

Franco Quaranta

IMPIANTI PER IL TRATTAMENTO A BORDO DEL COMBUSTIBILE

Napoli, 1993

Sommario

Introduzione	pag. 3
Combustibili: generalità e parametri caratteristici	pag. 5
Funzionamento dei motori con combustibili pesanti	pag. 7
Impianti di trattamento	pag. 12
Bibliografia	pag. 21

Introduzione

La situazione energetica mondiale ha subito due svolte radicali: la crisi del 1973, intervenuta a causa della guerra del Kippur che concentrò nelle mani di un numero ridotto di produttori la distribuzione del petrolio, e quella del 1979, a seguito della rivoluzione iraniana che pure portò ad una diversa dipendenza dalle fonti petrolifere. In entrambi i casi si ebbe un vertiginoso apprezzamento del greggio che passò dagli “storici” due dollari al barile a quasi quaranta.

Tutto ciò finì con l’aver grossa influenza su tutti i settori dell’economia mondiale; il settore navale risentì nel profondo dei mutamenti che questa situazione andava creando. La stessa fisionomia dei costi di conduzione di una nave prese a variare risentendo del maggior peso che la spesa per i rifornimenti di combustibile andava assumendo.

La figura 1 mostra, in linea di principio, qual è stata la evoluzione dei costi di gestione di una nave standard. Si vede bene che le spese di approvvigionamento del combustibile non superavano, prima delle crisi, il 15 ÷ 20 % di quelle complessive; oggi è raro che tale valore non raggiunga il 50% dei costi di gestione.

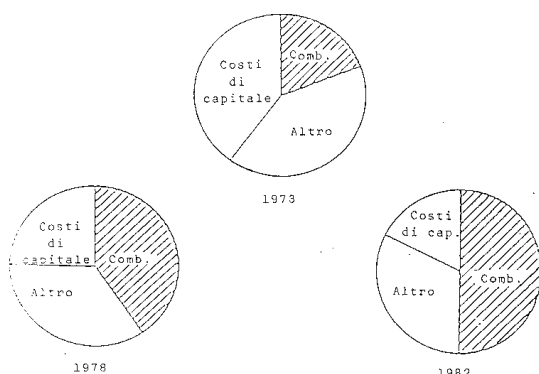


Figura 1 – Evoluzione dei costi di gestione di una nave

La figura 2 riporta sia l’andamento dei prezzi del petrolio tra il 1950 ed il 1985 che quello del tasso d’inflazione mondiale nello stesso periodo. Dalle discrepanze presenti tra i due andamenti si evince la fenomenologia eccezionale che ha causato l’impennarsi dei prezzi del greggio.

Inoltre, la crescita della domanda di distillati leggeri e l’aumento dei costi di raffinazione hanno generato da un lato differenze sempre maggiori tra i prezzi dei prodotti più raffinati e quelli più pesanti, dall’altro il desiderio da parte dei produttori di petrolio di spingere il

più possibile i processi di distillazione per ottenere la maggiore quantità possibile di frazioni leggere, commercialmente più redditizie.

Tutte queste situazioni hanno influenzato nel profondo il mondo dell’impiantistica navale la quale, di fronte al crescere dei prezzi del greggio ed al conseguente aumento delle spese di combustibile, ha dovuto rivedere l’economia globale della nave alla luce delle nuove configurazioni venutesi a creare. Si è dovuto, in sostanza, prendere in esame una serie di provvedimenti atti a ridurre le spese di gestione della nave, concedendo una maggiore concentrazione di sforzi a quelle voci che hanno maggior peso sulle spese complessive; in particolare, si è cercato di ridurre le spese di combustibile sia attraverso la riduzione del consumo degli stessi, sia cercando di utilizzarne di più economici.

Tra i metodi per la riduzione dei consumi adottati a quei tempi, la scelta della velocità economica di navigazione, (all’epoca della crisi, per ridurre i consumi, la velocità media passò da 14 ÷ 17 kn a 11 ÷ 15), lo studio degli intervalli di ricovero in bacino

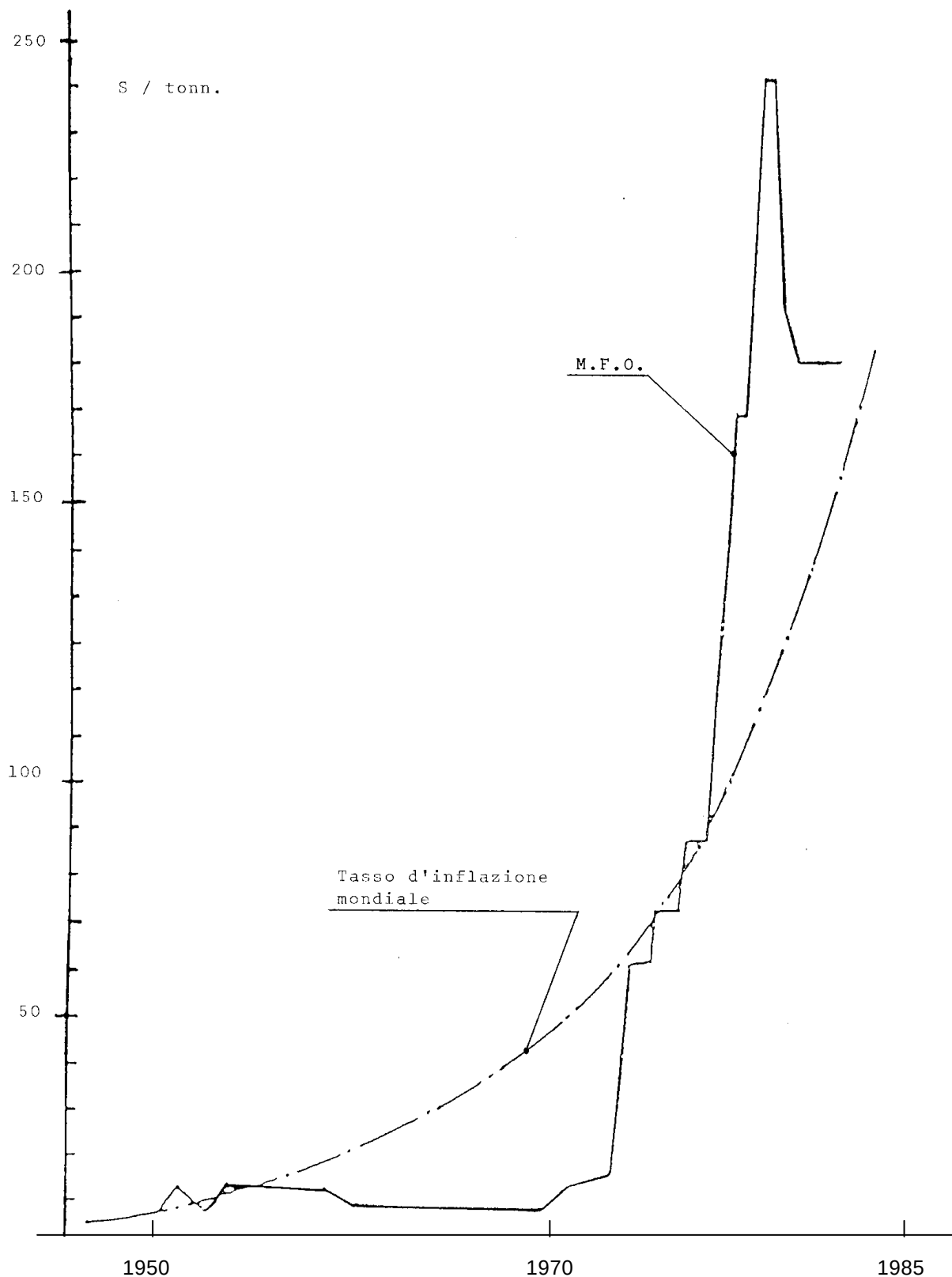


Fig. 2 – Andamento del prezzo del petrolio e dell'inflazione tra il 1950 ed il 1985

per la pitturazione della carena, il miglioramento delle caratteristiche dei motori per ridurre il consumo, l'implementazione di sistemi di recupero dell'energia persa dal motore, il miglioramento delle forme di carena allo scopo di ridurre la resistenza al moto, etc. Una delle misure che si iniziò ad adottare fu quella di alimentare i motori marini con prodotti non più relativamente pregiati come una volta (diesel oil o

addirittura gasoli) ma con combustibili assai più scadenti contenenti quantità di residuo di distillazione via via crescenti.

