

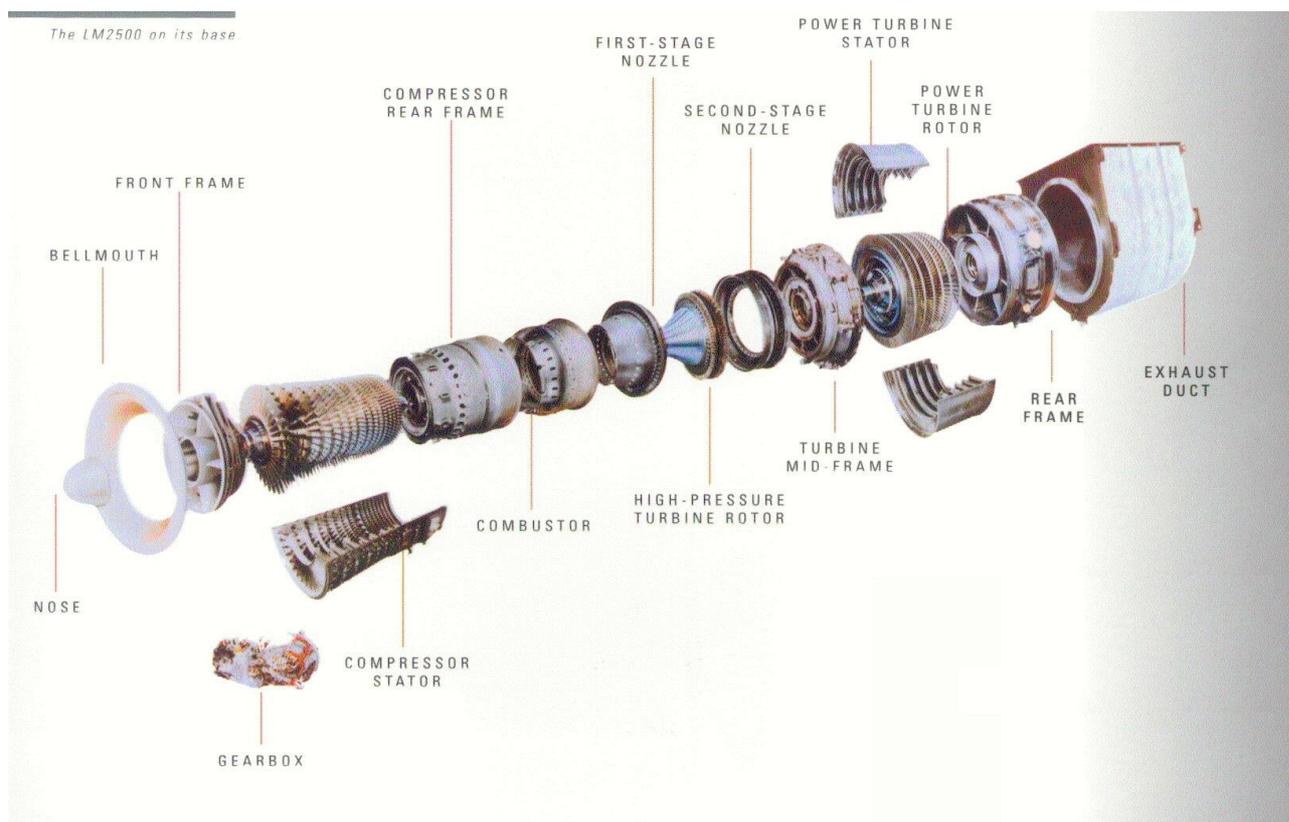
ACCADEMIA NAVALE



NOZIONI DI MACCHINE MARINE

A cura del :

C.F.(GN) Andrea BOESSO



POLIGRAFICO ACCADEMIA NAVALE

LIVORNO - 2004

1. DEFINIZIONE E CLASSIFICAZIONE DEGLI APPARATI MOTORI

Nella forma più generale possibile si può definire "impianto di propulsione" l'insieme degli elementi che permettono il controllo della velocità della nave: in accordo con questa definizione sono impianti di propulsione sia le vele ed i remi tanto quanto un qualunque tipo di impianto meccanico trascurando, per il momento, la natura dell'energia impiegata.

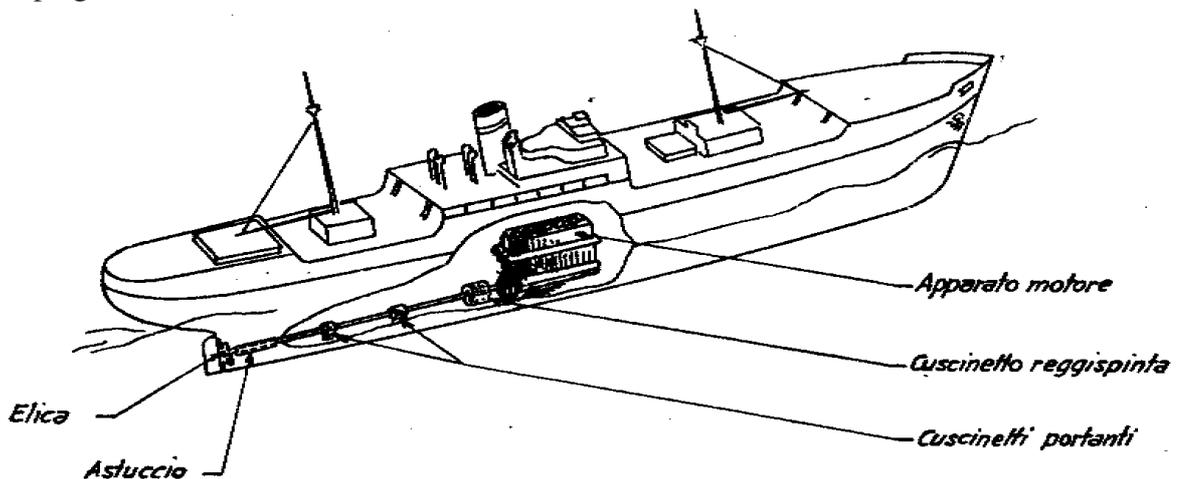


Figura 1 Impianto di propulsione

L'impianto di propulsione è fondamentalmente un sistema che trasforma energia di natura diversa in energia cinetica della nave, ovvero in velocità; la presenza di tale energia può essere assolutamente casuale o, comunque, non controllabile come il caso del vento: nel senso moderno del termine l'impianto di propulsione non è semplicemente un sistema di trasformazione di una qualche forma energetica, ma deve permettere il completo controllo della velocità della nave, svincolandolo, in linea di massima, da qualunque casualità. Se consideriamo quindi quest'ultima come la definizione dell'impianto di propulsione esso è l'insieme degli elementi che permette un completo controllo sulla velocità e la direzione della nave, agendo come trasformatore di una forma energetica sulla quale deve essere possibile esercitare un controllo completo.

L'impianto di propulsione, inteso nel senso moderno, trasforma l'energia chimica potenziale, contenuta nel combustibile, in energia cinetica della nave: per fare ciò si serve di un gruppo di organi meccanici, detto *macchina*¹, nel quale l'energia chimica viene liberata, trasformata quindi in energia termica e successivamente in energia meccanica: tale macchina viene detta *apparato motore*; l'ultimo passaggio del sistema sarà quello di trasformare l'energia meccanica fin qui ottenuta in energia cinetica della nave e quindi, per la nota relazione che lega questa alla velocità, in velocità della nave stessa; questa trasformazione avviene grazie all'elica navale nella quale, grazie alle pale ed alla loro particolare geometria, l'energia meccanica fornita sotto forma di rotazione di un asse diviene accelerazione dell'acqua e quindi forza agente, tramite l'elica, sulla nave stessa; l'elica navale viene detto *propulsore*; in senso generale il propulsore è l'elemento nel quale l'energia meccanica generata dall'apparato motore viene convertita in energia cinetica nave.

¹ L'apparato motore è macchina in senso termodinamico, ovvero non è necessariamente un unico sistema come un motore diesel, ma può essere molto grande e formato da diversi elementi separati, come il caso di un apparato a vapore: da notare che macchina è appunto il sistema con il quale l'energia chimica viene convertita in energia meccanica.

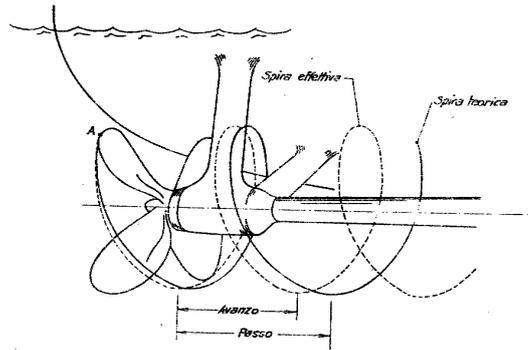


Figura 2 **Elica navale**

Si può schematizzare dicendo che, maggiore è la velocità di rotazione dell'elica maggiore è l'accelerazione dell'acqua e, di conseguenza, maggiore è la forza che questa esercita sull'elica stessa e quindi sulla nave, variandone la velocità; ma per avere una velocità di rotazione maggiore è necessario produrre un lavoro meccanico maggiore e quindi produrre una maggiore energia termica, la quale è chiaramente funzione della quantità di combustibile utilizzato nell'unità di tempo.

L'impianto di propulsione è quindi formato da due distinti elementi: l'apparato motore ed il propulsore che, sebbene esplicino una funzione complementare, possono essere considerati, scelti e progettati separatamente, entro certi limiti naturalmente.

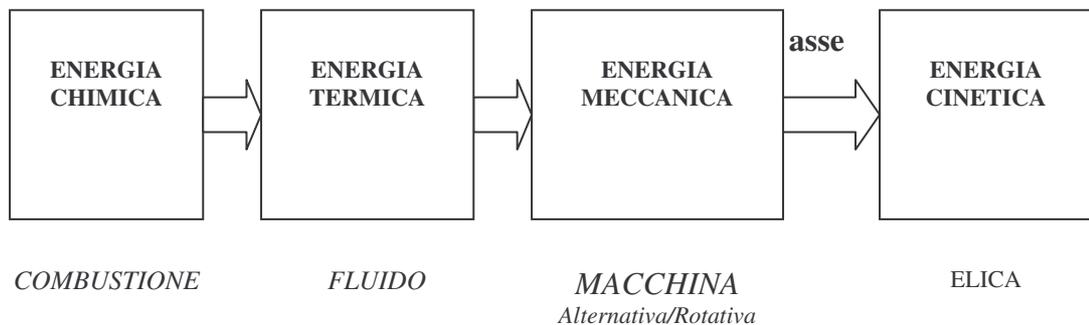


Figura 3 **Schema di principio trasformazione energia**

Dallo schema della figura (3), si comprende come nell'apparato motore l'energia chimica contenuta nel combustibile sia convertita in energia termica, la quale, a sua volta, viene trasformata, **parzialmente**, in energia meccanica attraverso l'utilizzo di un fluido che esegue opportune trasformazioni in forma ciclica; attraverso l'asse tale energia meccanica viene inviata al propulsore, che la tramuta in energia cinetica, anche in questo caso **parzialmente**.

In questo modo si è ottenuto un sistema che permette di controllare direttamente la velocità della nave e, semplificando, questa dipende solo dalla quantità di combustibile utilizzato: il sistema agisce trasformando l'energia chimica del combustibile in energia cinetica della nave.

Riassumendo si è suddiviso l'impianto di propulsione in due parti separate:

- **l'apparato motore**, ovvero quella parte dell'impianto di propulsione nella quale avviene la trasformazione dell'energia chimica in energia termica e quindi in lavoro meccanico; definiremo quindi apparato motore quell'insieme di organi nel quale avviene il ciclo del fluido e che produce come risultato un lavoro meccanico, generalmente la rotazione di un asse
- **il propulsore**, ovvero quella parte dell'impianto ove l'energia meccanica viene convertita in energia cinetica della nave e che può essere quindi un'elica od un idrogetto

La classificazione degli impianti propulsivi nella loro globalità è estremamente complessa, potendo variare sia l'apparato motore che il propulsore: giova però notare che la quasi totalità delle navi utilizza come propulsore l'elica che, nel corso degli anni, ha dato prova di essere estremamente affidabile e di avere alti rendimenti; si può dire che il propulsore di una nave può essere "convenzionale" se basato sull'elica, "non convenzionale" se basato su altri sistemi.

La classificazione che adottata suddivide gli impianti in due distinte tipologie:

- **Apparati convenzionali**: sono gli apparati ove si ha una combustione, ovvero una reazione chimica particolare (definita come una ossidazione rapida tra un combustibile ed un comburente che, generalmente, è l'aria) il cui scopo è quello di trasferire calore ad un fluido (comunemente detto "termovettore"), il quale compie un "ciclo termodinamico" all'interno di una o più macchine con la conseguente trasformazione della propria energia termica in energia meccanica; il sistema così delineato segue strettamente la nostra impostazione: sorgente calda e trasformazione dell'energia chimica in termica, fluido e quindi conversione dell'energia termica in meccanica; i caratteri distintivi particolari degli impianti convenzionali sono quindi la presenza di una combustione preposta alla produzione di energia termica (i.e. calore) e di un ciclo termodinamico di trasformazione di quest'ultima in energia meccanica utilizzabile dal propulsore.

Come nel caso della classificazione dei propulsori, anche in questo caso il termine "convenzionale" indica la grande preponderanza di questo tipo di impianto rispetto alle altre tipologie possibili, il che lo rende il più utilizzato e quindi elemento di paragone e confronto.

- **Apparati non convenzionali**: sono gli impianti nei quali non vi è combustione; essi possono essere basati sulla conversione diretta dell'energia chimica in energia elettrica e successivamente meccanica, come nel caso dei moderni sistemi a rigenerazione dei sottomarini, ove la cella elettrolitica, nella quale avviene l'ossidazione del combustibile, produce una differenza di potenziale sufficiente per alimentare un motore elettrico collegato con l'elica, oppure possono produrre energia termica in modo diverso dalla combustione, come nel caso degli impianti nucleari nei quali la produzione di calore avviene mediante una reazione fisica e non chimica; il carattere distintivo degli impianti non convenzionali è l'assenza di combustione e la loro non necessità di ricorrere all'aria per far avvenire le reazioni necessarie per la produzione di energia meccanica.



