de l'aigua del circuit. Aquesta aigua es neteja i com a resultat s'obtenen dos residus, aigua que ha estat netejada i els fangs on es troben tots els components nocius del diòxid i que cal eliminar. L'aigua pot ser abocada al mar mentre que el fang s'emmagatzema i a l'arribar a port es transporta a un centre de tractament de residus.

13.2.2.3 "Scrubber" de tipus híbrid

Aquest sistema és una barreja dels dos sistemes explicat anteriorment. Les instal·lacions i circuits d'aquest permet que es pugui elegir quin tipus de rentador es farà servir. L'elecció sobre quin circuit utilitzar es fa a partir de les condicions del mar, el volum i la qualitat de l'aigua del circuit interior i el tipus de navegació que s'estigui tenint.

13.2.2.4 Avantatges

- Volum reduït. Els rentadors de tipus humit, en qualsevol de les seves opcions, són relativament petits i no ocupen massa espai. Aquest factor és molt important tenint en compte que la majoria d'embarcacions que estan dotades amb aquests equips es dediquen a la càrrega comercial.
- Aquests equips redueixen el volum i la temperatura del vapor de gas no saturat de la sortida.
- Els equips no són molt costosos econòmicament comparat amb el benefici que produeixen.

13.2.3 Elecció d'un equip rentador per a l'embarcació del treball

Un cop explicats els principals tipus de rentadors que existeixen i el seu funcionament, es procedirà a elegir un disseny existent per a l'embarcació del treball.

A l'hora d'elegir quin equip és el que treballaria millor en una nau com la del treball, s'han de definir i diferenciar diferents paràmetres com: quantitat de sofre del combustible, tipus i zona de navegació i nombre de motors i potència dels quals s'haurà de rentar els gasos. Un cop definits aquests paràmetres, ja es tindrà la informació suficient com per poder elegir un equip adequat per a l'embarcació.



- Combustible i quantitat de sofre: Com ja s'ha explicat en apartats anteriors, el combustible que fa servir l'embarcació és un MDO (Marine Diesel Oil) i amb una classificació ISO de DMB. Aquesta classificació marca que el contingut màxim de sofre de dit combustible és del 2%.
- Zona i tipus de navegació: Aquest buc és una embarcació dissenyada per a dedicar-se al cabotatge a la zona del Mediterrani. Coneixent aquest fet sabem que la navegació es produirà sempre fora d'una zona ECA (Mar Bàltic, Mar del Nord, tota la costa dels USA i Canadà i el Carib Americà) definida a l'Annex VI del Marpol. Per altra banda, al ser un buc de cabotatge també es pot saber que no realitzarà viatges de llarga durada, que sempre tindrà càrrega i que la ruta sempre serà la mateixa o semblant.
- Nombre de motors i potència: L'embarcació està dotada d'un motor que genera una potència de 13280 kW i l'escapament d'aquest és d'una sola via.

Azufre en el Combustible (%)	Eficiència en zona ECA (%) Límite de azufre: 0.1%	Eficiència en zona no ECA (%) Límite de azufre: 0.5%
3.5	97.1	85.7
3.0	96.7	83.3
2.5	96.0	80.0
2.0	95.0	75.0
1.5	93.3	66.7
1.0	90.0	50.0

Taula 9: Quadre de relació entre la quantitat de combustible del motor i l'eficiència que ha de tenir el rentador.

Un cop conegudes totes aquestes característiques, ja és possible decidir quina planta rentadora de gasos d'escapament es vol instal·lar. Inicialment, s'ha de decidir si s'utilitzarà un equip de treball en sec o un humit. Ambdós sistemes presenten avantatges i inconvenients. Per una banda, els de tipus sec són més grans i pesats, però no necessiten de circuits extres ni components com bombes ni sensors. Per altra banda, els humits són més petits i més lleugers, sempre i quan no estiguin treballant. Quan el procés de neteja comença, el rentador augmenta considerablement el pes. Per altra banda, els de tipus humits presenten menys necessitats de manteniment.