L'utilizzo di combustibili di più bassa qualità fu peraltro reso possibile senza grossi traumi per merito della corrente tecnologia nel campo del diesel marino il quale si mostrò effettivamente capace di bruciare anche nafte molto scadenti purché sottoposte ad opportuno trattamento a bordo.

La qualità dei combustibili che alimentavano le navi in circolazione andò quindi progressivamente peggiorando fino ad arrivare agli attuali *heavy fuel* i quali, come si dirà in seguito, sono poco più che il residuo che si estrae dal fondo dei recipienti di distillazione e quindi, fra tutti i distillati, quelli che contengono la maggior quantità di impurità e componenti indesiderabili in un combustibile.

Si è dunque aperta una nuova fase nella ricerca motoristica: il problema posto dalla alimentazione con i residui impegna infatti i tecnici delle case costruttrici di motori i quali devono mettere i loro prodotti in grado di divorare combustibili pesanti di qualità via via peggiore per effetto del progredire delle tecniche di raffinazione che, per ottenere maggiori quantità di distillato nobile, impoveriscono sempre più il residuo, concentrando in esso le impurità contenute nel greggio di partenza.

Combustibili: generalità e parametri caratteristici

A causa delle situazioni sopraelencate, i combustibili disponibili per gli apparati motore navali hanno dunque visto peggiorare le proprie caratteristiche ed aumentare i contenuti di elementi nocivi agli organi del motore in fase di combustione. In particolare, come già rilevato, con l'aumento del valore dei distillati, si è perfezionato il procedimento di raffinazione del crudo, nel tentativo di aumentare le quantità prodotte di frazioni leggere.

Al consueto processo atmosferico ed a quello sotto vuoto si sono così aggiunti altri procedimenti (come il vis-breaking ed il cracking catalitico) capaci di ottenere dai residui delle precedenti distillazioni ulteriori quantità di leggeri. Risultato di tutto ciò è stata una progressiva concentrazione nel residuo di tutte quelle impurità precedentemente diluite in una maggior quantità di fluido.

Sono in particolare aumentati i contenuti di zolfo, ceneri ed elementi incombustibili (come sodio, vanadio e residui di catalizzazione tra cui composti di alluminio e silicio). Il residuo carbonioso è pure aumentato così come la quantità di asfalteni (idrocarburi aromatici ad alta densità e viscosità). Nel seguito gli effetti nocivi sul funzionamento del motore della presenza di questi componenti nel combustibile verranno discussi unitamente ai rimedi generalmente adottati per garantire una corretta combustione e la riduzione dei danni al motore.

Il peggioramento delle caratteristiche del residuo ha anche esaltato la differenziazione tra i combustibili marini disponibili nei vari punti di bunkeraggio; è ovvio, ad esempio, che da un carico di combustibile effettuato in Medio Oriente c'è da aspettarsi un maggior contenuto di zolfo (di cui sono ricchi i crudi di quelle zone), mentre un bunkeraggio sudamericano conterrà probabilmente maggiori quantità di ceneri in linea con le caratteristiche dei greggi locali.

Sono dunque nati anche problemi di miscibilità di combustibili di diverse provenienze in quanto, dipendendo le contromisure da prendere in sede motoristica - per limitare i danni determinati dalla presenza di impurità nel combustibile - dalle caratteristiche

di quest'ultimo, ad ogni carico occorre rideterminare il corretto funzionamento dell'impianto di trattamento attraverso la modifica delle additivazioni, delle modalità di purificazione ecc.

Inoltre, essendosi concentrati nei residui anche elementi (come gli asfalteni) che in determinati ambienti rimangono in sospensione colloidale mentre in altri tendono a precipitare, è sorto anche il problema della compatibilità dei combustibili e della loro stabilità fisico - chimica durante l'immagazzinamento a bordo; infatti si è rilevato in molti casi che l'aver bunkerato combustibili differenti nelle stesse casse ha generato precipitazioni di morchie e fanghi con conseguente problema di intasamento degli impianti ove esse erano risucchiate e conseguente esigenza di arresto dell'impianto per eseguire la manutenzione richiesta dal caso.

A queste difficoltà non ha ancora fatto riscontro una normativa ufficiale nel campo della classificazione dei combustibili che, specificandone le caratteristiche, potrebbe mettere al riparo da cattive sorprese all'atto del bunkeraggio; ciò è dovuto al fatto che una volta, non esistendo ancora problemi di compatibilità ed essendo tutti i combustibili sostanzialmente simili per caratteristiche a prescindere dalla località di bunkeraggio e dal trattamento di raffinazione, le specifiche di compravendita si riducevano alla determinazione delle sole densità e viscosità del prodotto.

Oggi, con il peggiorare delle caratteristiche di combustibili e con il diversificarsi degli elementi nocivi in seno ad esso, tali indicazioni sono del tutto insufficienti; d'altro canto un completo accordo circa la catalogazione di tutti i combustibili disponibili nei vari punti di rifornimento non è stata mai possibile e ciò sia per le ragioni anzidette, sia per le resistenze di produttori ed enti di unificazione cui, in qualche caso, torna comodo 'imporre' una specifica anziché un'altra.

Quanto ai parametri che caratterizzano un attuale combustibile pesante, si indicano ora i principali di essi con relativa unità di misura e valori massimi o medi generalmente riscontrabili:

parametri:

densità	kg/cm ³	(max 0.995)
viscosità ¹	sec Red ⁻¹	(3500 ÷ 6000)
pour point	C	(60)

contenuti:

acqua	%vol.	(1)
residuo Conradson	%peso	(max 22)
ceneri	%peso	(0.2)
zolfo	%peso	(5)
vanadio	ppm	(200 ÷ 600)
sodio	ppm	(15)
asfalteni	%peso	(15 ÷ 22)

Il *pour point* di un combustibile è la temperatura alla quale inizia la separazione delle paraffine; si dice *flash point* di un combustibile la temperatura alla quale inizia la

¹ Una utile tabella di conversione tra le varie unità di misura della viscosità può essere ricavata dalle ascisse del diagramma in figura 9.

separazione delle frazioni più leggere contenute in esso.

Una distinzione semplice ma molto utilizzata per i combustibili attuali è riportata di seguito:

- MARINE FUEL OIL (MFO - denominato anche BUNKER C o n.6 FUEL):
è il puro e semplice residuo di distillazione;
- IFO X (INTERMEDIATE FUEL OIL):
sono combustibili 'blended', ossia ottenuti miscelando al residuo opportune quantità di distillato in modo da abbatterne la viscosità;
- MARINE DIESEL OIL (MDO) o MARINE DIESEL FUEL (MDF):
è un distillato pesante e può contenere modeste quantità di residuo; è il combustibile che si utilizzava in campo navale prima delle crisi energetiche;
- GASOIL:
è l'olio combustibile più leggero e di gran lunga il più costoso.

Questa distinzione non è da considerarsi una vera e propria catalogazione in quanto ammette sotto la stessa voce combustibili diversissimi tra loro i quali, se fatti girare sullo stesso motore, determinerebbero diverse condizioni di funzionamento e probabilmente guasti differenti al vari apparati legati alla propulsione. Non risultano inoltre specificate le caratteristiche medie probabili di ogni tipo incluso nell'elenco.

Funzionamento dei motori con combustibili pesanti

Esamineremo ora brevemente [1/3/4/5/8] quali sono i principali effetti della presenza di elementi estranei al combustibile in seno ad esso. Ne evidenzieremo l'origine, gli effetti nocivi sulle varie parti del motore ed infine indicheremo quali sono i possibili rimedi cui si ricorre solitamente per scongiurare le conseguenze negative della loro presenza in fase di combustione.

L'**acqua** è uno degli elementi più dannosi; essa, presente nel fluido all'origine, può aumentare di quantità per effetto di condensazione o infiltrazione durante le fasi di bunkeraggio e trasporto. Può causare danno al motore in molti modi: si combina con il vanadio ed il sodio (di cui è ricca soprattutto l'acqua di mare) formando composti molto aggressivi soprattutto nei riguardi del complesso di scarico del motore. In particolari condizioni, può generare problemi di formazione di vapore nei riscaldatori; sono stati riscontrati problemi di erosione dei meccanismi in movimento della pompa di iniezione probabilmente dovuti a cavitazione. L'acqua favorisce, inoltre, la formazione di morchie che possono ospitare colonie batteriche le quali si diffondono così nel combustibile.