Figura 4 Apparati di propulsione convenzionali/non convenzionali

Causa la assoluta preponderanza degli apparati convenzionali la trattazione si concentrerà prevalentemente su questi, limitandosi ad una descrizione sommaria degli altri: la Marina Militare Italiana utilizza quasi esclusivamente apparati motori e propulsori convenzionali, con le significative eccezioni della propulsione ausiliaria dei cacciamine classe Lerici (propulsori non convenzionali) e dell'apparato motore dei nuovi sommergibili derivati dalla classe tedesca U212A per la navigazione in immersione.

Gli apparati motori convenzionali possono essere suddivisi in tre grandi gruppi:

- **Apparati motori esotermici:** è definito come il tipo d'apparato nel quale il fluido motore non partecipa alla combustione ovvero il fluido motore acquisisce calore dalla combustione senza prenderne parte; il caso più noto è che riguarda la quasi totalità delle applicazioni di questo tipo di sistema è l'apparato a vapore, nel quale l'acqua viene prima riscaldata dalla combustione e successivamente vaporizzata e trasformata in vapore surriscaldato, il quale viene utilizzato in un motore alternativo a vapore od in una turbina; l'energia meccanica così ottenuta può essere impiegata sia per la propulsione che per la generazione elettrica.

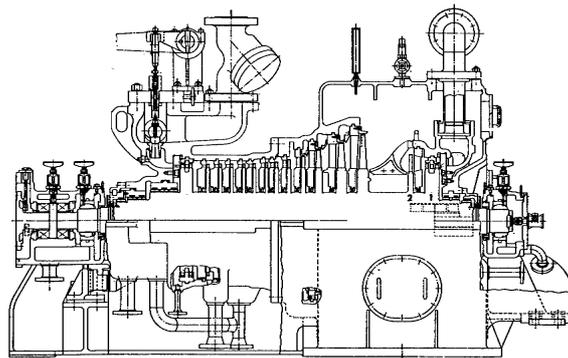


Figura 5 Turbina a vapore

- **Apparati motori endotermici:** è definito come il tipo di apparato nel quale il fluido motore partecipa alla combustione ovvero il fluido motore è costituito dall'insieme dell'aria e dei gas combusti che sono il prodotto della combustione; apparati endotermici sono quindi i motori ad accensione comandata (od a ciclo Otto, a benzina) e quelli ad accensione spontanea (od a ciclo Diesel, a gasolio), a due o a quattro tempi e gli impianti a turbina a gas. In questi casi la combustione accresce l'energia termica della miscela di aria e gas combusti che ha partecipato

alla combustione la quale, agendo all'interno della macchina, permette la conversione di parte di questa stessa energia in energia meccanica.

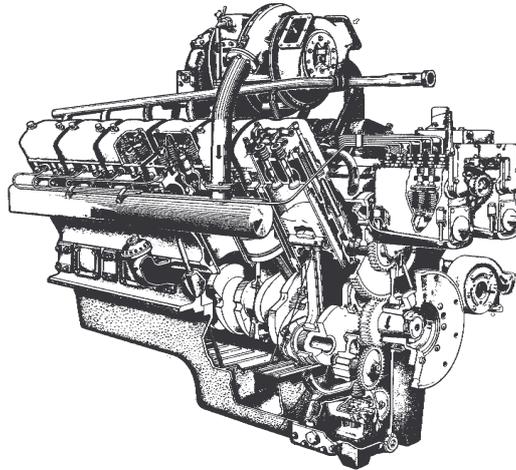


Figura 6 Motore Diesel marino

- **Apparati motori misti:** è definito come il tipo di apparato che combina caratteristiche dei due precedentemente visti; l'apparato motore misto è impiegato abbastanza diffusamente nelle marine mercantili, mentre lo è piuttosto raramente in quelle militari generalmente a causa degli ingombri e dei pesi superiori che richiede allo scopo di avere un rendimento complessivo dell'impianto migliore; un esempio tipico di impianto misto è il caso dell'apparato motore basato su motori diesel e caldaie a recupero: i motori diesel producono l'energia meccanica necessaria alla propulsione e scaricano i gas combusti ad una certa temperatura i quali incontrano, all'interno dei condotti di scarico, delle superfici di scambio che sono dette, appunto, "caldaie a recupero".

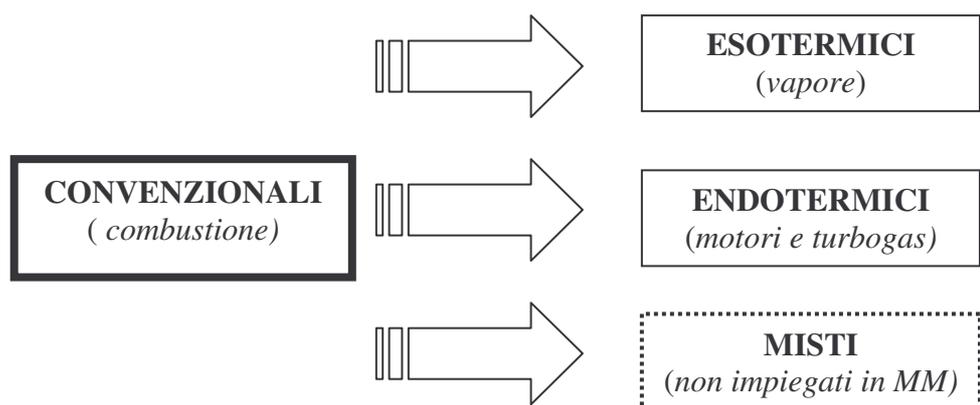


Figura 7 Apparati di propulsione convenzionali

Durante la prima metà del XX secolo il predominio degli apparati a motore esotermici è stato quasi assoluto sia perché erano gli unici a permettere il raggiungimento delle elevate potenze necessarie, sia per la loro capacità di utilizzare virtualmente qualunque tipo di combustibile, soprattutto quelli meno pregiati (i.e. carbone o nafta

pesante), sia, infine, per la loro maggiore affidabilità rispetto ai motori endotermici; nella seconda metà del secolo però, il progredire della tecnologia ha permesso di realizzare motori diesel in grado di produrre *le stesse potenze* degli apparati a vapore inizialmente con volumi e pesi comparabili, successivamente minori, con rendimenti migliori e che permettevano l'utilizzo di combustibili non eccessivamente pregiati.

Nello stesso periodo si è evoluto l'impianto a turbina a gas che ha avuto notevole impulso con il miglioramento sia della tecnologia dei materiali sia con l'impiego dei calcolatori nella progettazione degli elementi meccanici.

Possiamo quindi suddividere la classe degli apparati motori endotermici in quattro distinte sottoclassi:

- **Impianti endotermici a diesel:** sono gli impianti nei quali la propulsione è realizzata tramite uno o più motori diesel accoppiati all'asse; tali motori possono essere a due od a quattro tempi indifferentemente; questo tipo di soluzione, con motore diesel a due tempi è quella più utilizzata nella cantieristica mercantile.
- **Impianti endotermici a gas:** sono gli impianti nei quali la propulsione è realizzata tramite uno o più turbogas accoppiati all'asse dell'elica; questo tipo di soluzione, causa gli elevati consumi, non è utilizzata se non nel mercato di nicchia delle navi traghetto veloci.
- **Impianti endotermici combinati:** combinano motori diesel e turbogas di diverse potenze, permettendo di ottenere degli apparati motori di grande potenza complessiva con rendimento accettabile a diverse andature comprese tra la velocità minima e massima; sono gli impianti di gran lunga più utilizzati nelle marine militari per le loro caratteristiche di ingombri e pesi contenuti anche a potenze molto elevate con consumi accettabili

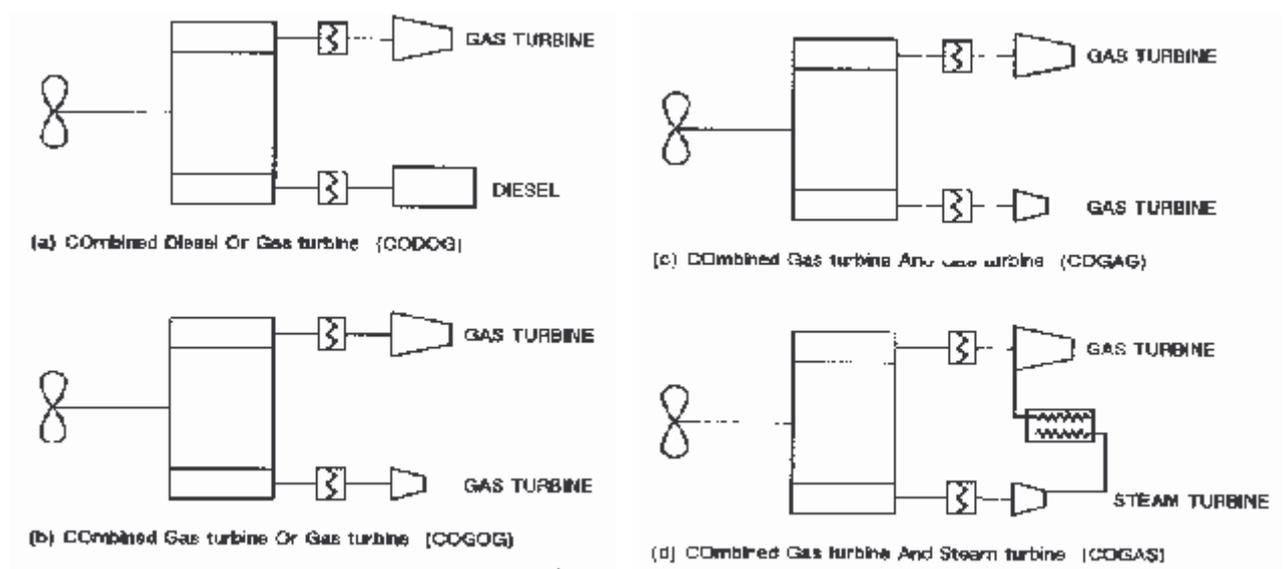


Figura 8 Impianti endotermici combinati

- **Impianti endotermici-elettrici:** combinano un certo numero di motori endotermici (generalmente diesel, ma si iniziano a diffondere anche degli impianti con T.A.G.) che alimentano uno o più motori elettrici; hanno iniziato a diffondersi negli anni '80, quando si è resa disponibile la tecnologia di conversione della frequenza in

forma statica²; i motori elettrici sono delle *macchine sincrone* da cui esiste la nota relazione fra la frequenza della corrente elettrica ed il numero di giri della macchina in modo che variando la frequenza è possibile variare il numero di giri del motore e quindi la velocità. Gli impianti diesel-elettrici hanno avuto una grande fortuna nella cantieristica mercantile soprattutto in quelle realizzazioni ove il carico elettrico è paragonabile alla potenza necessaria per la propulsione, come, ad esempio sulle navi da crociera: questa soluzione permette di utilizzare un numero di diesel-generatori in funzione della potenza istantanea necessaria e quindi di farli lavorare in condizioni di massimo rendimento; oltre che per gli innegabili vantaggi legati al buon rendimento di tali impianti ve ne sono altri, che saranno esaminati nel dettaglio nella sezione dedicata, che ne favoriscono una rapida adozione anche nel campo militare.



Figura 9 Alcuni casi di impianti combinati

Allo stato attuale la cantieristica mercantile è orientata soprattutto verso impianti a motore endotermici costituiti da motori diesel a due tempi o apparati endotermici-elettrici, mentre gli impianti a vapore sono ancora utilizzati soprattutto per le petroliere, nelle quali parte del vapore prodotto viene utilizzato per mantenere fluido il carico; sono anche abbastanza utilizzati gli impianti misti, basati soprattutto sulle caldaie a recupero del calore dei gas di scarico; gli impianti a T.A.G. sono utilizzati quasi esclusivamente dalle navi traghetto veloci e costituiscono quindi un mercato di nicchia.

La cantieristica militare è invece orientata soprattutto sugli impianti combinati basati su motori diesel a quattro tempi e T.A.G.; sostanzialmente abbandonati od in via di dismissione gli impianti esotermici, mentre sono oggetto di studi e sperimentazioni approfondite quelli endotermici-elettrici; gli impianti non convenzionali sono utilizzati soprattutto nella propulsione dei sottomarini, mentre la produzione di navi militari nucleari è limitata solo a poche potenze ed a realizzazioni di grandi dimensioni (come le portaerei).

² La conversione della frequenza è un fenomeno conosciuto anche prima degli anni '80 ma veniva realizzata tramite un sistema di convertitori rotanti che altro non era che una serie di motori elettrici e generatori collegati insieme; la moderna tecnologia elettronica ha permesso di realizzare la conversione con apparecchiature elettroniche, ovvero statiche, con rendimenti altissimi e con grandissima affidabilità; il primo di questi impianti realizzato in Italia ha armato la nave da crociera Crown Princess della compagnia americana P&O, realizzata nel 1992 da Fincantieri nei propri stabilimenti di Monfalcone del Friuli.

2. *ELEMENTI DI SCELTA PROGETTUALE*

La scelta dell'impianto di propulsione per una nave, inteso come scelta sia dell'apparato motore che del propulsore, è un compito estremamente arduo che, a causa dell'impatto che tale scelta generalmente ha sul progetto intero della nave nella sua interezza, deve essere attentamente ponderato poiché un errore di valutazione può comportare la differenza tra prestazioni all'altezza delle aspettative o viceversa deludenti; bisogna ricordare che la correzione di errori progettuali a nave realizzata è un'operazione spesso molto complessa, sempre onerosa dal punto di vista economico e che comunque non offre nessuna garanzia di successo.

Una buona nave nasce sempre da un buon progetto ed un buon progetto nasce sempre da un *requisito operativo* ben definito e che non presenta elementi di ambiguità. Il requisito operativo è la definizione dei compiti che la nave deve assolvere, la definizione della vita presunta, della velocità e della massima autonomia; dalla lettura del requisito operativo può essere impostata una *analisi preliminare* del problema che schematizza alcune caratteristiche di massima del progetto, caratteristiche che esprimono dei concetti generali ma che definiscono la nave nella sua peculiarità.