Per tots aquests factors, s'ha elegit un "scrubber" de tipus humit. El model que s'ha elegit ha estat el model I de tipus tancat del model **Pure SO_x de Alfalaval**. Un dels motius pel qual s'ha elegit aquest tipus de rentador són les dimensions. La nostra embarcació existeix ja i per tal de no dificultar la instal·lació de la planta, afavoreix que aquesta sigui el més petita possible. Aquest model proporciona una gran facilitat a l'hora de ser disposat en l'embarcació ja que no



afecta massa a l'estabilitat, volum de carga i desplaçament de l'embarcació. A més, ofereix múltiples entrades de gasos d'escapament, per si fos necessari connectar-hi algun motor auxiliar.



Figura 29: Imatge del model Pure SO_x I Line



14. Conclusió

Un cop finalitzat el projecte és hora de recopilar les principals conclusions que s'han pogut extreure del treball i, per altra banda, poder expressar les impressions personals que he obtingut durant la realització del mateix.

L'objectiu del treball era conèixer detalladament el funcionament d'un motor d'una nau real propulsat amb fuel-oil i posteriorment, centrar-se en el sofre, les emissions nocives que genera aquesta i comparar les principals opcions de reducció que existeixen.

Una de les principals dificultats trobades durant la realització del treball ha estat trobar la informació real sobre l'embarcació que es volia treballar. El secretisme i la confidencialitat de les empreses a l'hora d'aconseguir la informació sobre el motor o plànols d'una embarcació real dificulta molt el procés d'aconseguir que l'embarcació del treball sigui una real o, com a mínim, en guardi ressemblances.

El motor i els equips que es descriuen en el treball són totalment reals i es comercialitzen en l'actualitat. A la webografia es pot trobar l'adreça de les pàgines respectives.

Una de les conclusions que més fàcilment es pot extreure és que la problemàtica del sofre està molt present en l'actualitat del comerç marítim. A diari es desplacen milers d'embarcacions arreu del món i totes elles consumeixen combustibles fòssils. Algunes d'elles prenen les mesures adequades per a complir les normatives establertes respecte a les emissions de sofre en els gasos d'escapament, però la gran majoria les ignora, ja sigui per falta de coneixement o de voluntat.

Una altra conclusió és que, reduir les emissions de sofre a l'atmosfera i mostrar preocupació pel medi ambient no és una fita inaccessible, ja que no suposa uns costos excessius i només es necessita d'interès i voluntat.

Per altra banda, opino que les mesures que es prenen per reduir les emissions de sofre dels gasos d'escapament distreuen als consumidors del veritable problema. És una realitat que els combustibles fòssils s'estan esgotant i a les empreses encarregades de vendre i subministrar fuel els hi interessa que es trobin opcions per a seguir consumint aquest combustibles abans que es dediquin recursos en trobar fonts energètiques noves i renovables.



Sergi Bonet Ferré
GESTN

Personalment, he gaudit molt fent aquest projecte, ja que he pogut aprofundir en coneixements que ja tenia i, juntament, amb la meva experiència laboral, veure'ls i aplicar de manera diària.



15. Webografia

A continuació es mostren totes les pàgines webs que s'han utilitzat per a obtenir la informació necessària per realitzar el treball.

Vaixell del treball (*Octubre 2015*)

[1] **Informació oficial de l'embarcació:**

<https://www.vesselfinder.com/es/vessels/HELENA-SCHEPERS-IMO-9584487-MMSI-210585000>

Motors de Combustió Interna (*Novembre-Desembre 2015*)

[2] **Categories de motors:**

<https://www.dieselnets.com/standards/us/marine.php>

[3] **Motors de tipus non-road:**

https://en.wikipedia.org/wiki/Non-road_engine

[4] **Motors MAN 2T1**

<http://marine.man.eu/two-stroke/2-stroke-engines/me-gi-engines>

[5] **Codificació motors MAN**

<http://marine.man.eu/two-stroke/2-stroke-engines/me-gi-engines>

[6] **Catàleg de motors MAN**

<https://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/marine-engine-programmes/4510-0014-00d9d156f0bf5969569b45ff0200499204.pdf> (2015)

[7] **Recirculació dels gasos d'escapament**

https://en.wikipedia.org/wiki/Exhaust_gas_recirculation

[8] **Motor dièsel**

https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_di%C3%A9sel

[9] **Relació de compressió d'un MCI**

[https://es.wikipedia.org/wiki/Relaci%C3%B3n_de_compresi%C3%B3n_\(motores\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Relaci%C3%B3n_de_compresi%C3%B3n_(motores))