Per quanto riguarda la rimozione dell'acqua dal combustibile, va detto che essa dipende dallo stato in cui essa si trova nel fluido: in generale, se non è troppo atomizzata, il sistema della centrifugazione si rivela efficiente anche se, nel caso che il combustibile abbia densità superiore a 0.991 (a 50 C) la separazione viene messa in crisi e, per poterla praticare, si può ricorrere a sistemi di aumento della densità dell'acqua stessa attraverso lo scioglimento di sali in essa solubili come il Mg_2SO_4 .

Quando invece l'azione dell'acqua è desiderabile per migliorare la combustione (come si dirà più avanti) si può ricorrere al sistema della omogeneizzazione che ne riduce le dimensioni delle particelle in seno al combustibile.

Gli **asfalteni** sono composti aromatici ad alta viscosità e densità di buona resa

termica ma caratterizzati da un tempo di combustione molto lungo. Per la differenza di densità con gli altri componenti del combustibile, tendono a separarsi creando problemi di intasamenti e morchie e ponendo problemi di stabilità del combustibile; possono generare notevoli quantità di prodotti di combustione che danno luogo ad eccessiva fumosità e vanno ad intasare le vie di scarico producendo usura delle valvole.

Alti contenuti di asfalteni possono essere causa di usura delle parti in movimento del motore come camicie, pistoni e alloggiamenti degli anelli di tenuta.

Rimedi attuabili nel caso di eccessiva presenza di asfalteni possono trovarsi nel procedimento di omogeneizzazione il quale ne riduce la granulometria evitando così la maggior parte dei rischi cui essi sottopongono il motore senza eliminarli (il che costituirebbe un'inutile riduzione di potere calorifico del combustibile).

Una contromisura escogitata da alcune case costruttrici di motori per porre rimedio al ritardo di combustione generato dalla presenza di asfalteni nel combustibile, consiste nel dare al sistema di iniezione la possibilità di variare l'anticipo in funzione delle caratteristiche del combustibile stesso.

Sono stati così messi a punto sistemi di variazione automatica dell'anticipo di iniezione i quali permettono di adattare le fasi del motore alle caratteristiche di accensione del combustibile che evolve in esso concedendo a quest'ultimo un tempo più idoneo alla completa combustione di tutte le frazioni contenute.

Va detto che combustibili ad alto tenore di asfalteni trovano la loro ideale combustione nel motore a due tempi a corsa extra lunga; infatti in tali motori la lunghezza della corsa del pistone si traduce in maggior tempo disponibile alla combustione degli elementi più "pigri", mentre negli altri tipi di motore la minore disponibilità di tempo per la combustione genera residui incombusti che sporcano il motore e peggiorano il rendimento di combustione.

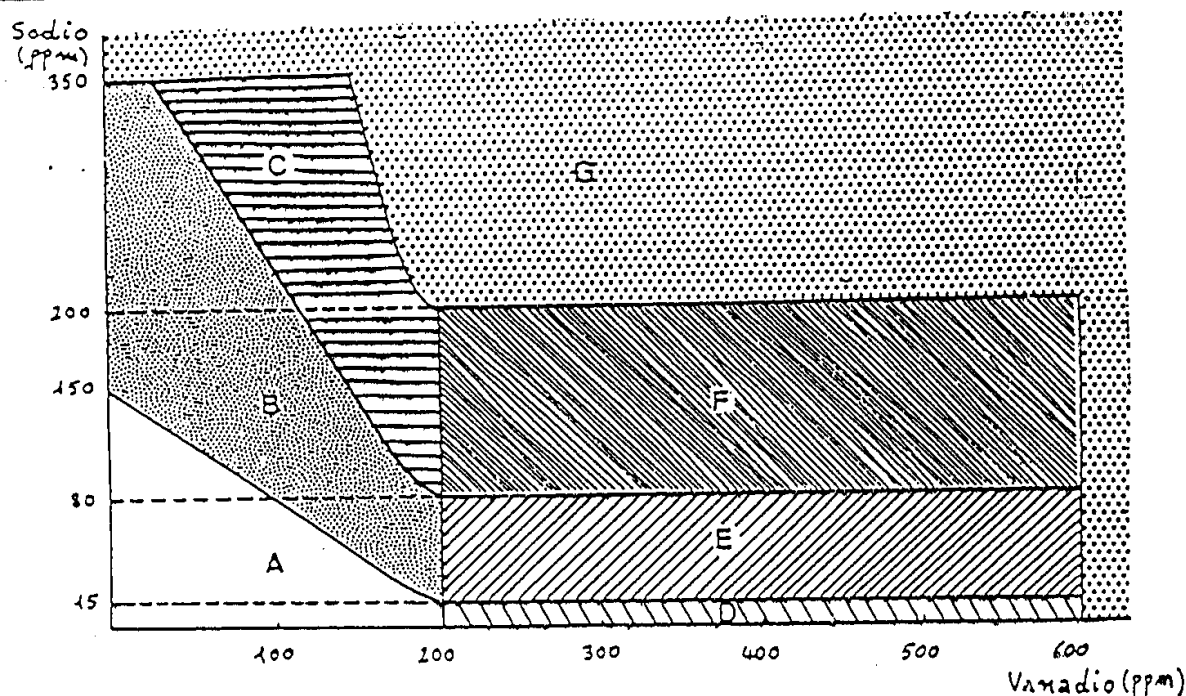
Il **residuo Conradson** (o di carbonio) pone dei seri problemi al motore: è motivo di depositi carboniosi sul pistone, sulle palette delle turbosoffianti, negli ugelli degli iniettori, nelle scanalature delle fasce. Questi depositi, una volta staccatisi dalle pareti cui aderiscono, possono essere trascinati dal movimento del pistone e generare usura abrasiva.

L'impianto di trattamento del combustibile è chiamato a ridurre il tenore di residuo carbonioso con l'eventuale ausilio di additivi che ne facilitino la precipitazione. Inoltre, quando possibile, siccome l'effetto di questa sostanza è più sensibile ai bassi carichi per effetto della riduzione di temperatura, si può pensare di elevare la temperatura dell'aria di alimento diminuendo la portata di liquido di raffreddamento della carica fresca quando il motore funziona a carico ridotto; l'aumento di temperatura in camera di combustione che ne consegue può ridurre la fumosità e con essa la tendenza a formare i depositi anzidetti. Quest'ultimo rimedio è però in contrasto, come si vedrà, con altre esigenze derivanti dalla presenza di determinati elementi nel combustibile.

In generale, nei combustibili peggiori sono presenti anche grandi quantità di **ceneri**, Tra esse risultano particolarmente dannosi soprattutto il **sodio** ed il **vanadio**; questi elementi, presenti nell'olio sotto forma di ossidi, si combinano ad alta temperatura formando sali complessi a basso punto di fusione (circa 500 C) e molto adesivi. Risultando questi composti particolarmente aggressivi ad alta temperatura, occorre raffreddare opportunamente il seggio delle valvole in modo da evitarne l'aggressione

e l'inevitabile corrosione.

Anche gli apparati di iniezione e gli accoppiamenti fasce - cilindro si mostrano sensibili all'attacco delle ceneri presenti nel combustibile. Tra gli elementi non combustibili vanno ricordati i cosiddetti fines ossia i residui dei catalizzatori che, immessi durante la raffinazione del greggio, rimangono in parte nel residuo.



I trattamenti prescritti per le diverse zone del grafico sodio/vanadio sono :

- Zona A - normale depurazione con centrifuga separatrice (a tasca d'acqua) senza trattamenti speciali (vedere allegato 2)
- Zona B - lavaggio con singolo stadio senza additivazione (vedere allegato 5)
- Zona C - lavaggio con doppio stadio senza additivazione (vedere allegati 6 e 7)
- Zona D - normale depurazione con centrifuga separatrice (a tasca d'acqua) con additivazione antivanadio (vedere allegato 8)
- Zona E - lavaggio con singolo stadio con additivazione antivanadio (vedere allegato 9)
- Zona F - lavaggio con doppio stadio con additivazione antivanadio (vedere allegato 10)
- Zona G - i combustibili di tale zona, con tenori di sodio e vanadio elevati, sono estremamente rari; pertanto le prescrizioni per il loro trattamento devono essere definite caso per caso

Nell'allegato 11 è riportato lo schema di un impianto dove è previsto l'impiego di tutti i trattamenti speciali.

Fig. 3 – Diagramma sodio-vanadio per il trattamento dei combustibili (specifica GMT)

Trattandosi di elementi particolarmente duri (silicati ed alluminio), se in quantità rilevante, possono provocare usura abrasiva particolarmente energica a carico delle camicie, delle pompe di iniezione, delle sedi delle fasce.