Nel campo della progettazione navale non esiste la nave migliore in senso assoluto ma esclusivamente *la nave migliore per eseguire un certo compito*: chiaramente tale realizzazione è ottimizzata per l'esecuzione del suo compito progettuale con l'ovvia conseguenza che se l'impiego non è quello per cui la nave è stata costruita le prestazioni potrebbero essere non soddisfacenti.

Una nave per la caccia AS dovrà avere certe caratteristiche, come ad esempio la silenziosità, mentre una nave costruita per la difesa di zona ne avrà delle altre, mentre un pattugliatore privilegerà, ad esempio, l'autonomia a bassa velocità: la lettura del requisito operativo permette di iniziare la schematizzazione del progetto e lo sviluppo delle linee guida del progetto stesso.

Il requisito operativo deve essere il più possibile chiaro e privo di ambiguità non deve contenere, cioè, elementi che possano entrare in contrasto l'uno con l'altro: un esempio tipico è quello della nave dalle dimensioni contenute, molto veloce ed in grado di eseguire un tiro antiaereo ed antimissile molto efficace. Allo scopo di contenere le dimensioni della nave si preferisce scegliere degli apparati motori di dimensioni contenute e quindi dalla potenza non elevata e si disegnano carene molto snelle (ovvero con un rapporto L/B molto grande, ad esempio tra 8 e 10), allo scopo di minimizzare la resistenza al moto; la carena snella tende ad essere molto sensibile all'azione del vento, agli spostamenti di carico, alle manovre evolutive, oltre a divenire particolarmente sensibili a situazioni di combattimento come l'allagamento, ad esempio per falla e tutto ciò interferisce in modo considerevole con l'efficacia del tiro antiaereo ed antimissile che richiede una piattaforma il più possibile stabile ovvero, in linea di massima, con un rapporto L/B non molto elevato (generalmente non superiore a 7); chiaramente i due elementi veloce ma con dimensioni contenute ed efficace nel tiro antiaereo ed antimissile sono in contraddizione e bisognerà operare una scelta per definire rispetto a quale dei due aspetti il progetto dovrà essere ottimizzato o, alternativamente, quali sono le prestazioni minime che la soluzione di compromesso deve soddisfare. L'ottimizzazione del progetto può avvenire solo chiarendo quali sono le caratteristiche fondamentali e quindi irrinunciabili e quali no, oppure, alternativamente, scegliendo una soluzione di compromesso, tacitamente ammettendo che non si progetterà né la nave più veloce né quella più efficace nel tiro antiaereo ed antimissile.

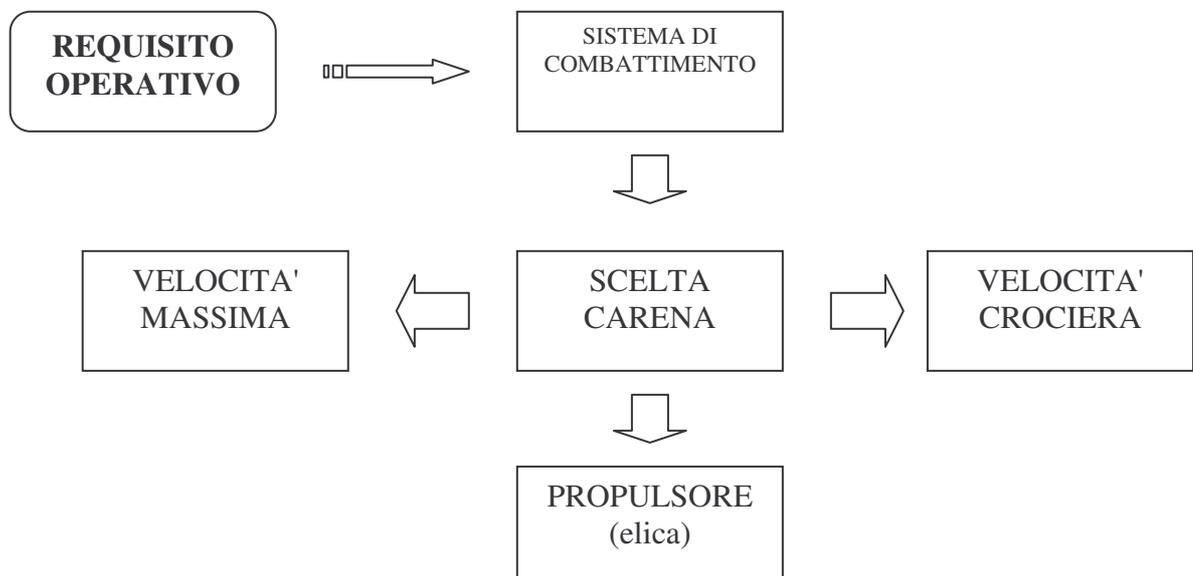
Il requisito operativo può contenere elementi che vanno oltre il delineare i compiti della nave in senso generale, per esempio prevedere l'impiego di un certo sistema di comunicazione, di armamento, di apparato motore o prevedere un impiego limitato di personale, o ancora avere un costo di acquisizione o di gestione contenuto, capacità di effettuare certi compiti non propriamente della forza armata (ad esempio intervento di protezione civile); importante è comprendere come il requisito operativo non è un documento tecnico ma è il documento con il quale il comando della forza armata definisce lo strumento che ritiene necessario per svolgere i propri compiti e dal quale il tecnico inizia a trarre gli elementi base per progettare e realizzare lo strumento che soddisfi il più possibile gli intendimenti del comando.

Il requisito operativo è pura espressione del comando, è scelta dello strumento sulla base della politica strategica della difesa, e sebbene non abbia un approccio tecnico diviene però la radice del progetto stesso: tanto più il requisito operativo è definito chiaramente e non contiene elementi di antinomia, tanto maggiori sono le possibilità che il progetto si riveli adeguato od addirittura ottimale per l'assolvimento del compito. Di contro se il requisito operativo non è chiaro o presenta elementi di ambiguità le probabilità che il progetto si riveli insoddisfacente sono drammaticamente elevate.

L'analisi preliminare produce alcuni elementi di base:

- **scelta del sistema di combattimento:** definito il sistema di combattimento si deducono, di massima, le dimensioni della nave
- **scelta della carena:** la scelta della carena porta alla definizione della curva di resistenza, ovvero dalla potenza propulsiva necessaria alle varie velocità ed ai vari dislocamenti
- **velocità massima:** unita alla curva di resistenza della nave fornisce un primo valore di *spinta* necessaria per raggiungere tale velocità
- **velocità di crociera ed autonomia massima:** tramite la curva di resistenza si ottengono dei valori di *spinta* per la velocità di crociera e si ricava un valore di massima del peso del carburante necessario per tale autonomia
- **tipo propulsore e sue caratteristiche:** la scelta del tipo di propulsore, normalmente l'elica, permette di convertire i valori di *spinta* in valori di *coppia* e quindi di *potenza motrice* necessaria sia per la velocità massima che per quella di crociera; inoltre si viene a conoscere anche il *massimo numero di giri dell'elica*.

Naturalmente l'analisi preliminare è una valutazione che, per quanto di massima, definisce un gran numero di aspetti ma per quanto concerne l'impianto di propulsione gli elementi base per l'analisi sono quelli indicati.



Conoscendo i valori di *coppia* e *potenza motrice* si comparano le caratteristiche delle varie tipologie di apparati in grado di produrre la potenza richiesta: infatti il confronto deve avvenire tra caratteristiche di apparati non nella forma generale ma che producono la potenza richiesta; i vari aspetti che devono essere valutati in forma comparata sono:

- **dimensioni dell'apparato:** rappresenta lo sviluppo spaziale dell'apparato stesso; poiché lo scopo della nave in genere e di quella militare in particolare è di trasportare il sistema di combattimento (ovvero il carico pagante) e non l'apparato motore, appare chiaro che le dimensioni devono essere quanto più contenute possibile; inoltre per lo studio della stabilità trasversale della nave è molto importante non solo sapere il peso dell'impianto ma anche la disposizione (soprattutto verticale) del peso stesso; spesso, per rendere più immediato il confronto, si suole ricorrere al *volume specifico per unità di potenza*, ovvero al rapporto fra la dimensione dell'impianto e la potenza espressa in CV o kW: questo valore è indicativo del volume necessario per unità di potenza e permette semplici confronti.

Appare evidente che l'apparato migliore rispetto a questo aspetto è quello più leggero ovvero con *il minore volume specifico*.

- **peso dell'apparato:** il peso dell'apparato motore è fondamentale per la semplice considerazione che maggiore è il peso di questo e minore sarà il carico pagante che la nave potrà trasportare a parità di dislocamento; anche per il peso si suole ricorrere al concetto di *peso specifico per unità di potenza*, ovvero il rapporto fra il peso dell'impianto e la potenza espressa in CV o kW: tale valore è indicativo del peso necessario per unità di potenza.

Appare evidente che l'apparato migliore rispetto a tale aspetto è quello più leggero ovvero con *il minore peso specifico*.

- **prontezza della risposta:** la prontezza della risposta rappresenta la capacità di esprimere grandi potenze in poco tempo: ad esempio il turbogas è in grado di esprimere in pochi istanti grandi potenze consentendo una grande manovrabilità e versatilità di impiego.

Appare chiaro che l'impianto migliore è quello più brillante.

- **tempo di approntamento:** rappresenta il tempo necessario per passare dall'apparato spento alla condizione di "*macchine provate e pronte*" ovvero in grado di erogare potenza; maggiore è il tempo di approntamento, più lungo il periodo che deve passare affinché la nave sia effettivamente impiegabile.

Appare evidente che l'apparato migliore è quello con il minor tempo di approntamento.

- **costo di acquisizione dell'impianto:** ovvero l'impatto economico iniziale dell'impianto; questo valore deve tener conto dei costi di ricerca e sviluppo, del costo di acquisto dei vari componenti; tale valore può essere estremamente critico nel senso che un elevato costo di acquisizione può pregiudicare l'utilizzo di impianti che hanno tutti i rimanenti indicatori molto favorevoli: ad esempio esistono degli impianti estremamente leggeri e di dimensioni estremamente ridotti ma dai costi iniziali proibitivi, motivo per cui non vengono utilizzati.

- **costo di utilizzo / consumo specifico / tipo di combustibile:** il consumo dell'apparato motore rappresenta un parametro estremamente importante perché costituisce la spesa che è necessario affrontare per l'utilizzo; per definire tale valore è importante sia definire il tipo di combustibile (l'utilizzo di combustibile più raffinato permette l'utilizzo di apparati più performanti ma fatalmente comporta costi più elevati a parità di quantità utilizzata) sia il *consumo specifico* ovvero la

quantità di combustibile necessaria per unità di potenza; il consumo specifico non è un valore costante ma funzione della potenza espressa.

Appare evidente che il miglior apparato è quello con un consumo specifico limitato ed il più possibile costante al variare della potenza e che, possibilmente, utilizza un combustibile poco raffinato.

- **costo di gestione / quantità e qualità del personale:** la quantità e la qualità del personale necessaria alla conduzione ed alla manutenzione dell'apparato motore è parametro importante perché definisce il costo di gestione dell'apparato stesso; questo parametro ha forti implicazioni sia sul progetto generale (il personale deve essere alloggiato e quindi ad una quantità maggiore devono corrispondere spazi abitativi più vasti) sia sul costo di acquisizione, poiché un apparato che richiede poco personale sarà dotato di una automazione più spinta il che comporterà un costo iniziale maggiore.

Appare evidente che il miglior apparato è quello che richiede poco personale e con professionalità non particolarmente spinte e quindi costose.

- **costo di manutenzione / vita totale:** si definisce *vita totale* dell'impianto il numero massimo di ore di funzionamento che l'impianto può effettuare prima di subire una radicale manutenzione; alcuni impianti hanno una vita teoricamente infinita, come gli apparati a vapore, altri, come i turbogas, ne hanno una ben definita; il costo di manutenzione rappresenta il costo totale degli interventi necessari nella vita totale dell'apparato inteso sia come costi di materiali che di intervento.

Appare evidente che l'apparato migliore è quello che ha la vita totale maggiore ma, contestualmente il minor costo di manutenzione; alle volte questo viene diviso per la vita totale ottenendo il *costo manutentivo medio annuale* parametro utile per un confronto comparato.

- **affidabilità:** l'affidabilità rappresenta la capacità dell'apparato di funzionare per lunghi periodi senza avarie e chiaramente è parametro fondamentale per un apparato militare; vi sono molti approcci al problema dell'affidabilità ma, senza entrare nel merito, si può dire che più l'apparato è "*spinto*" ovvero con indicatori come il volume specifico ed il peso specifico molto favorevoli, meno è affidabile. Normalmente l'impianto è tanto più affidabile quanto meno è prototipico ovvero quanto più è stato utilizzato e quindi conosciuto: l'impianto a vapore è più affidabile di un qualunque diesel mentre il turbogas LM2500, l'unico utilizzato dalla Marina, ha accumulato nella versione aeronautica talmente tante ore di funzionamento da avere una affidabilità pressoché assoluta.

- **vulnerabilità / funzionamento degradato:** la vulnerabilità esprime la probabilità che un evento bellico od una situazione contingente (come un incendio od una falla) possa provocare la non impiegabilità dell'apparato. Il funzionamento in assetto degradato rappresenta la capacità dell'apparato di funzionare, anche a potenza ridotta, privo di alcune sue componenti. Esistono, come per l'affidabilità, diversi sistemi per confrontare i vari apparati ma senza entrare nel merito si può dire che più voluminoso l'apparato più è vulnerabile e più è ridondante (ovvero più componenti svolgono o possono svolgere la stessa funzione) e più è in grado di funzionare in condizioni degradate.

Rispetto a tale requisito il migliore apparato è quello meno vulnerabile ed in grado di funzionare in vari assetti diversi

- **impatto operativo:** per impatto operativo si intende l'analisi di alcuni parametri che non sono strettamente correlati all'apparato ma che possono avere grande significato dal punto di vista operativo, come *il rumore irradiato in aria ed acqua, la segnatura magnetica, la segnatura radar e quella IR*. I provvedimenti

progettuali che vengono presi per ridurre tali aspetti, come l'utilizzo di masse sismiche per diminuire il rumore dei motori, di acciai amagnetici per ridurre la segnatura, scambiatori e diffusori per ridurre quella IR, generalmente comportano un aumento di volume, di peso e di costo degli apparati a parità di prestazioni.