[10] **Common Rail**

<https://es.wikipedia.org/wiki/Common-rail>

[11] **Pre calentadors de combustible dièsel**

<https://www.ngk.de/es/tecnologia-en-detalle/calentadores/principios-de-los-calentadores/el-precalentamiento/>

[12] **Fitxa tècnica del motor del treball**

http://marine.man.eu/applications/projectguides/2stroke/content/epub/S50ME-C8_2.pdf

Història dels MCI (*Desembre 2015*)

[13] **Història dels MCI**

<http://www.u-historia.com/uhistoria/tecnico/articulos/motores/motores.htm>

[14] **Història dels motors Wärtsila**

<http://www.wartsila.com/about/history>

[15] **Efemèrides dels MCI**

http://www.dieselduck.info/historical/01%20diesel%20engine/prime_movers.html#.VopTAvnhDIU

[16] **Història motors Sulzer**

<http://tecnologia-maritima.blogspot.com/2012/08/historia-de-los-motores-marinos-sulzer.html>

[17] **Motors dièsel amb turbocompressor**

<http://maquinasdebarcos.blogspot.com/2008/11/motores-diesel-turbocompresores-un-poco.html>

Normativa de cabotatge (*Gener 2016*)

[18] **Normativa de cabotatge a la UE**

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=URISERV%3AI24065>

[19] **Modificació de la normativa de cabotatge vigent**

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=URISERV%3AI24065>

[20] **BOE's referents a cabotatge**

<https://www.boe.es/doue/1992/364/L00007-00010.pdf>



<https://www.boe.es/boe/dias/1998/10/30/pdfs/A35561-35562.pdf>

<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2011-16467>

<http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1992-26146>

<http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-20272>

https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1967-3920

https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1998-24949

https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1993-16660

Informació sobre embarcacions de càrrega (Gener 2016)

[21] **Transport marítim**

https://es.wikipedia.org/wiki/Transporte_mar%C3%ADtimo

[22] **Cabotatge**

<https://es.wikipedia.org/wiki/Cabotaje>

SOLAS, IMO i UNE referents a contaminació per hidrocarburs (Gener-Febrer 2016)

[23] **MARPOL convenció per la contaminació**

[http://www.imo.org/es/About/Conventions/ListOfConventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](http://www.imo.org/es/About/Conventions/ListOfConventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)

[24] **IMO contaminació per hidrocarburs**

[http://www.imo.org/es/About/Conventions/ListOfConventions/Paginas/International-Convention-on-Oil-Pollution-Preparedness,-Response-and-Co-operation-\(OPRC\).aspx](http://www.imo.org/es/About/Conventions/ListOfConventions/Paginas/International-Convention-on-Oil-Pollution-Preparedness,-Response-and-Co-operation-(OPRC).aspx)

Combustibles marins (Febrer 2016)

[25] **Normativa ISO per Fuels marins**

<http://www.chevronmarineproducts.com/products/iso-specs.aspx>

[26] **Taules de viscositat**

<http://www.viscopedia.com/viscosity-tables/substances/bunker-oil-marine-fuel-oil/>

[27] **Fuel Oil**

<https://es.wikipedia.org/wiki/Fueloil>



[28] **Fuels destil·lats**

<http://proteux.com/product/marine-engine-diesel-fuels-dmx-dma-dmb-and-dmc-marine-fuels-2/>

[29] **Taula d'especificacions de Fuel**

http://www.chevronmarineproducts.com/docs/Chevron_EverythingYouNeedToKnowAboutFuels_v3_1a_DESKTOP.pdf

[30] **Especificacions Fuel RMA**

[http://www.chevronmarineproducts.com/docs/Residual-Marine-Fuel-\(RMA\).pdf](http://www.chevronmarineproducts.com/docs/Residual-Marine-Fuel-(RMA).pdf)

[31] **Especificacions Fuel RMB**

[http://www.chevronmarineproducts.com/docs/Residual-Marine-Fuels-\(RMB-RMK\).pdf](http://www.chevronmarineproducts.com/docs/Residual-Marine-Fuels-(RMB-RMK).pdf)

[32] **Especificacions Fuel RMG**

http://www.steauaromana.ro/prod/COMBMARINTIPRMG380_en.pdf

[33] **MDO**

<https://www.marquard-bahls.com/en/news-info/glossary/detail/term/marine-diesel-oil-mdo.html>