Il sodio può essere eliminato attraverso lavaggio con acqua dolce e centrifugazione come descritto in seguito; l'eliminazione del vanadio e dei fines comporta non poche difficoltà: si preferisce in genere aggiungere al combustibile additivi che abbassino l'aggressività a caldo di questi elementi; ogni casa costruttrice, assieme alle specifiche tecniche del motore, fornisce in generale indicazioni circa il trattamento cui sottoporre il combustibile prima del suo ingresso nei cilindri. In figura 3 [2] una specifica di trattamento combustibili della GMT per motori 4T semiveloci.

Un discorso a parte va fatto per lo **zolfo** presente in quantità sempre crescenti man mano che si spingono i procedimenti di raffinazione.

E' da considerarsi il componente più dannoso nell'ambito di quelli presenti nel combustibile pesante. Forma l'acido solforico H_2SO_4 che ha temperatura di rugiada di circa 15 C; quando il motore funziona a bassi carichi, se la temperatura scende al di sotto di questo valore, si inizieranno a formare goccioline di acido solforico il quale, in questa fase, è capace di una violenta azione di usura corrosiva per via chimica sulle camicie e su tutte quelle parti del motore particolarmente esposte all'usura.

E' oggi possibile abbassarne il tenore nel combustibile già durante la fase di raffinazione del greggio: tuttavia il prodotto desolfato è troppo costoso per essere adottato nei motori di propulsione navale ed occorre attrezzarsi per limitare gli effetti negativi descritti dell'ingresso dello zolfo in camera di combustione. In genere si utilizzano oli lubrificanti ad appropriato TBN (Total Base Number) in modo che la tendenza a creare un ambiente acido generata dal combustibile venga tamponata dalle caratteristiche basiche del lubrificante. Un accordo tra contenuto di zolfo nel combustibile e olio lubrificante di basicità opportuna è, comunque, possibile solo avendo a disposizione dati esatti sulla composizione del combustibile bunkerato. Quando questo non fosse possibile il rimedio potrebbe rivelarsi peggiore del male: sono stati rilevati casi in cui l'utilizzo di oli lubrificanti di basicità eccessiva rispetto a quella richiesta per neutralizzare l'acidità prodotta in camera di combustione dalla presenza di zolfo, ha prodotto formazione di carbonato di calcio $CaCO_3$ il quale, essendo in fase solida in tutto l'intervallo di temperature del motore, genera usure abrasive di parecchi ordini superiore a quella stessa generata da un ambiente acido. In figura 4 [8] è riportato un diagramma in cui è indicata la zona in cui è bene tenersi come contenuti di zolfo del combustibile e TBN del lubrificante per evitare problemi derivanti da eccessiva acidità o basicità dell'ambiente di combustione.

Nella parte inferiore un piccolo diagramma indica la probabile presenza di zolfo in percentuale negli attuali oli combustibili.

In generale, in presenza di alto tenore di zolfo, conviene mantenere la temperatura dei componenti la camera di combustione al di sopra della temperatura di rugiada degli acidi; ciò significa che, specialmente ai bassi carichi, si può operare sulla portata di fluido refrigerante della carica fresca così da innalzare al valore desiderato la temperatura dell'aria di alimento.

Da un punto di vista macroscopico due sono le grandezze fisiche d'interesse per un combustibile: la **densità** e la **viscosità**.

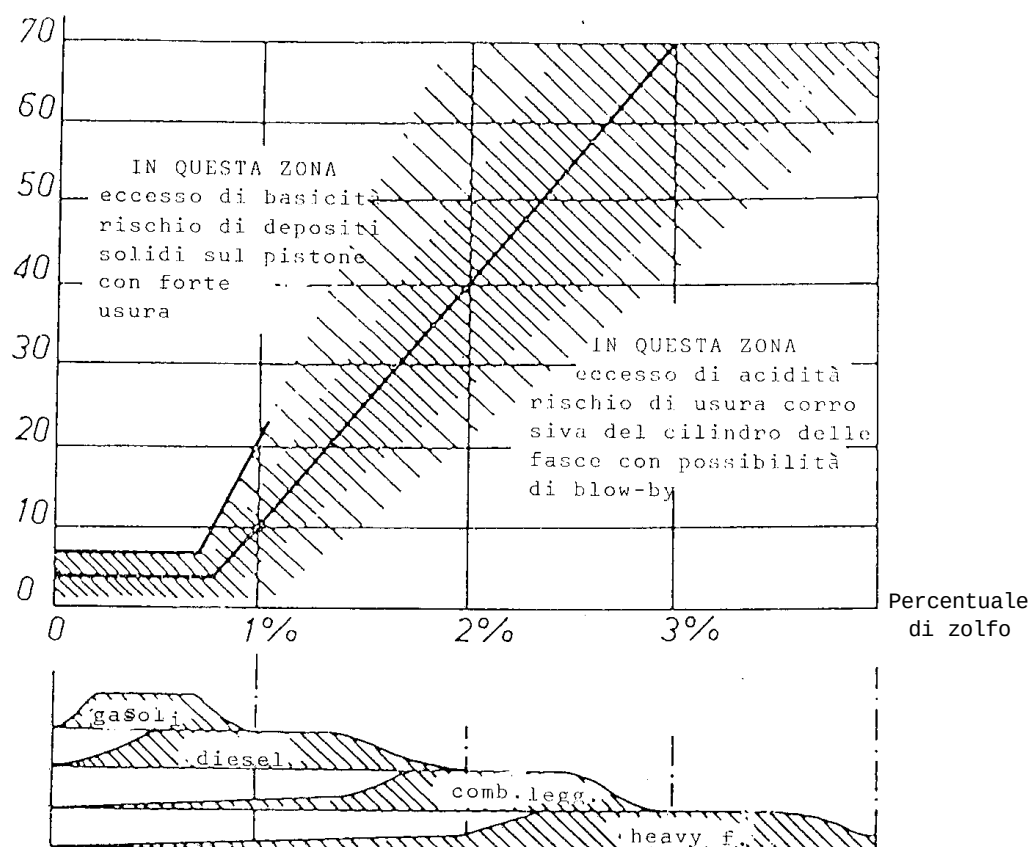


Fig. 4 – TBN in funzione del contenuto di zolfo

La densità non è un vero e proprio limite per la combustione: costituisce però un grosso problema per la raffinazione del combustibile; negli ultimi anni, infatti, il suo valore si è avvicinato all'unità (valore che ha, in qualche caso, superato) con conseguente messa in crisi dell'apparato di centrifugazione.

Quest'ultimo si basa proprio sulla differenza di peso specifico tra acqua e restanti componenti ed entra in difficoltà per densità dell'ordine di 0,991 (o un po' di più per centrifughe pressurizzate). In taluni casi si ricorre a soluzione nell'acqua di additivi come il Mg_2SO_4 che ne elevano la densità rendendola più facilmente eliminabile con la centrifugazione.

La viscosità è anch'essa, in linea di principio, ininfluenza ai fini della resa del combustibile; pone però due problemi di funzionamento: rende difficile il passaggio nei tubi del combustibile e la sua atomizzazione al momento della iniezione nel cilindro. Entrambi questi problemi possono essere risolti riscaldando opportunamente il fluido abbattendone in tal modo la viscosità; in particolare, immediatamente a monte dell'iniezione tale grandezza non deve superare il valore di 2 - 3 °E.

Per conoscere la temperatura cui si deve portare il fluido basta riferirsi al diagramma di figura 9 che riporta i valori della temperatura di preriscaldamento del combustibile per ottenere una viscosità di 2 gradi Engler.

Un cenno va fatto anche a proposito della compatibilità dei combustibili. Capita, infatti, che, a causa di bunkeraggi con combustibili molto diversi fra loro, vengano a contatto combustibili con qualità non affini; possono in tal caso avvenire precipitazioni di elementi con conseguenti intasamenti di passaggi del fluido e necessità di manutenzione straordinaria. Per questo motivo, all'atto del bunkeraggio, sarebbe desiderabile poter disporre di dettagliate specifiche sui combustibile che si va caricando in modo da stabilirne la compatibilità con quello eventualmente rimasto nelle casse. In assenza di queste specifiche si potrebbero eseguire delle analisi a bordo per stabilire la qualità del combustibile ottenuto miscelando il nuovo con il vecchio ma va detto che esperienze del genere non sempre hanno portato a risultati positivi.

Impianti di trattamento

Per poter bruciare combustibili ad alta viscosità e contenenti grandi quantità di impurità occorre realizzare un efficace trattamento a bordo che ha un duplice scopo:

- eliminare (nei limiti del possibile) le frazioni potenzialmente dannose per evitarne l'ingresso nel motore;
- abbassare la viscosità finale del combustibile per permetterne l'iniezione nel cilindro.