L'analisi dei parametri delineati conduce alla scelta dell'apparato motore: è evidente che nessun tipo di apparato motore sarà assolutamente migliore di tutti gli altri in tutti gli aspetti e che la scelta sarà quindi una scelta di compromesso, orientandosi verso la tipologia con il maggior numero di indicatori favorevoli rispetto al requisito operativo che, quindi, si dimostra essere la radice del progetto.

La valutazione dei parametri o *indicatori* fino ad ora delineati è non solo elemento di analisi ma anche linea guida di sviluppo per i futuri apparati motori, ben sapendo che non esiste l'apparato migliore in senso assoluto ma solo quello migliore per lo scopo che si desidera raggiungere.

3. CICLI TERMODINAMICI DEGLI APPARATI MOTORI CONVENZIONALI

Nella classificazione degli apparati motori sono state definite le due classi degli apparati convenzionali e non convenzionali, definendo per convenzionali tutti quei sistemi che utilizzano per la generazione del calore la combustione tra un combustibile ed un comburente e considerando i rimanenti altri come non convenzionali; si è anche detto che l'aggettivo convenzionale indica semplicemente che la larghissima maggioranza degli apparati motori è di questo tipo, mentre quelli non convenzionali sono relegati, per diversi motivi, ad applicazioni particolari.

Si è visto come la conversione dell'energia termica generata dalla combustione in lavoro meccanico sia sostanzialmente affidata ad una sostanza, in forma liquida od aeriforme, la quale, attraverso una successione di trasformazioni termodinamiche ben definite compie un ciclo, cioè dopo un certo intervallo di tempo ritorna nelle stesse condizioni iniziali: il ciclo è il sistema con cui viene convertita l'energia termica in energia meccanica, ovvero il calore in lavoro; il fluido è detto *termovettore* ed il ciclo *ciclo termodinamico*.

La trasformazione del calore in lavoro non è e non può essere totale: il rapporto tra il calore fornito ed il lavoro prodotto è detto rendimento termodinamico ed è sempre minore di uno¹: ciò implica che una certa parte dell'energia fornita dalla combustione, non convertita in lavoro, rimanga nel fluido e perché il fluido compia un ciclo deve essere asportata. Infatti il termovettore deve, al termine delle trasformazioni, essere nelle stesse condizioni iniziali e quindi con la stessa energia e perché ciò avvenga quella parte di energia termica che non è diventata lavoro meccanico è che è rimasta "intrappolata" nel fluido deve essere eliminata.

Possiamo quindi puntualizzare alcuni aspetti:

- non tutta l'energia della combustione diverrà lavoro; poiché il carburante rappresenta un costo il ciclo migliore sarà quello che a parità di carburante produrrà più lavoro
- il lavoro è rappresentato dalla differenza tra l'energia sviluppata dalla combustione (che chiameremo Q_1) e quella ceduta per chiudere il ciclo (che chiameremo Q_2), ovvero:

$$L = Q_1 - Q_2$$

anche se Q_2 è necessaria, ovvero non può essere eguale a zero, non di meno deve essere la più piccola possibile affinché L sia il maggiore possibile

- il *rendimento termodinamico* è il rapporto tra il lavoro prodotto L ed il calore sviluppato Q_1 nella combustione, ovvero:

$$\eta_{th} = L/Q_1 \quad (a)$$

od anche: $L = \eta_{th}Q_1 \quad (b) \quad Q_1 = L/\eta_{th} \quad (c)$

dalla formula (b) ci si rende conto che a parità di calore sviluppato Q_1 il ciclo con maggiore η_{th} produrrà un lavoro maggiore ed allo stesso modo, dalla formula (c), a parità di lavoro sviluppato L il ciclo con η_{th} maggiore avrà necessità di un minore Q_1 e quindi di combustibile; in pratica il rendimento termodinamico indica il

¹ Questo è uno dei modi con cui può essere enunciato il 2° principio della termodinamica; tale principio non sarà dimostrato ma comunque è basilare per comprendere come l'energia non abbia una sola forma ma varie, tanto più pregiate quanto più possono convertirsi integralmente in altre forme.

consumo dell'apparato: maggiore è il rendimento a parità di potenza e minore è il consumo.

Qualunque apparato motore necessiterà, come si è detto, di due *sorgenti* ovvero di due elementi o dispositivi in uno dei quali viene fornito di una certa quantità di energia sotto forma di calore e nell'altro ne viene rimossa una parte: in mancanza di una di queste due sorgenti il ciclo non avviene e la macchina non può funzionare.

Il ciclo può essere *chiuso* o *aperto*: nel ciclo *chiuso* (come negli impianti a vapore) il termovettore compie fisicamente tutto il ciclo fino a tornare nelle condizioni iniziali e la sorgente fredda è rappresentata da uno scambiatore o comunque da un elemento fisico nel quale il calore è asportato (il condensatore), nel ciclo *aperto* il fluido non compie fisicamente tutto il ciclo (come nei motori diesel), ma viene scaricato all'atmosfera (come gas di scarico, ad esempio) ed in questo caso il calore ceduto è rappresentato dalla differenza tra la temperatura di aspirazione e quella di scarico.

Naturalmente lo scopo dell'apparato è quello di convertire quanto più possibile calore in lavoro meccanico ovvero deve avere il rendimento maggiore possibile: il rendimento termodinamico di un ciclo è stato storicamente il dato che ha spinto a focalizzare la ricerca su alcuni cicli particolari: la prima domanda che è stata posta è da quali parametri dipenda il rendimento del ciclo e se esista o meno un ciclo "migliore" degli altri, ovvero di rendimento più elevato.

Il ciclo termodinamico che è stato sviluppato inizialmente è quello applicato negli impianti esotermici, ovvero il ciclo degli apparati motori a vapore, conosciuto anche come *Ciclo Rankine* o *Ciclo Hirn*: come precedentemente detto in questo tipo di apparato il combustibile viene bruciato per produrre energia termica ed il calore così generato viene immesso nel fluido; questo ciclo si è sviluppato non solo perché basato su una tecnologia dei materiali già disponibile al momento della teorizzazione ma anche perché si può dimostrare che questo ciclo è quello con il miglior rendimento in assoluto.²

Bisogna però notare che la combustione ed il termovettore sono non correlazionati ovvero il fluido non interviene nella combustione, che si svolge in modo assolutamente indipendente (cioè la combustione può avvenire anche in assenza del fluido): proprio questa indipendenza fra attività di combustione e fluido è all'origine della definizione di impianti esotermici: l'energia termica viene originata fuori dal fluido ed indipendentemente dal fluido.

Questi tipi di impianto utilizzano come fluido l'acqua, che inizia il ciclo in forma liquida, viene vaporizzata grazie al calore ottenuto dalla combustione, fornisce lavoro meccanico e viene condensata grazie alla sorgente fredda, riconvertendosi quindi in acqua e reiniziando il ciclo, e rappresentano il classico ciclo chiuso.

Il limite maggiore degli apparati esotermici risiede proprio nel fatto che la combustione avviene al di fuori del termovettore ed è quindi necessario che il calore venga "*forzato*" nel fluido stesso, e quindi passi dai *gas combusti* all'acqua: negli apparati esotermici la combustione avviene all'interno di un luogo apposito, detto *camera di combustione*, ed è necessario che il calore generato venga fornito all'acqua: sostanzialmente vi deve essere una interfaccia tra la camera di combustione e l'acqua ed attraverso questa interfaccia il calore verrà introdotto nel fluido: tale interfaccia è detta *superficie di scambio*.

Viene definito *rendimento di trasmissione* ed indicato con η_c il rapporto tra il calore trasmesso all'acqua che è già stato indicato con Q_1 e quello generato nella combustione Q_c ; tale valore è tanto maggiore quanto più è grande la superficie di scambio.

² Nonostante si possa ritenere che gli impianti a vapore siano retaggio di una epoca passata vale la pena notare che la quasi totalità dell'energia elettrica viene ottenuta tramite impianti a vapore e come questa tipologia sia usata anche con sistemi non convenzionali come, ad esempio, gli impianti nucleari.

Se quindi si può scrivere:

$$\eta_c = Q_1/Q_c \quad (d) \quad \text{e quindi} \quad Q_1 = \eta_c Q_c \quad (e)$$

eseguendo le opportune sostituzioni nella (b) si ottiene:

$$L = \eta_{th} Q_1 = \eta_{th} \eta_c Q_c \quad (f)$$

Questo ci porta a dire che non solo è importante il rendimento termodinamico η_{th} del ciclo ma anche il rendimento di trasmissione η_c , che è tanto maggiore quanto più grande è la superficie di scambio.

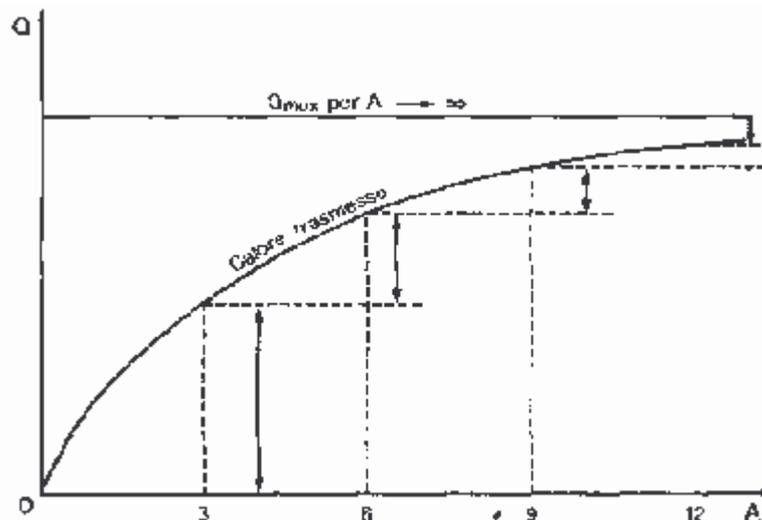


Figura 1 Dipendenza del calore trasmesso dalla superficie di scambio

La figura 1 è indicativa e dimostra come l'impianto a vapore, per mantenere un buon rendimento richiede una grande superficie di scambio, ovvero caldaie di grandi dimensioni e pesanti: questo non vuol dire che non sarebbe possibile costruire impianti a vapore compatti, leggeri e di grande potenza, ma che la penalizzazione sul rendimento sarebbe tale da renderli di nessun interesse; di contro il ciclo a vapore può essere sì estremamente vantaggioso ma a prezzo di caldaie di grandi dimensioni il che implica notevoli volumi d'ingombro ed altrettanto notevoli pesi.

A causa di questa situazione il rendimento complessivo dell'impianto a vapore sarà inferiore a quello teorico e tutto dipenderà dalle dimensioni della superficie di scambio, ovvero della caldaia.

Il problema dello scambio termico ha comportato l'evoluzione di un'altra tipologia di apparati motore, quelli endotermici, i quali partono dal presupposto che qualora la combustione possa svolgersi all'interno del fluido motore allora questo acquisirebbe l'intero calore generato dalla combustione senza bisogno di una superficie di scambio termico: η_c diviene quindi eguale ad 1.

Negli apparati motori endotermici viene utilizzato come fluido motore l'aria, che è anche il comburente per eccellenza, e quindi la combustione avviene iniettando ed accendendo il combustibile all'interno del comburente in modo che produca lavoro. Tipico esempio di questa tipologia di impianto sono i motori, sia a ciclo otto che a ciclo diesel che le turbine a gas: in questo tipo di motori l'aria viene aspirata dall'ambiente, viene compressa ed al

termine della compressione viene iniettato il combustibile, si genera il calore che obbliga l'aria ad espandersi e quindi produce un certo lavoro. Al termine i gas di scarico vengono reimmessi nell'atmosfera, con una certa carica termica che è stata già chiamata Q_2 : infatti la sorgente calda è rappresentata dalla combustione che avviene nel fluido, quella fredda dal calore dei gas di scarico che si perde nell'atmosfera e, come per il caso precedente la differenza di questi due calori indica il lavoro ottenibile dal ciclo; tale ciclo è il classico *ciclo aperto*.

I cicli termodinamici dei motori a ciclo otto, diesel e delle turbine a gas sono teoricamente meno vantaggiosi, per cui il rendimento teorico corrispondente è più piccolo ma, poiché la combustione avviene all'interno del termovettore, tutto il calore generato viene automaticamente trasmesso al fluido, e quindi accade che il rendimento complessivo del sistema possa essere superiore a quello del ciclo esotermico, soprattutto quando le superfici di scambio sono limitate.

In sintesi gli impianti endotermici hanno i seguenti vantaggi:

- volumi più contenuti, non essendo necessari superfici di scambio con la sorgente calda e quella fredda e quindi ingombri e pesi minori
- a parità di potenza erogata e con volumi e pesi contenuti rendimenti migliori e quindi consumi meno elevati

Appare chiaro che per quanto discusso nel precedente capitolo, nel momento in cui la tecnologia degli apparati endotermici ha prodotto impianti di pari potenza rispetto a quelli esotermici e di pari affidabilità, grazie alle dimensioni ed ai pesi contenuti ha rapidamente emarginato questi ultimi.

4. COPPIA E POTENZA

Supponiamo di avere un propulsore convenzionale, ovvero un'elica: la rotazione dell'elica produce l'accelerazione del fluido e quindi, per il terzo principio della dinamica, una forza che spinge l'elica stessa in direzione opposta: poiché l'elica è vincolata solidamente allo scafo tramite il cuscinetto reggispinta, questa comporta il movimento della nave, e quindi la trasformazione del lavoro meccanico in energia cinetica.

Dal corso di Architettura Navale è noto come l'elica sia composta da *pale* (generalmente tre, quattro o cinque) ed ognuna di queste sia ottenuta tramite la composizione di *profili alari*; il flusso dell'acqua, investendo il profilo, produce un campo di pressioni e depressioni che ha come risultato quello di produrre una forza che agisce sul profilo e che viene scomposta in due componenti, la *portanza* (P) e la *resistenza* (R).