[34] **IFO 380**

http://www.marcelrossini.com.ar/distribucion/productos-combustibles-ifo_380-8.html

Història dels combustibles (Febrer 2016)

[35] **Petroli**

<https://es.wikipedia.org/wiki/Petr%C3%B3leo>

[36] **Informació del Petroli**

<http://educaciones.cubaeduca.cu/medias/pdf/2593.pdf>

Informació MDO i HFO (Març 2016)

[37] **MDO**

https://en.wikipedia.org/wiki/Marine_diesel_oil

[38] **Fuel Oil**

https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_oil



[39] **Oli de cicle**

https://en.wikipedia.org/wiki/Cycle_oil

Química (Març-Abril 2016)

[40] **Punt de solidificació**

https://en.wikipedia.org/wiki/Pour_point

[41] **Punt d'enterboliment**

https://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_point

[42] **Emulsió**

<https://es.wikipedia.org/wiki/Emulsi%C3%B3n>

[43] **Propietats dels lubricants**

<http://www.monografias.com/trabajos15/propiedades-lubricantes/propiedades-lubricantes.shtml#numero>

[44] **Índex de cetà**

https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%8Dndice_de_cetano

[45] **Índex d'octà**

https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_octano

[46] **Element oxidant**

<https://es.wikipedia.org/wiki/Oxidante>

[47] **Procés adiabàtic**

https://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_adiab%C3%A1tico

Emissió de gasos d'escapament (Juny 2016)

[48] **Standards d'emissió als USA**

<https://www.dieselnet.com/standards/inter/imo.php>

Repercussions del diòxid de sofre (Juliol-Agost 2016)

[49] **Salut**

<http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-43789.html>



[50] **Propietats i efectes**

http://www.crana.org/es/contaminacion/mas-informacion_3/diaxido-azufre-so2

[51] **Propietats del diòxid de carboni**

http://ivhhn.org/index.php?option=com_content&view=article&id=144

Sofre (Agost 2016)

[52] **Descripció del sofre i propietats**

<https://es.wikipedia.org/wiki/Azufre>

<http://elementos.org.es/azufre>

Emissions de sofre (Agost-Setembre 2016)

[53] **Standards d'emissió**

<https://www.dieselnet.com/standards/us/fuel.php#sulfur>

[54] **Normativa MARPOL i IMO al respecte**

<http://es.macandrews.com/Uploads/News%20Section/MARPOL%20Legislation%20Info%20Sheet.pdf>

<http://es.macandrews.com/blog/news/marpol-nueva-legislation-desde-112015.aspx>

[http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93Regulation-14.aspx](http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93Regulation-14.aspx)

<https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-05/documents/5-convenio-presentation.pdf>

http://www.proteccioncivil.org/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum12/vdm0256ar/Convenio_MARPOL_Refundido_2002.pdf (Annex VI, regla 14)

Reducció emissions SO₂ (Setembre-October 2016)

[55] **Scrubbers i tipus**

<http://www3.cec.org/islandora/es/item/2195-best-available-technology-air-pollution-control-http://es.alpha-nouvelles.com/article/tipos-de-secadoreses.pdf>

<http://es.alpha-nouvelles.com/article/tipos-de-secadores>

<http://blog.condorchem.com/tag/scrubber/>

http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/22872/PFC_ETN_M.SIN_Definitivo.pdf



<http://worldmaritimenews.com/archives/184767/dnv-gl-adds-scrubber-ready-class-notation/>

<http://www.atmosferis.com/scrubber/>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Scrubber>

https://www.youtube.com/watch?v=kfyWD_7-42s

https://en.wikipedia.org/wiki/Sulphur_Emission_Control_Area

http://www.alfalaval.com/microsites/puresox/documents/MDD00105EN_LOWRES.pdf

<http://www.alfalaval.com/microsites/puresox/puresox.htm>

[56] Dièsel amb contingut de sofre ultra-baix

https://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-low-sulfur_diesel

Condicions climàtiques Bcn (Octubre 2016)

[57] Temperatura i pressió a Barcelona al 30 de Setembre

<https://www.eltiempo.es/barcelona.html?v=historico>

<http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/ultimosdatos?k=cat&w=0&datos=img&x=h01&f=presion>