L'efficienza dei sistemi di trattamento a bordo diventa fattore sempre più importante man mano che la qualità dei combustibili bunkerati peggiora; tutti i componenti di un tale sistema si trovano, infatti, a lavorare in condizioni limite per le loro capacità a causa delle alte viscosità e densità del combustibile che rendono problematico lo svolgimento delle funzioni specifiche di ogni singola sezione del sistema.

In figura 5 è riportato un classico schema a blocchi di impianto di trattamento combustibile di cui si descrivono ora i componenti principali:

CASSE NAFTA: Sono progettate per contenere il combustibile prima del suo ingresso nel sistema di trattamento ed proprio in esse che avviene la prima fase di separazione dell'acqua e delle impurità contenute. In generale sono in numero tale

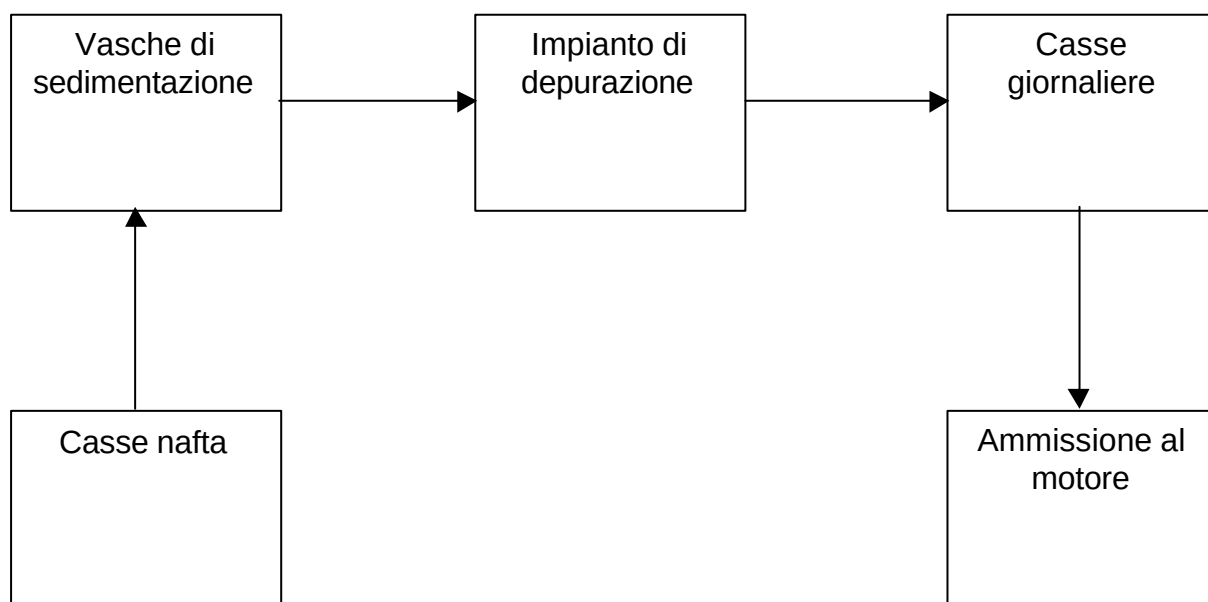


Fig. 5 – Schema a blocchi impianto di trattamento combustibile

da garantire sia un opportuno frazionamento del carico liquido in esse contenuto sia la possibilità di tener separati combustibili provenienti da differenti bunkeraggi che potrebbero risultare incompatibili fra loro. Per facilitare il movimento del combustibile è previsto un sistema di riscaldamento a tubi scaldanti che deve essere in grado di mantenere una temperatura di almeno 30 °C. In molte realizzazioni sono previsti anche sistemi atti ad evitare la condensazione o l'ingresso di acqua ed indicatori di livello oltre ad eventuali altri misuratori atti ad indicare lo stato e le qualità del combustibile.

VASCHE DI DECANTAZIONE - La sedimentazione si può considerare il primo stadio di trattamento; essa serve soprattutto per eliminare l'acqua contenuta in forma meno emulsionata nel veicolo fluido e quelle parti estranee al combustibile di densità più elevata. La decantazione avviene per gravità: le particelle più pesanti tenderanno a separarsi dal fluido per depositarsi sul fondo; dipendendo la separazione dal percorso che le particelle devono compiere, è evidente che due saranno i fattori determinanti per l'efficacia del sistema:

- differenza di viscosità e densità tra combustibile utile e parti estranee;
- distanza del pelo libero dal fondo.

La prima caratteristica può essere esaltata con una opportuna scelta della temperatura alla quale far avvenire la decantazione; dato, infatti, che al crescere della temperatura la densità dell'acqua decresce molto meno di quella del combustibile, basterà riscaldare il fluido per ottenere un notevole incremento della velocità di decantazione.

Bisogna però tenersi sufficientemente distanti dal flash point del combustibile perché l'eventuale riscaldamento al di sopra di esso, permettendo la liberazione di frazioni leggere del combustibile, provocherebbe un nuovo indesiderato aumento della viscosità.

La profondità della cassa si stabilisce in funzione della disponibilità di spazio e delle esigenze di velocità di sedimentazione nonché di portata di combustibile da fornire al motore.

Per evitare che i moti oscillatori della nave rimescolino le impurità decantate e ne permettano l'ingresso nelle bocche di aspirazione del combustibile depurato, in genere al fondo delle casse di sedimentazione viene dato un'opportuna inclinazione che ostacoli la risalita delle particelle in seno al fluido.

Il tempo di sedimentazione viene deciso in funzione delle caratteristiche del combustibile e delle esigenze di alimentazione del motore; si valuta, a titolo indicativo, che un combustibile pesante richieda una sedimentazione di circa 4 gg. a 50 °C.

IMPIANTO DI DEPURAZIONE - Di esso fanno parte tutte le sezioni preposte all'allontanamento dal combustibile delle impurità solide e liquide in esso contenute sotto forma di ruggine, polvere, residui di catalizzazione, acqua (salata e non).

In genere, un impianto di depurazione consta dei seguenti elementi:

- depuratore centrifugo
- filtri
- omogeneizzatore

Il *depuratore centrifugo* (di cui un esempio tipico in figura 6) è costituito da un gruppo rotante realizzato con un pacco di dischi conici e da alcuni corpi statorici.