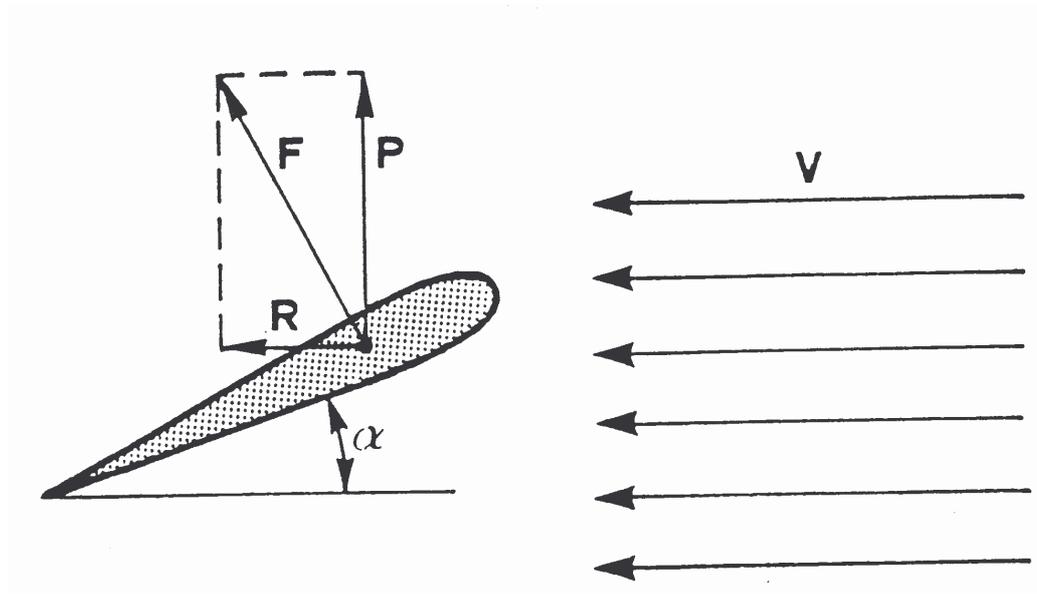


Figura 1 Profilo alare investito da flusso di velocità V

Dalla figura (1) si può notare come la forza F sia sostanzialmente perpendicolare al profilo: sia quindi effettuata la scomposizione in senso assiale e trasversale *rispetto al flusso* ottenendo appunto la portanza P e la resistenza R ; *l'angolo di attacco* α influenza non solo la scomposizione ma anche il modulo di F che non è quindi costante ma funzione di α .

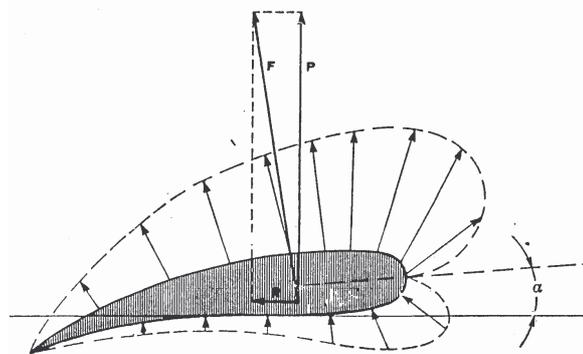


Figura 2 Genesi della forza F

La figura (2) evidenzia i campi di pressioni relative (intesi quindi sia nel senso di depressione che di sovrappressioni) che sono all'origine della forza F .

Se il fluido fosse ideale, ovvero privo di attrito, la forza F sarebbe esattamente perpendicolare alla corda del profilo; ciò comporterebbe che l'angolo tra la forza F e la perpendicolare sarebbe esattamente α ; in realtà, poiché il fluido ha un certo attrito, l'angolo è normalmente superiore rispetto

ad α e ciò implica che la resistenza reale sia leggermente superiore a quella calcolata mentre, viceversa, la portanza reale sia leggermente inferiore.

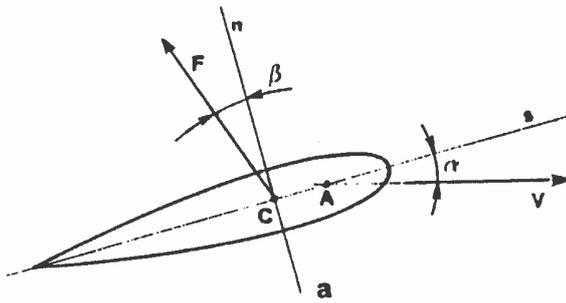


Figura 3 Effetto dell'attrito (angolo β)

Nella figura (3) si vede l'effetto dell'attrito che può essere visto come un ulteriore angolo β del quale α deve essere aumentato

Possiamo quindi immaginare come la somma di ogni singola portanza P relativa ad ogni profilo elementare di cui è composta la pala possa essere sommato producendo la *portanza totale della pala*; poiché ogni pala produce la propria portanza totale, la loro somma è la *spinta assiale* che si ha sull'elica.

Allo stesso modo la somma di ogni singola resistenza R , relativa al singolo profilo elementare, può essere sommata, producendo una *resistenza totale della pala*: tale forza si opporrà chiaramente alla rotazione dell'elica, e moltiplicata per la distanza dall'asse di rotazione produce la *coppia resistente della singola pala*. La somma delle coppie resistenti delle singole pale è la *coppia resistente* che si ha sull'elica.

La *spinta assiale* (T) è l'effetto utile che si desidera ottenere dall'elica mentre la *coppia resistente* (C_R) è il *momento* che si deve impiegare per produrre l'effetto desiderato: se si desidera ottenere una spinta costante si dovrà fornire una *coppia motrice* costante pari alla coppia resistente richiesta per generare tale spinta.

Si comprende come vi sia una forte relazione che lega la *spinta assiale* T , la *coppia resistente* C_R con il *numero di giri* n , come evidenziato dalle figure (4a) e (4b): il caso riportato nella figura (4a) è relativo ad un'elica a passo fisso, mentre quello della figura (4b) è di un'elica a passo variabile.

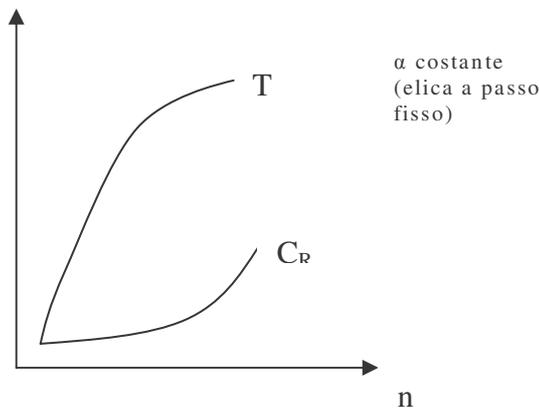


Figura 4a Elica a passo fisso

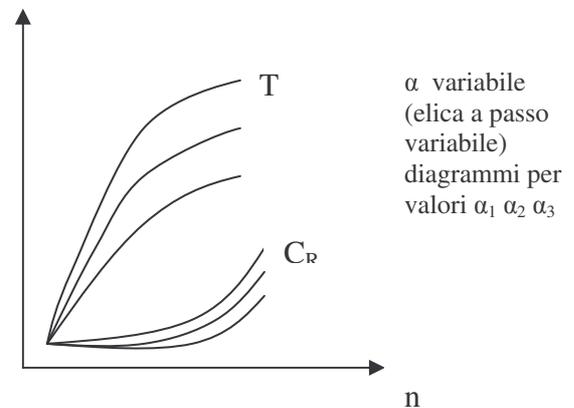


Figura 4b Elica a passo variabile

Infatti l'energia viene fornita all'elica dall'apparato motore nella forma di rotazione dell'asse: poiché l'elica agisce sul flusso dell'acqua accelerandolo, chiaramente il flusso dell'acqua agirà sull'elica frenandola, ovvero diminuendo la sua velocità di rotazione; ciò si realizza attraverso la formazione del campo di pressioni precedentemente illustrato.

Affinché la velocità di rotazione si mantenga costante la coppia motrice applicata all'asse dall'apparato motore dovrà essere eguale alla coppia resistente applicata dall'acqua.

Infatti se la coppia motrice è superiore a quella resistente l'elica aumenterà la propria velocità di rotazione mentre se quella resistente è superiore alla coppia motrice l'elica rallenterà.

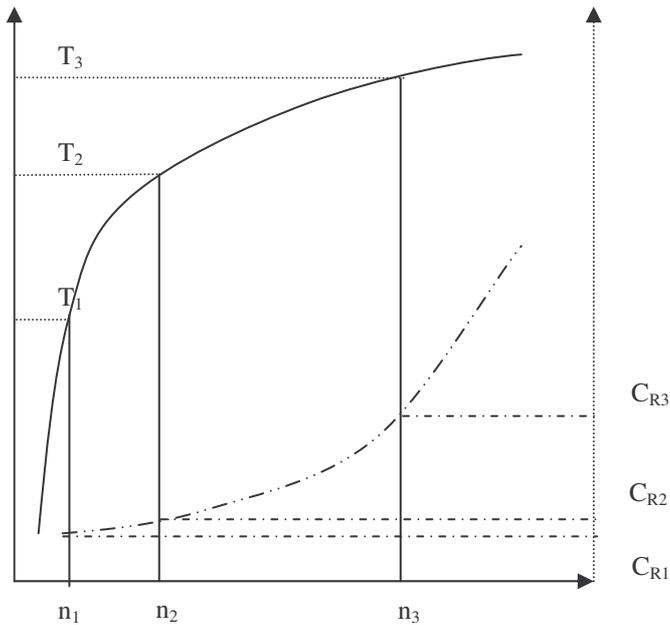


Figura 5: **Punti di funzionamento di curve caratteristiche dell'elica**

Dalla figura (5) si nota come a diverse velocità di rotazione corrispondono spinte diverse (e quindi diverse velocità della nave) ma anche coppie resistenti diverse, ovvero coppie che l'apparato motore deve produrre per spingere la nave ad una certa velocità.

Si nota come n_1 , n_2 ed n_3 corrispondano valori T_1 , T_2 e T_3 diversi ma anche C_{R1} , C_{R2} e C_{R3} : appare chiaro che per portare la nave alla velocità corrispondente alla spinta T_3 l'apparato motore deve sviluppare una coppia motrice almeno pari a C_{R3} , in caso contrario tale velocità non

potrà essere raggiunta.

La coppia resistente generata dall'elica non è quindi costante al variare del numero di giri: poiché la velocità della nave è tanto più elevata quanto maggiore è la velocità di rotazione dell'elica si comprende come l'azione di quest'ultima sull'acqua sia tanto più forte quanto maggiore è la sua velocità di rotazione; analogamente anche l'azione frenante dell'acqua sull'elica è tanto maggiore quanto più è elevata la velocità di rotazione di quest'ultima.

Normalmente si utilizzano i diagrammi doppi come quello riportato in figura (6) che permettono di correlare la coppia resistente ed il numero di giri con la velocità della nave:

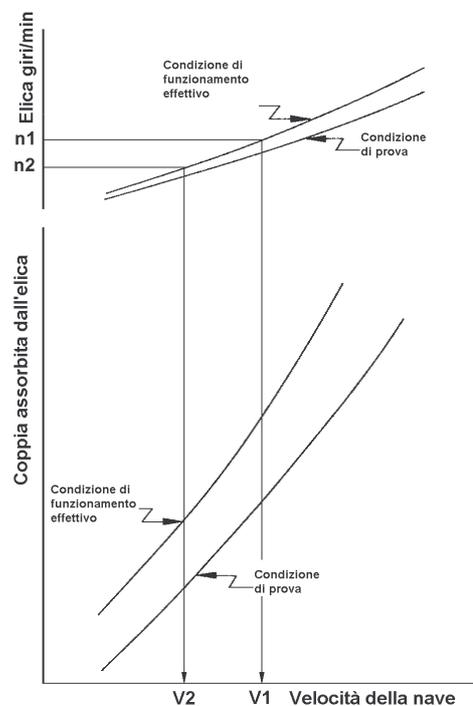


Figura 6: **Diagramma doppio coppia assorbita e numero di giri in funzione della velocità nave**

chiaramente il diagramma doppio è il frutto della composizione dei *diagrammi caratteristici dell'elica* (come ad esempio quelli delle figure (4a), (4b) e (5), anche se normalmente in altre forme) e delle curve di *resistenza della carena*.¹

La relazione che lega la coppia resistente dell'elica alla sua velocità di rotazione (od al numero di giri) ha generalmente la forma $C_R = f(n^2)$ ovvero la coppia resistente tenderà ad aumentare secondo il quadrato della velocità: chiaramente la massima velocità di rotazione che l'elica potrà avere sarà quella individuata dall'intersezione tra la curva della massima coppia motrice producibile dall'apparato motore e la curva della coppia resistente. Da notare che si è parlato dell'intersezione fra la curva resistente e quella relativa alla *massima coppia motrice*: il motore, a parità di numero di giri, potrà produrre delle coppie minori rispetto a quella massima situazione che normalmente viene ottenuta variando la quantità di carburante utilizzato: in questo modo si varierà la velocità della nave². Non si potrà, però, produrre una coppia superiore a quella massima, da cui è quest'ultima che, tramite la sua propria curva, determinerà alla fin fine le prestazioni massime raggiungibili dalla nave.