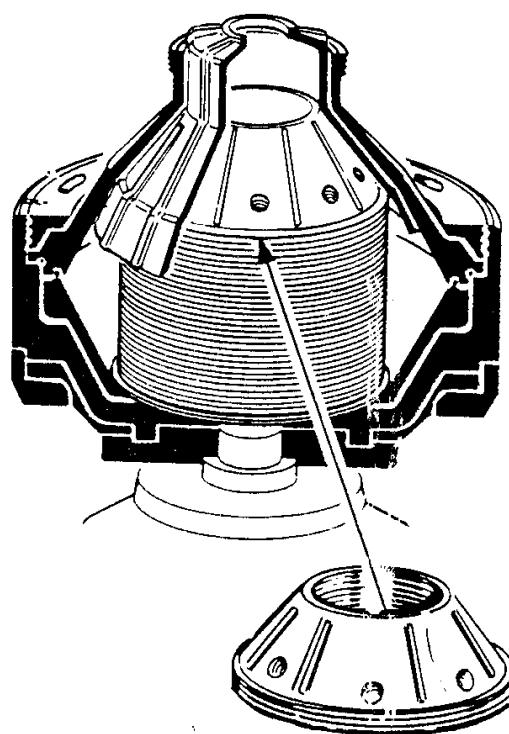
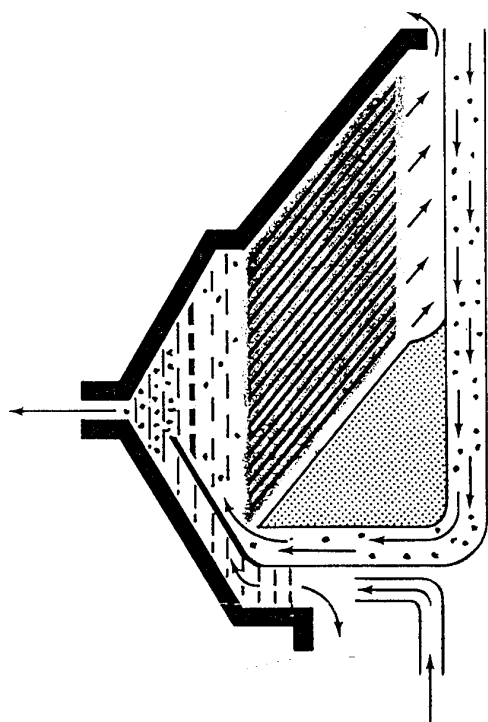
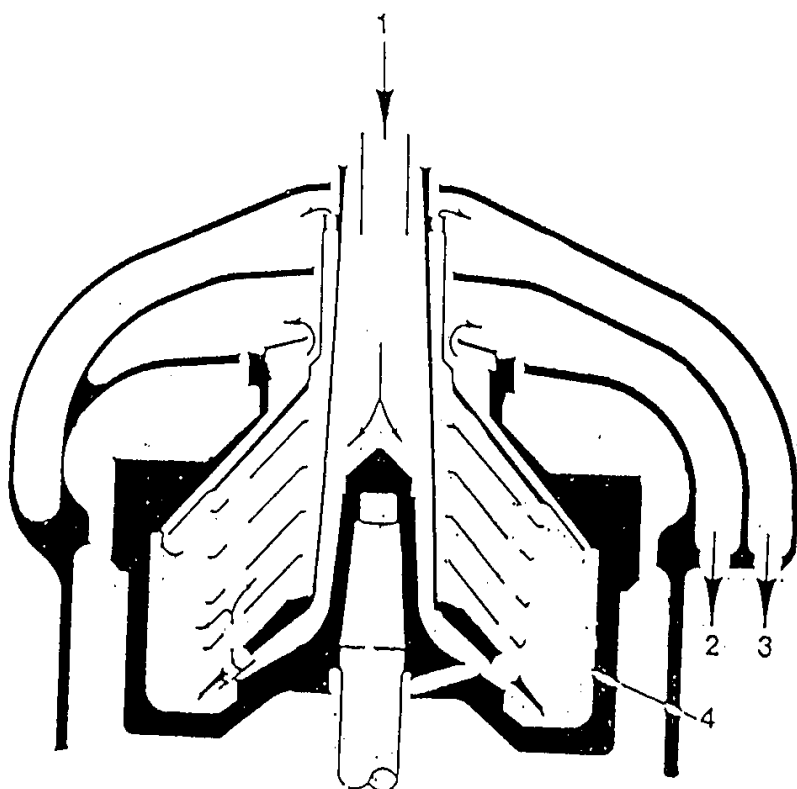


Fig. 6 – Depuratore centrifugo

Dall'ingresso 1 il fluido da depurare raggiunge subito il fondo attraverso il condotto realizzato al centro del depuratore. Quivi risale passando attraverso il pacco di dischi; si vede che in questa fase ogni elemento fluido soggetto a due forze: la forza di trascinamento che, in seno al fluido, lo sposterebbe verso l'interno del sistema e la forza centrifuga che tende invece a riportarlo verso l'esterno. Quando quest'ultima forza prevale (ed è il caso delle particelle più pesanti come l'acqua nonché molte impurità solide), la particella ad essa soggetta viene spostata verso l'esterno e, se liquida, forma una corrente che si introdurrà nell'intercapedine che sbocca nell'uscita 2; se solida, verrà trattenuta all'interno del corpo cilindrico (4) per poi essere successivamente drenata. Dal canto suo il combustibile trattato - di minore densità - risalirà lungo la parte centrale del depuratore attraverso i condotti che fanno capo all'uscita 3.

La presenza dei dischi serve a fare da ostacolo per le particelle solide e per quelle di acqua le quali, frenate dai dischi stessi, iniziano prima il loro percorso di ritorno verso l'esterno del corpo cilindrico. La ridotta distanza fra di essi (in genere inferiore al millimetro) opera una ulteriore selezione nei confronti delle particelle solide riducendo la probabilità che hanno quelle di minore dimensione di arrivare al centro del depuratore.

Fattore decisivo ai fini della separazione è la velocità di ingresso del fluido da depurare (e quindi, a parità di sezione, la sua portata); infatti, aumentando tale velocità, crescerà anche la forza di trascinamento del fluido sulle particelle in seno ad esso e quindi la forza centrifuga riuscirà a "stornare" verso l'esterno un numero più basso di impurità con conseguente riduzione dell'efficienza di depurazione. Per evitare questo inconveniente, in quei casi in cui l'esigenza di combustibile è tale da richiedere un flusso troppo elevato per una buona depurazione, si può decidere di installare più d'una centrifuga, ripartendo in tal modo la portata e con essa abbassando la velocità con cui il liquido da depurare entra in ogni centrifuga.

Quando le impurità presenti nel fluido sono di diversa taglia, conviene operare in serie come mostrato in figura 7 [3]. Durante il passaggio nella prima centrifuga (fase di purificazione), vengono separate le particelle di dimensioni più elevate e gran parte dell'acqua; nella fase seguente (di chiarificazione) si eliminano impurità di dimensioni inferiori. Gli impianti di dimensioni maggiori sono dotati in genere di intere batterie di depuratori funzionanti sia in serie che in parallelo.

In caso di presenza eccessiva di sodio nel liquido da depurare, essendo questo metallo di difficile centrifugazione, si provvede ad aggiungere acqua al combustibile in modo che le particelle di sodio, agglomeratesi all'acqua, possano essere trascinate via in seno a quest'ultima; in alcuni casi potrebbero essere necessari più stadi di lavaggio e, di conseguenza, elevate portate d'acqua.

Dovendosi utilizzare acqua a basso tenore iniziale di sodio, potrebbe esserci difficoltà di disponibilità idrica; in tal caso è possibile utilizzare la stessa acqua di lavaggio per più di uno stadio, risparmiando così sul quantitativo totale d'acqua da utilizzare ma ottenendo una separazione meno spinta del sodio. Riguardo alla temperatura di ingresso del combustibile nel separatore, va detto che le attuali naffe pesanti hanno densità molto vicina a quella dell'acqua; ciò comporta una grande difficoltà di centrifugazione la quale, per essere sufficientemente efficiente, necessita proprio di agire su liquidi a diverso peso specifico così da spingere il più pesante verso l'esterno ed il più leggero verso l'interno del corpo di separazione.

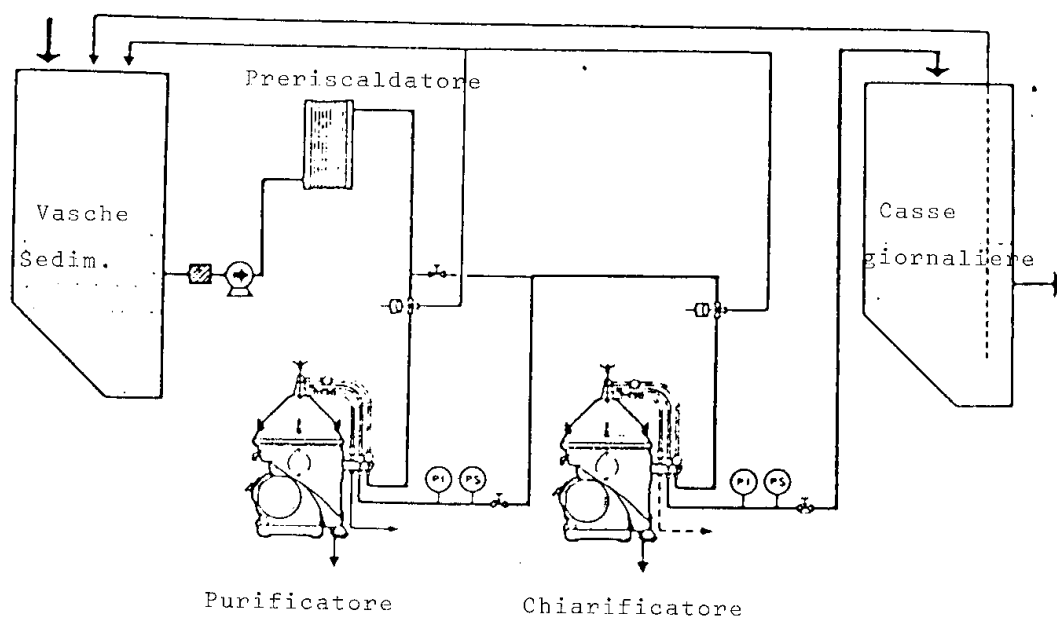


Fig. 7 – Depurazione in serie

Il problema si risolve semplicemente preriscaldando il fluido da ammettere al separatore centrifugo: infatti, la curva di densità del combustibile è più favorevole di quella dell'acqua nel senso che, con l'aumentare della temperatura tra 10 C e 60 C, la differenza di densità tra i due liquidi si fa sempre più alta. Questa tendenza si arresta sui 60 C, rimanendo, da quella temperatura in avanti, la differenza tra le due densità abbastanza costante fino alla ebollizione.

Riscaldando allora il fluido in ingresso si può ottenere una differenza di densità tra acqua e combustibile di oltre il 5% valore da ritenere sufficiente per un'efficiente separazione per centrifugazione. In realtà, la temperatura di preriscaldamento spesso viene spinta fin quasi ai limiti di ebollizione dell'acqua; ciò perché si è visto che la separazione diviene più efficiente al diminuire della viscosità del fluido da depurare la quale, a sua volta, decresce all'aumentare della temperatura. Riscaldando, quindi, il combustibile a monte della centrifugazione si ottengono condizioni di separazione migliori sia dal punto di vista della densità che della viscosità, entrambi parametri molto influenti sull'efficienza dell'intero processo.

Per quanto riguarda i *filtri*, in generale ve ne sono in molti punti dell'impianto; la loro principale funzione è quella di salvaguardare alcune parti dell'impianto (pompe, riscaldatori, centrifughe etc.) dall'aggressione di impurità di maggiori dimensioni che potrebbero metterne in pericolo il funzionamento; con la crescita della tecnologia della loro costruzione, i filtri sono oggi da considerarsi parte integrante del sistema di depurazione del combustibile. La dimensione della maglia del filtro dipende dalle caratteristiche che il fluido ha mentre lo attraversa: filtri posti in zone dove il combustibile è ancora molto grezzo e non molto caldo dovranno essere necessariamente più larghi mentre in punti ove è già avvenuta parte della raffinazione e il fluido è stato più riscaldato, sarà possibile inserire filtri a rete più stretta (anche dell'ordine dei 5 μ m). Ciò perché la temperatura più alta conferisce al fluido una densità minore con la conseguenza di allontanare il pericolo di intasamento. Ovviamente queste ultime condizioni permettono un filtraggio più

spinto in quanto le maglie più strette trattengono anche impurità di dimensioni inferiori che invece sfuggono a filtri più "aperti".

I filtri in uso attuale sono del tipo autopulente ed in genere sono utilizzati a coppie in parallelo ma funzionanti secondo modalità di stand-by: a regime uno è disinserito e l'altro elabora l'intera portata di fluido; ad intervalli regolari si inverte la situazione approfittando del disattivamento del primo filtro per pulirlo o eseguirne la manutenzione.

L'uso degli *omogeneizzatori*, diffusosi negli ultimi anni in conseguenza del peggioramento delle caratteristiche dei combustibili, è volto a rendere uniforme il fluido da bruciare nel motore dal punto di vista delle impurezze contenute; queste ultime, infatti, non sono eliminate, come avviene con la centrifugazione, ma vengono suddivise in particelle di dimensione inferiore (in genere non più di 5 μm) il che le renderà meno aggressive al momento del loro ingresso nel motore.

In particolare, per quanto riguarda l'acqua contenuta nel combustibile, si è visto che un tenore di acqua dolce fino al 10% (limite da non superare per evitare un'eccessiva depressione del potere calorifico del combustibile) giova alla combustione, purché presente sotto forma di particelle finissime (non oltre i 10 μm). Ciò è dovuto al fatto che l'acqua, al momento dell'entrata in camera di combustione, evapora molto rapidamente aumentando la turbolenza nel cilindro e migliorando, in definitiva, il rendimento di combustione; è stato provato in sede sperimentale che, in tal modo, si riducono anche le incrostazioni nel cilindro e sulla corona del pistone.

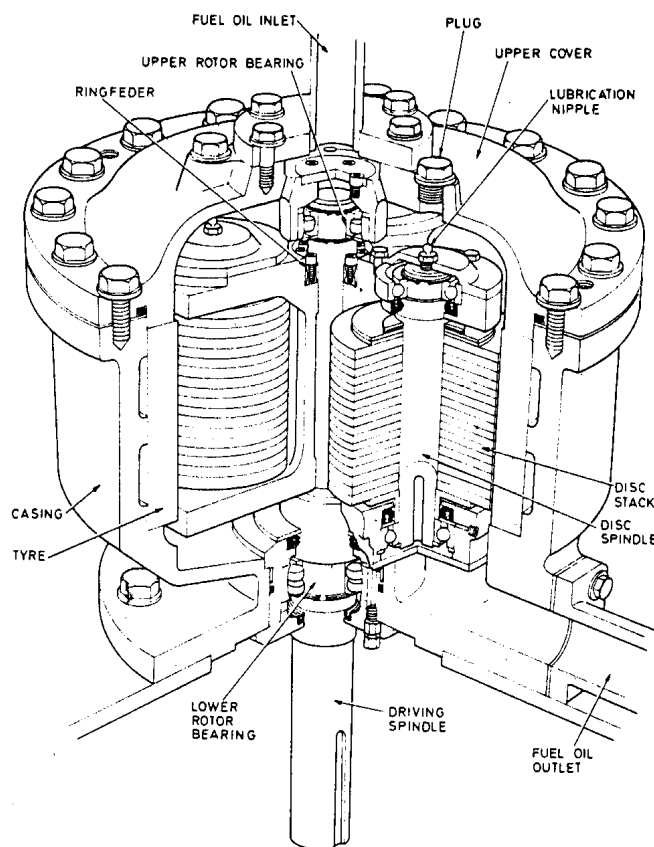


Fig. 8 - Omogeneizzatore

Con la omogeneizzazione, quindi, si può realizzare questa condizione ed anzi può essere conveniente addirittura aggiungere acqua al combustibile, sempre nei limiti del 10% e purché a basso contenuto di sodio, per evitare i problemi posti da questo elemento in fase di combustione.

L'omogeneizzatore (figura 8) è costituito da diverse pile di dischi ad asse parallelo a quello del corpo centrale; i dischi sono sufficientemente vicini in modo che, posto in rotazione il sistema, la viscosità del fluido possa essere utilizzata per trasmettergli l'energia cinetica derivante dalla forza centrifuga. Le particelle presenti nel fluido vengono così sottoposte ad un'energica azione di compressione che le sminuzza fino a fare assumere loro le dimensioni desiderate.

In questo modo si esercita anche un'azione di rimescolamento tra eventuali frazioni diverse presenti nel combustibile, rendendo quest'ultimo più omogeneo anche sotto questo punto di vista. Altri vantaggi della omogeneizzazione possono essere riscontrati nel rimescolamento di eventuali inibitori chimici o additivi di varia natura aggiunti al combustibile, nella diminuzione del rischio di intasamento dei filtri, nella possibilità di liberare eventuali residui porosi di catalizzazione aggregatisi agli asfalteni e di difficile eliminazione con la centrifugazione a causa del basso peso specifico del complesso.

Infine, proprio riguardo agli asfalteni, composti aromatici ad alta resa energetica ma di lenta combustione, va detto che l'omogeneizzazione ha un effetto particolarmente benefico in quanto li redistribuisce uniformemente in seno al combustibile così favorendo condizioni di funzionamento più regolari del motore.