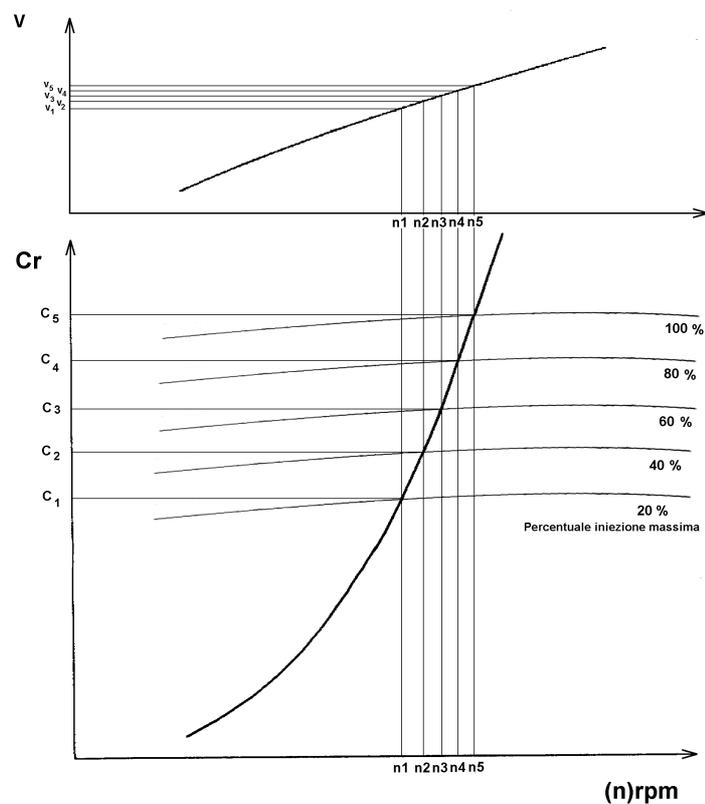


Figura 7: Curve di coppia a % della coppia massima

Nella figura precedente sono stati riportate delle curve di coppia che un motore può produrre (nel caso specifico sono curve di coppia di un motore diesel); queste curve sono determinate dalla quantità di combustibile utilizzato rispetto alla quantità massima: la curva di coppia massima rappresenta la quantità massima di carburante che l'apparato motore può utilizzare; le velocità possibili sono le intersezioni tra queste curve e quelle di

¹ Le curve di resistenza sono tipiche di ogni carena e sono funzione del dislocamento. Non si tratterà di tali curve in questa sede essendo oggetto del corso di Architettura Navale

² Situazione che si ha sulla vettura: il comando dell'acceleratore agisce sulla quantità di carburante inviato nei cilindri, che è una frazione compresa tra un minimo (motore al minimo) ed un massimo (iniezione massima, valvola tutta aperta con i vecchi motori carburati, in ogni caso, come si suole dire "a tavoletta")

coppia resistente; per inciso si osservi che la curva di coppia resistente della figura (7) è relativa ad una elica a passo fisso: se si trattasse di una elica a passo variabile avremmo una famiglia di curve con parametro *a angolo di passo*.

Bisogna osservare come le condizioni di velocità massima possano variare a causa della variazione di parametri sistematici od occasionali:

- la variazione delle condizioni di carico, dell'assetto sia trasversale che longitudinale comportano una variazione della curva di resistenza della carena; aumentando il dislocamento aumenta, a pari velocità, la spinta necessaria: infatti le curve di resistenza sono tabulate in forma parametrica ed il parametro è il dislocamento; discorso più complesso è quello dell'assetto: possiamo dire che ogni nave ha un suo assetto standard ed ogni scostamento da questo implica un aumento della resistenza
- la variazione dello stato della carena: carene incrostate di vegetazione comportano un aumento della resistenza dovuto a vari fattori, tra cui l'aumento dell'attrito
- variazioni dello stato dell'elica: l'elica tende a perdere le proprie caratteristiche a causa della vegetazione ed in misura ancora maggiore nel caso di deformazioni delle pale a causa di urti; una elica tetra pala che perda una pala subisce una riduzione del 25% della coppia resistente assorbita ma anche una analogo riduzione della spinta: assorbe di meno ma produce di meno³
- condizioni meteomarine: chiaramente condizioni di mare agitato e di vento forte rappresentano un forte aumento della resistenza, sebbene il calcolo di tali azioni sia estremamente complesso
- condizioni particolari operative, come ad esempio il rimorchio di un'altra unità, il traino di una cortina sonar etc.

Tutte queste situazioni comportano una variazione della curva di resistenza della nave ed, analogamente, comporteranno una variazione considerevole della curva caratteristica dell'elica: sebbene la relazione rimanga $C_R = f(n^2)$, chiaramente le curve saranno diverse.

Supponiamo, come nell'esempio riportato nella figura sottostante, che una data nave abbia in due condizioni di funzionamento diverse, due curve di coppia resistente come quelle indicate C_{1R} e C_{2R} : si vede come, sebbene la forma delle due curve sia identica (cioè una parabola), il valore della C_{1R} sia sempre minore della C_{2R} e che il punto di intersezione tra le due curve e quella di coppia motrice (unica, trattandosi sempre dello stesso apparato motore) abbia valore di ascissa diverso e precisamente $n_2 < n_1$ ovvero nel secondo caso la velocità di rotazione massima raggiungibile sarà inferiore a quella del primo caso e, di conseguenza, anche la velocità massima sarà inferiore.

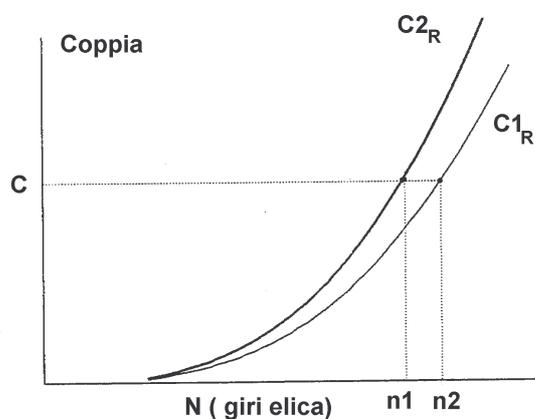


Figura 8: Curve di coppia diverse

³ Valori puramente indicativi.

Si definisce *potenza resistente* P_R il prodotto:

$$P_R = C_R \cdot n \cdot k \quad k = 376,8.$$

dove C_R è la coppia resistente (espressa in $N \cdot m$), n il numero di giri (espresso in giri al minuti) al quale si ha la C_R e k un numero dipendente dalle unità di misura adottate. Bisogna sostanzialmente notare che la potenza resistente P_R è funzione quindi sia di n che di C_R e poiché si è detto che $C_R=f(n^2)$ allora $P_R=f(n^3)$ ovvero la coppia resistente è una parabola, la potenza resistente è una cubica.

Il concetto di potenza è più usato, nel linguaggio corrente, rispetto alla coppia, però è bene notare che per certi versi è meno significativo: la potenza si ottiene dal prodotto della coppia per il numero di giri e quindi è una misura meno diretta.

Si osservi che:

- per raddoppiare la velocità bisognerà poter disporre approssimativamente di una coppia 4 volte più grande
- per raddoppiare la velocità sarà necessario sviluppare approssimativamente una potenza 8 volte maggiore

Infatti se $V_2 = 2 \cdot V_1$, a V_1 corrisponde n_1 ed a $V_2 \rightarrow n_2$ ed approssimativamente quindi $n_2 = 2 \cdot n_1$ allora $C_{R2} = C_{R1} \cdot (2)^2$ ovvero $C_{R2} = 4 \cdot C_{R1}$ e $P_{R2} = P_{R1} \cdot (2)^3$ ovvero $P_{R2} = 8 \cdot P_{R1}$.

Se si considera la figura (9) le curve di coppia resistente e potenza resistente sono rispettivamente quella indicata con il numero (7) e (1).

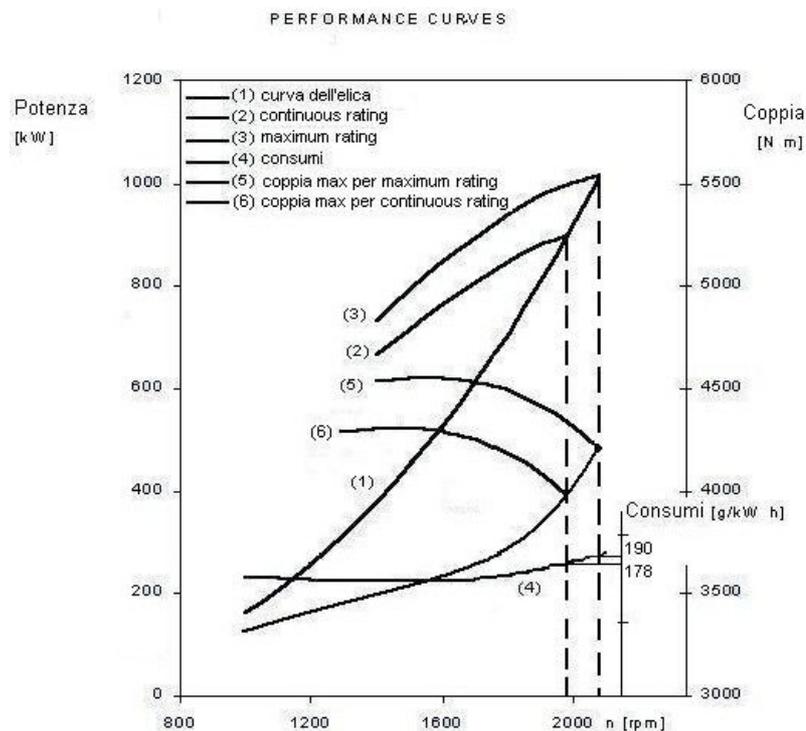


Figura 9: Curve di prestazione

Le curve di *coppia motrice* C_M ovvero della coppia che il motore sviluppa o può sviluppare hanno una relazione con il numero di giri più complessa ed una forma che generalmente è tipica di un determinato tipo di motore: nella figura (7) sono riportate le curve di coppia di un diesel e così nella figura (9), ove sono indicate con i numeri (5) e (6).

Analogamente le curve di *potenza motrice* P_R dipendono sostanzialmente dalle forme delle curve di coppia ma sono più ripide: nella figura (9) sono rappresentate numerate (2) e (3). Se si osservano le curve di prestazione si noterà come la massima velocità di rotazione ammissibile è identica sia si consideri l'intersezione tra la curva di potenza resistente (1) e quella di massima potenza motrice continuativa (2), sia che si consideri quella tra la curva di coppia resistente (7) e quella di massima coppia continuativa (6).

Nella motorizzazione navale non si usano generalmente le curve di coppia motrice o resistente bensì quelle di potenza motrice o resistente; si noti che data la relazione fra C_R e P_R è sufficiente conoscere solo uno di questi due valori, potendosi ricavare l'altro direttamente; questa coppia di valori rappresenta la caratteristica del lavoro meccanico che l'apparato motore deve produrre per raggiungere tale velocità.

Dall'analisi delle curve di prestazione (figura (9)) si nota come vi siano due curve di potenza motrice e due di coppia motrice: le curve (2) e (6) rappresentano la massima potenza e coppia che il motore può erogare in modo continuativo, ovvero il carico massimo che il motore può sopportare; le curve (3) e (5) rappresentano la massima potenza e coppia di sovraccarico, ovvero il carico massimo che il motore può sopportare per un periodo breve (normalmente 5 - 10 minuti) senza subire danni.

La zona compresa tra le due curve (ovvero tra (2) e (3), (5) e (6)) viene detta *zona di sovraccarico temporaneo*; per il progettista questa zona non esiste ovvero all'atto della progettazione non bisogna *mai* entrare in questo campo di funzionamento che per sua natura permette esclusivamente il superamento di circostanze eccezionali e completamente imprevedibili.

Si possono inoltre trarre alcune considerazioni di grande importanza:

- il valore della massima coppia motrice erogabile dall'apparato motore è un dato che ha scarso valore se non correlato con il numero di giri o la velocità di rotazione corrispondente; dalla figura (10) si può comprendere come la coppia motrice vari, anche considerevolmente, al variare del numero di giri
- a maggior ragione il dato della potenza dell'apparato motore è scarsamente significativo se non correlato con il corrispondente numero di giri: dalla figura (10) si nota come due motori abbiano la stessa potenza massima di 75 Hp, ma il primo la sviluppa a 1650 rpm, il secondo a 2170: il primo dispone di una coppia massima superiore al secondo: 340 N • m contro 290 N • m.

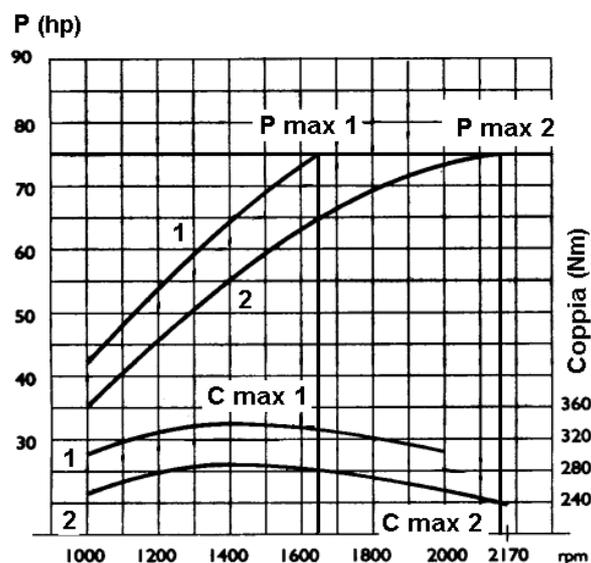


Figura 10: Curve di prestazione comparate

- variazioni delle condizioni di carico (dove per condizioni di carico intendiamo sia variazioni di dislocamento che resistenza aggiuntiva dovuta a fattori occasionali quali carena sporca od avverse condizioni meteomarine) influenzano pesantemente la velocità massima raggiungibile, sia in termini di velocità propria della nave che in termini di massimo régime di rotazione; in altri termini la stessa nave, quindi con stessa elica e stesso apparato motore, può, a parità di numero di giri dell'asse, avere velocità proprie assolutamente diverse ed inoltre l'apparato motore può erogare potenze diverse

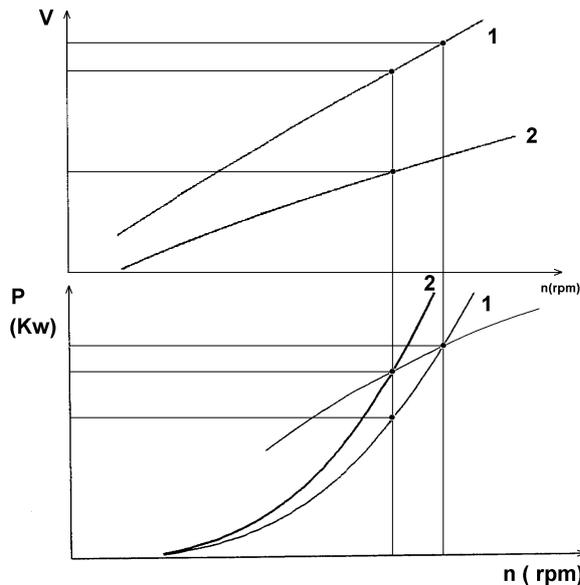


Figura 11: **Carena in prova (1) e carena in esercizio (2)**

Si analizzi la figura (11) che riporta le curve di carena in prova (1) ed in esercizio (2): la massima potenza sviluppabile in esercizio è minore di quella in prova, ovvero parte della potenza rimane inespresa. A parità di velocità di rotazione n^* la potenza erogata P_2^* è molto maggiore di P_1^* , ovvero il consumo è maggiore; viceversa a parità di rotazione del motore e quindi dell'asse la V_2^* è minore della V_1^* .