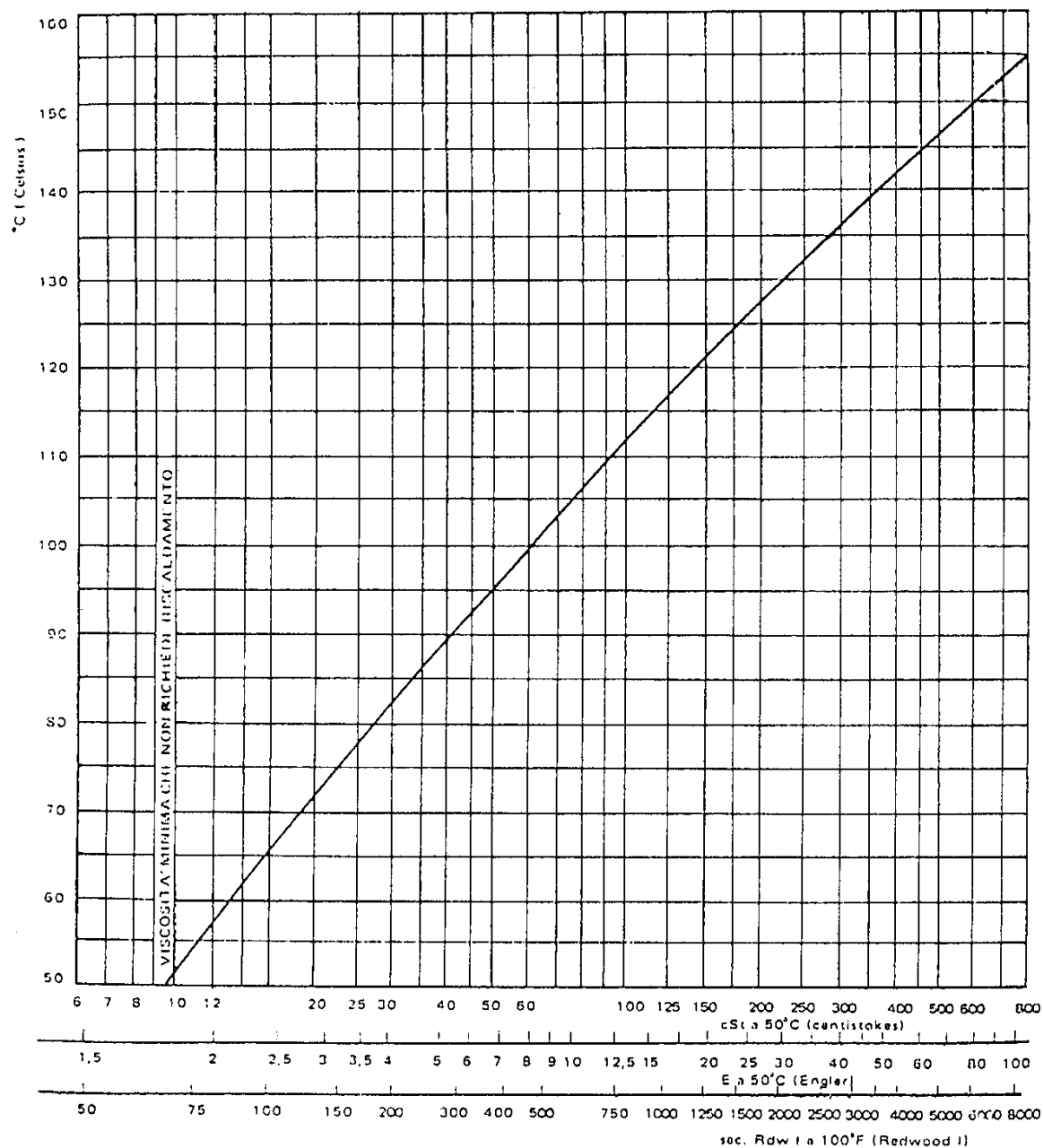
Del sistema di depurazione devono essere considerati parte integrante anche altri sistemi come *miscelatori* eventualmente presenti (atti a rimescolare combustibile appena trattato con i vari spurghi e recuperi utili del motore) e tutti i *riscaldatori* di circuito che servono a conferire al fluido la viscosità necessaria ad un efficace scorrimento lungo le varie sezioni dell'impianto.

CASSE GIORNALIERE - Le casse di servizio (o giornaliere) servono a contenere il fluido dopo le operazioni di depurazione e funzionano da polmone nei riguardi della alimentazione del motore; in esse si svolge un'ulteriore decantazione di eventuali sostanze estranee accidentalmente incluse nel combustibile oppure sfuggite alla centrifugazione. Per questo motivo nel progetto delle caratteristiche delle casse giornaliere si deve tenere conto delle stesse considerazioni fatte per le casse di sedimentazione. Avranno, pertanto, anch'esse il fondo inclinato, un sistema di drenaggio di acqua e decantato, saranno provviste di sistema di riscaldamento del combustibile (in generale a tubi scaldanti alimentati a vapore e proporzionati in modo da mantenere temperature comprese tra 60 e 80 C e comunque inferiori di almeno 10 C al flash point del combustibile), di allarmi di troppo pieno e di livello minimo ecc. In ogni sistema di trattamento sono presenti almeno due casse di servizio: in una affluisce il combustibile appena depurato, l'altra provvede all'alimentazione del motore. Quando il livello nella cassa che sta alimentando il motore si abbassa ad un valore prestabilito, si inverte il funzionamento e l'altra cassa provvederà alla alimentazione mentre nella prima prenderà a fluire il combustibile proveniente dal sistema di trattamento.

AMMISSIONE AL MOTORE - Prima di entrare nell'apparato di iniezione, il combustibile passa attraverso una serie di altri organi atti a garantire il regolare funzionamento del motore; dovendosi presentare alle pompe con una viscosità tale da non generare

problemi di polverizzazione (circa 2 gradi Engler), il combustibile dovrà essere mantenuto ad una determinata temperatura (la cui lettura può essere effettuata sul diagramma di figura 9). Il controllo di tale temperatura viene effettuato dal *viscosimetro* il quale, posto in prossimità dell'ingresso del combustibile al motore è in grado di misurarne la viscosità: se questa risulta idonea al funzionamento del motore il viscosimetro non interviene; in caso contrario emette un segnale direttamente proporzionale alla viscosità misurata. Questo segnale, recepito dai riscaldatori di circuito del combustibile, mette gli stessi in grado di regolare il proprio funzionamento in modo da scaldare il fluido alla temperatura più opportuna. In generale, il viscosimetro è corredato da valvole di by-pass (che entrano in funzione quando non è in grado di funzionare oppure quando non ne è richiesto l'intervento); trattandosi di uno strumento molto delicato, la taratura deve essere realizzata ad intervalli regolari e con l'accuratezza richiesta dal caso.

Altre apparecchiature presenti a monte delle pompe di iniezione possono essere filtri finali (a rete da 10 μm a protezione delle pompe stesse), misuratori di flusso o di consumo, valvole di smistamento di sicurezza casse di recupero o di raccolta spurghi.



Nel grafico sono riportate le temperature a cui si deve riscaldare il combustibile, prima delle pompe di iniezione, per portare la sua viscosità a 9,65 cSt (1,8 °E, 52 sec. Rdw. 1); i valori di viscosità in parentesi sono stati ottenuti per conversione di quello in centistokes alla stessa temperatura. Questo valore è stato definito per ottenere una viscosità del combustibile, ai pulverizzatori, di 21÷29 cSt (3÷4 °E, 90÷120 sec. Rdw. 1), con una pressione di iniezione di 900 kg/cm²; i valori di conversione in parentesi sono equivalenti a quello in centistokes alla stessa temperatura. La tolleranza massima, ammessa nella regolazione della temperatura è di ± 5 °C. Tenendo conto della coibentazione dei tubi e del lavoro di compressione, si ammette che la temperatura del combustibile non vari dalla pompa al pulverizzatore. Qualora non si conosca la viscosità del combustibile, è possibile determinarla in modo semplice, anche se approssimato, utilizzando la coppa Ford; oppure, in modo più preciso, impiegando un viscosimetro dinamico tipo Brookfield.

Fig 9 - Temperatura di riscaldamento degli oli combustibili per ottenere una viscosità idonea all'ammissione al motore

Bibliografia

- [1] G. Simini: *L'uso di combustibili pesanti e di combustibili alternativi nei moderni motori diesel*, Centro stampa GMT
- [2] *Specifica tecnica sul funzionamento con combustibili pesanti motori GMT*, Centro stampa GMT
- [3] R. H. Thornton et al.: Marine fuels and international Standards, *Marine Fuels* (ASTM special technical publication 878), Atti del Simposio "Marine Fuels", Florida, 7 – 8 dic. 1983, C.H. Jones ed.
- [4] A. Di Lorenzo, G. Landri, G.P. Gerbaz, L. Imparato: Adattamento dei lubrificanti per motori diesel marini nell'attuale panorama combustibili, *Atti del Congresso Nav 86*
- [5] M. K. Eberle: Combustibles actuels et futurs de médiocre qualité, *Bulletin technique du Bureau Veritas*, aprile 1980
- [6] G. Zappa: I combustibili per il motore diesel nel presente e nel prossimo futuro, *La Marina Mercantile*, 1981
- [7] W. Giunti: Combustibili marini: situazione attuale e prospettive alternative, *La Marina Mercantile*,
- [8] R. McMahon: Treatment of marine fuels, *Bulletin technique du Bureau Veritas*, aprile 1981
- [9] M. Manni: *Tesi di laurea: Sull'uso attuale e futuro dei combustibili di bassa qualità e/o alternativi nei motori diesel marini*, Università di Napoli, Dipartimento di Meccanica per l'energetica, AA 1984/85
- [10] G. Landri, A. Paciolla, F. Quaranta: Combustibili e lubrificanti per motori diesel marini: problematiche, normative, sperimentazioni, *La termotecnica*, ottobre 1989