In pratica se la carena diviene *più pesante* (aumenta la resistenza rispetto alle condizioni di prova) a parità di numero di giri si è più lenti ma si consuma di più.

- infine l'aumento delle condizioni di carico in modo consistente può comportare che la nave non sia in grado di raggiungere il numero di giri asse previsto e la velocità propria dell'unità sia ridotta; riferendosi sempre alla figura (11) la nave in condizioni di esercizio non potrà mai raggiungere la velocità che aveva con la carena in condizioni di prova.

Le tabelle di velocità che sono contenute nella cartella di plancia normalmente si riferiscono alla nave in condizioni di prova e la stessa cosa accade per i tempi di manovra: nel momento in cui la nave è in condizioni di carico diverse anche le velocità di punta ed i tempi di manovra saranno diversi.

Come regola mnemonica se la nave nelle condizioni del momento disloca di più rispetto alle prove, le velocità di punta saranno più basse ed i tempi di reazione più alti.

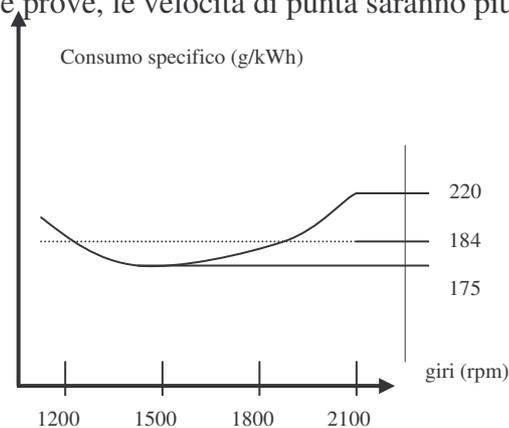


Figura 12 : **Consumo specifico**

Il consumo specifico è un parametro estremamente interessante per analizzare un apparato motore, perché permette di confrontare sistemi diversi: il consumo specifico è la quantità di carburante necessaria per produrre una unità di lavoro. Dalla figura (12) si nota come il consumo specifico medio (184 g/kWh) sia il valore medio della curva che varia da un minimo di 175 g/kWh ad un massimo di 220 g/kWh; appare chiaro che il motore, se impiegato alla velocità di rotazione di 1500 rpm, ha il

minore consumo specifico cioè ogni unità di lavoro "costa" il meno possibile in termini energetici.

Poiché lo scopo è l'ottimizzazione del consumo, i cicli termodinamici che sono stati studiati e successivamente utilizzati negli apparati motori sono stati quelli a rendimento più elevato, che permettono di ottenere potenze prefissate a costi il più possibile contenuti, da cui il *rendimento totale* è un parametro progettuale molto importante, legato direttamente al consumo specifico, e quindi alla maggiore o minore spesa connessa all'utilizzo del mezzo navale⁴.

Chiaramente vi sono anche altri parametri importanti nella scelta dell'apparato motore, ma il rendimento è sempre stato uno degli elementi fondamentali, avendo una diretta relazione con il consumo e quindi il costo di utilizzazione dell'impianto.

Si sono così delineati almeno due gruppi di parametri per la scelta dell'apparato motore:

- le curve di coppia e potenza dell'apparato che non solo rappresentano i limiti di velocità della carena scelta ma descrivono la modificazione della "performance" al variare delle condizioni di utilizzazione
- le curve di rendimento e di consumo specifico che permettono di ponderare costi di gestione, limiti di autonomia ma anche i volumi necessari per immagazzinare il combustibile necessario per una certa autonomia

L'accoppiamento apparato motore-elica-carena è di importanza cruciale per capire il funzionamento della nave: in primo luogo la potenza nominale dell'apparato motore ha una importanza relativa, poiché essa potrebbe anche non poter essere espressa; se consideriamo due navi con carene diverse, armate con lo stesso apparato motore, dal differente punto di intersezione delle rispettive curve di potenza resistente con la curva di potenza massima deduciamo che l'apparato esprimerà numero di giri massimo diverso minore nel caso di quella con resistenza maggiore: in quest'ultimo caso rende evidente come l'apparato possa non essere in grado di esprimere la propria massima potenza.

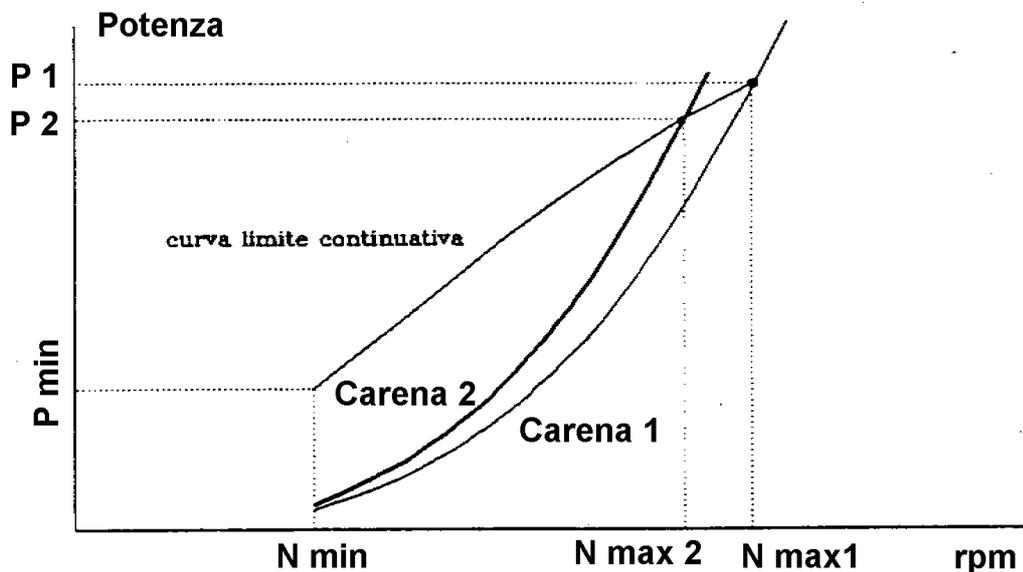


Figura 13: Stesso apparato motore su carene diverse

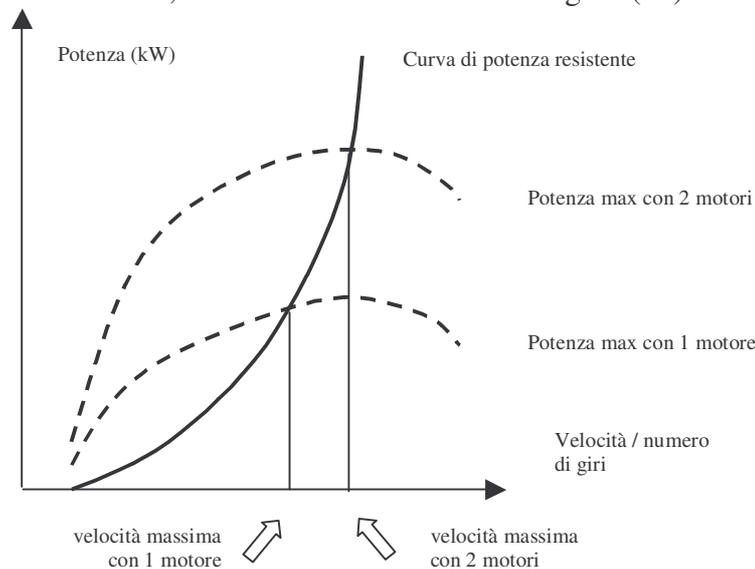
La figura (13) illustra il caso dello stesso tipo di apparato motore utilizzato su carene diverse le quali hanno ognuna la propria curva di resistenza indicata come carena (1) e

⁴ Si veda anche il capitolo 4, pagine 13,14 e 15

carena (2): l'intersezione di ogni singola curva con quella della massima potenza motrice dell'apparato motore indica la massima potenza esprimibile da quest'ultimo: la nave (1) potrà esprimere una potenza maggiore della (2), ad una numero di giri maggiore (si noti, infatti, che $N_{max2} < N_{max1}$) cui corrisponderanno velocità proprie della navi diverse con $V_2 < V_1$; in pratica, se l'apparato ha una potenza nominale di 6.600 CV a 1200 rpm, questa verrà espressa totalmente solo nella nave (1), mentre nella seconda si potranno esprimere solo, poniamo, 5.400 CV a 900 rpm.

L'utilizzo dello stesso motore su navi diverse non è raro in Marina Militare: ad esempio il motore diesel GMT 320.20 nelle versioni standard e DVM è stato impiegato sulle fregate classe Lupo, sulla classe Maestrale, sulla classe Minerva e sulla classe De La Penne (nel particolare su queste ultime tre classi la versione DVM); chiaramente la massima velocità in propulsione diesel è molto diversa.

Un caso interessante è quello della nave con due motori eguali, che è il caso normale nelle navi militari, tutte bielicca: analizzando la figura (14) si nota come la curva di propulsione



totale sia data dalla somma di due curve di potenza del motore: per ogni ascissa il valore di potenza massima con un motore viene raddoppiato ottenendo quella con due motori. Naturalmente le massime velocità raggiungibili sono diverse, anche se, come si può osservare dalla figura (14), il raddoppio della potenza disponibile non implica assolutamente il raddoppio della velocità di punta (considerazione già esposta a pag 23). Si deve notare come si è scelto un

Figura 14: Nave con 2 motori eguali

tipo di motore, per la carena data, tale da avere intersezioni con la curva di potenza resistente nella zona meno ripida, in modo da avere una velocità con un motore accettabile.

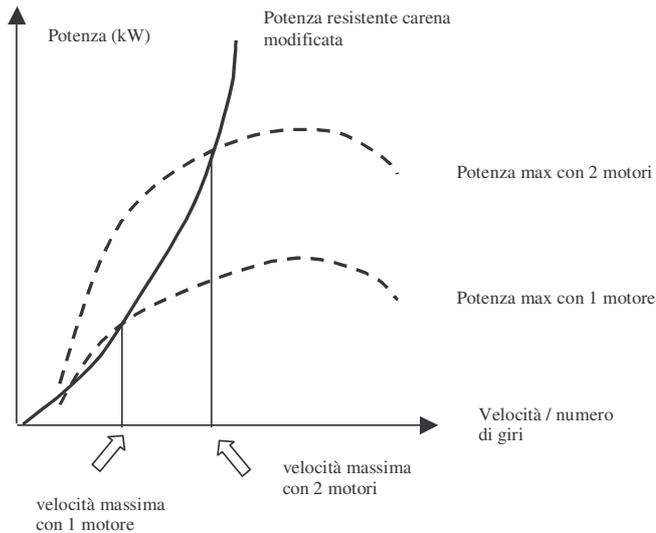


Figura 15: **Carena modificata - Velocità 1 motore insufficiente** e gran parte della potenza rimane inespresa.

Il caso illustrato dalla figura (16) è ancora peggiore: non essendovi intersezione tra la curva della potenza erogata con un solo motore e la curva di resistenza della carena modificata

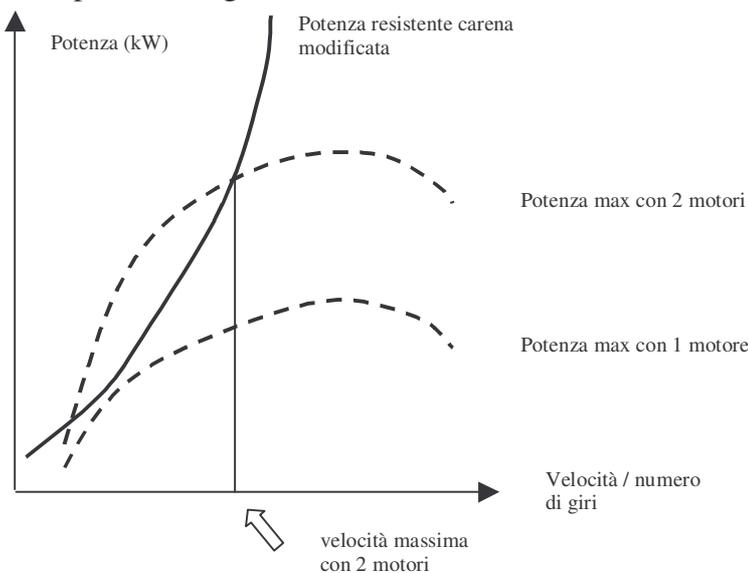


Figura 16: **Carena modificata - Funzionamento solo con 2 motori**

ha quindi solo aspetti concernenti l'Architettura Navale, ma anche la propulsione.

Un caso simile però può verificarsi durante il rimorchio: se la nave deve rimorchiare una unità tale per cui la curva di resistenza somma delle due non interseca la curva di potenza, l'apparato non sarebbe in grado di esprimere la potenza sufficiente e quindi effettuare il rimorchio e l'eventuale tentativo comporterebbe grossi problemi all'apparato motore; la figura (17) illustra tale situazione che, sebbene apparentemente incomprensibile, deriva proprio dal fatto che la potenza non è un valore costante ma dipendente dal numero di giri, da cui il dato di potenza nominale (senza il numero di giri) è un dato indicativo, ma non esaustivo.

Le considerazioni sopra esposte divengono particolarmente importanti nel momento in cui la nave viene modificata: infatti non sono stati rari i casi in cui delle modifiche superficiali hanno comportato dei risultati impreveduti e generalmente esiti piuttosto infausti: nella figura (15) è riportato il caso di velocità con un motore insufficiente: la curva della carena modificata interseca la curva di potenza con un solo motore in zona troppo ripida

la nave non è in grado di funzionare con un motore; se ad esempio la nave fosse in navigazione ed uno dei due motori si spegnesse, l'altro si spegnerebbe allo stesso modo, non essendo in grado di erogare la potenza richiesta in nessun punto di funzionamento.

Tale situazione rappresenta un errore sicuramente gravissimo che può avere ripercussioni drammatiche: si immagina le conseguenze di una avaria ad una asse, nella situazione di mare in tempesta.

La modifica di una nave non

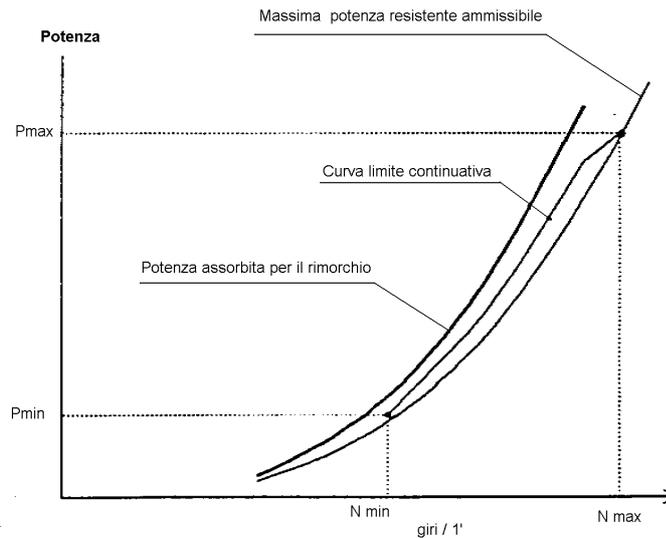


Figura 17: **Situazione di rimorchio impossibile**

Allo stesso modo, la curva di resistenza della nave dipende dalla condizione di carico, da cui la stessa nave ha un comportamento diverso a seconda del dislocamento: intuitivamente la stessa nave, operando a dislocamenti diversi esprimerà curve di resistenza diverse da cui *non solo allo stesso numero di giri svilupperà velocità diverse ma anche consumi diversi*: infatti a parità di numero di giri la nave più carica svilupperà una velocità inferiore a quella meno carica però richiederà una potenza superiore e quindi avrà un consumo superiore. Si ricordi quindi che le velocità di riferimento ottenute con le prove in mare sono *assolutamente indicative, essendo funzione del dislocamento alle prove* e che la velocità reale, come l'autonomia reale sarà tanto più diversa quanto il dislocamento reale si discosta da quello, appunto, alle prove.

Se ne consegue che la nave che parte con carico massimo deve aspettarsi una velocità di punta inferiore ed una autonomia massima minore, particolare importante nella pianificazione delle lunghe navigazioni, come ad esempio, quelle transoceaniche.

Inoltre non bisogna scordare che la resistenza della nave dipende in modo sensibile dallo stato della carena, ovvero dalla vegetazione che inevitabilmente viene a formarsi sull'opera viva e che si traduce in una resistenza aggiuntiva anche considerevole che non può essere trascurata data la sua incidenza sui parametri già citati.

A titolo di esempio si consideri che lo scrivente ha avuto modo di notare come a causa della vegetazione la perdita di velocità rispetto a quella prevista era di circa 1,5 kts, e l'aumento dei consumi comportava una riduzione dell'autonomia massima di circa il 20%; inoltre a fronte di una velocità massima di 30 kts con una potenza di circa 37500 CV l'apparato è riuscito ad esprimere una velocità di 24 kts con una potenza corrispondente di circa 24000 CV (il che ha comportato una riduzione di potenza pari al 36%, ovvero oltre un terzo della potenza era non utilizzabile).

Infine le condizioni meteomarine inducono una resistenza aggiuntiva difficilmente quantificabile ma che deve essere sommata a quella della carena in modo assolutamente identico a come visto in precedenza e che comporta le stesse problematiche.

E' facile rendersi conto come una unità, a dislocamento massimo perché in partenza per una lunga navigazione, con la carena "*sporca*" dovuta ad una lunga permanenza in mare, che incontra condizioni meteomarine avverse, può trovarsi in condizioni difficili circa la propulsione, con velocità sensibilmente diverse da quelle attese e consumi nettamente superiori, che comportano un'autonomia fortemente diminuita; inoltre, soprattutto a causa del mare, che rappresenta una resistenza aggiuntiva variabile nel tempo, può trovarsi ad

operare in condizioni superiori a quella della massima potenza ottenibile dal motore in modo continuativo, ovvero in condizioni di *sovraccarico*; il sovraccarico rappresenta un fattore di rischio molto forte per il motore, ne riduce la vita e ne aumenta enormemente la possibilità di subire delle avarie improvvise, anche molto gravi, *poiché il motore è costretto a funzionare con carichi superiori a quelli massimi per cui è stato costruito*.

I moderni sistemi di rilevazione sono in grado di rilevare il sovraccarico e di segnalarlo al conduttore, ma il conduttore deve essere in grado di comprendere la meccanica di ciò che si sta verificando e ridurre la velocità in modo da portare l'apparato in condizioni esenti da rischi; colui che conduce la navigazione deve rendersi conto che il sovraccarico non è una situazione che si rileva esclusivamente in prossimità della velocità massima ma, per le condizioni già illustrate, si può verificare a velocità molto inferiori che, normalmente non comporterebbero nessun problema e che trascurare tale situazione può condurre ad effetti potenzialmente molto gravi per l'apparato motore e quindi l'unità.

La figura (18) illustra una tipica situazione di sovraccarico: la nave considerata, con carena pulita eroga una potenza P_1 ad un numero di giri N_1 (indicato con N carena nuova) a cui corrisponde una velocità massima, supponiamo, di 23 kts; durante l'attività operativa la carena diventa "più pesante", ad esempio a causa del traino di una cortina sonar. La massima potenza erogabile dall'apparato, determinata dalla intersezione tra la curva limite continuativa e la nuova curva di potenza resistente della carena, sarà P_2 , con un numero di giri N_2 (indicato con N carena sporca), cui corrisponderà una velocità massima sicuramente inferiore, supponiamo 19 kts.

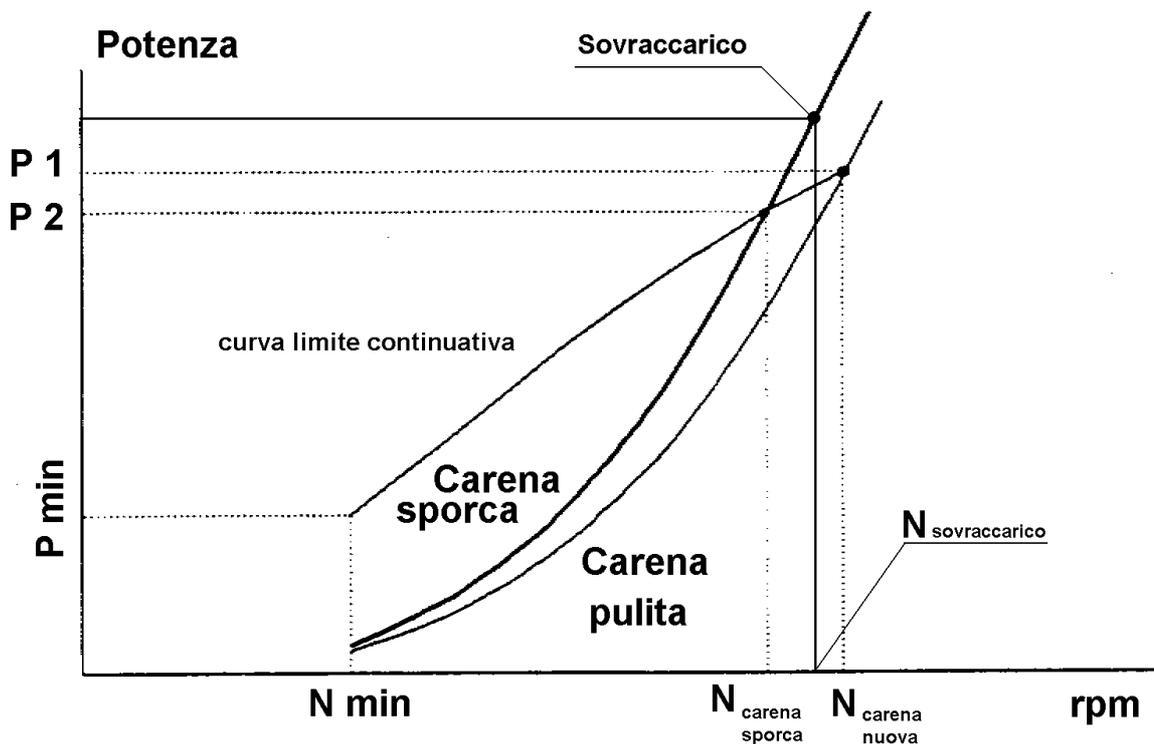


Figura 18 : Funzionamento normale ed in sovraccarico

Il tentativo di "forzare il sistema" ovvero di aumentare ulteriormente la velocità durante il traino, oltre i 19 kts, comporterà l'entrata del motore in sovraccarico: viene richiesta al motore una potenza troppo elevata andando a lavorare in un punto che nella figura è indicato come punto di sovraccarico.

Poiché la curva della carena sporca non è conosciuta è importante ricordare che il sovraccarico si può avere, per determinate ragioni, anche a numero di giri e quindi a velocità inferiori a quella massima contrattuale: ci si ricordi che sebbene il motore è

sempre lo stesso è la nave a non essere sempre identica a sé stessa, ma varia continuamente a causa del dislocamento, dell'assetto e delle condizioni meteomarine.

5. APPARATI MOTORE A VAPORE

Gli impianti a vapore sono gli unici esempi utilizzati largamente di apparati motori esotermici: a tutt'oggi sono ancora abbastanza diffusi nelle marine mercantili mentre la tendenza delle Marine Militari è quella di dismetterli, sostituendoli con impianti di più recente concezione e realizzazione, generalmente di tipo endotermico.

Si è precedentemente detto che ogni impianto a motore convenzionale utilizza un fluido che nell'eseguire un ciclo termodinamico converte una parte del calore ricevuto in lavoro meccanico: il ciclo avviene quindi attraverso lo scambio di calore del fluido con due corpi, detti sorgenti, a temperature diverse dei quali uno, detto sorgente calda, trasferisce dell'energia al fluido e l'altro, detto sorgente fredda, la sottrae: la differenza tra l'energia ceduta dalla sorgente calda e quella sottratta dalla sorgente fredda rappresenta il lavoro meccanico ottenuto, ovvero l'energia che, nel caso di un apparato motore, viene data all'asse dell'elica.

Bisogna considerare che:

- solo una parte dell'energia che la sorgente calda cede al fluido diventa lavoro meccanico; poiché l'energia prodotta dalla sorgente calda è prodotta grazie alla combustione di un combustibile, questa energia equivale ad un certo consumo di questo
- l'energia ceduta dal fluido alla sorgente fredda rappresenta una "perdita" ovvero indica che una parte dell'energia prodotta dalla sorgente calda viene ceduta all'ambiente senza produrre lavoro; tale perdita però è *ineliminabile*, perché non è possibile realizzare un ciclo che funzioni con una sola sorgente¹

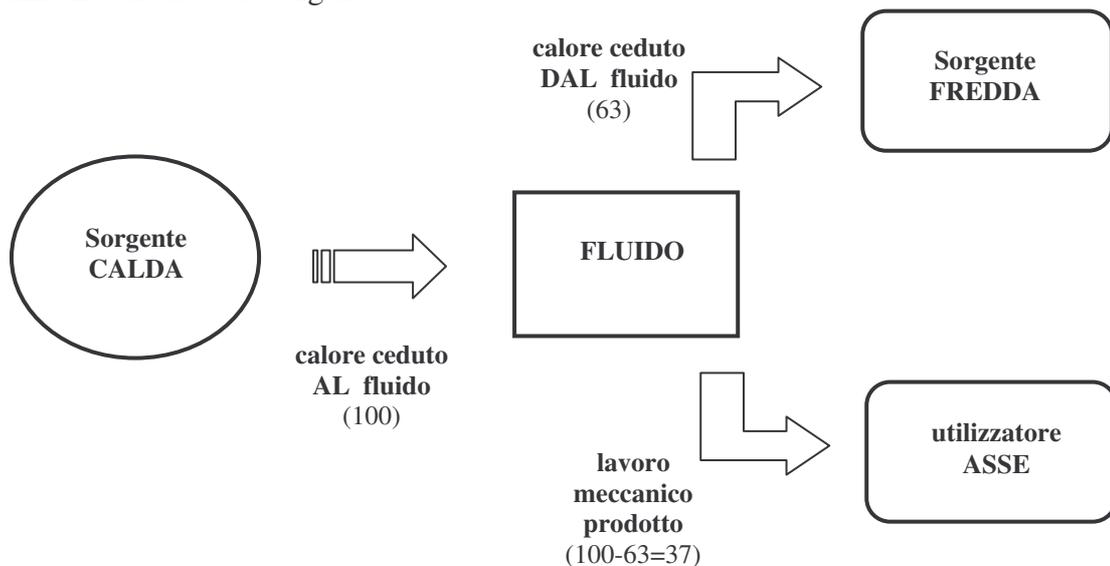


Figura 1: Schema scambi energetici impianto esotermico

Nella figura (1) si è cercato di rappresentare concettualmente un impianto esotermico: da notare che il lavoro prodotto è la differenza tra il calore assunto dalla sorgente calda e quello ceduto alla sorgente fredda; chiaramente minore è quest'ultimo maggiore è, a parità di energia fornita, il lavoro prodotto, ma non bisogna dimenticare che se non vi fosse la sorgente fredda non si avrebbe scambio termico e quindi neppure produzione di lavoro.

Inoltre lo schema è quello di una *macchina ideale* e di un *fluido ideale* ovvero la necessità della sorgente fredda non dipende dalle caratteristiche della macchina o del fluido, ma vale per qualunque macchina e per qualunque fluido.

¹ Come si è già detto nel capitolo 3 a pag 13: il calore è la forma energetica meno pregiata perché non può convertirsi totalmente in altre forme, ad esempio in lavoro meccanico, ma solo in parte; è il secondo principio della termodinamica

Poiché la sorgente calda cede energia al fluido e quella fredda la sottrae, si comprende come questo agisca come una sorta di volano, immagazzinando energia al suo interno e successivamente liberandola; esiste una relazione diretta che associa ad ogni stato energetico una coppia di valori di pressione e temperatura: più sono alti i valori della pressione e della temperatura e più grande è l'energia che il fluido racchiude in sé. Per questo motivo si utilizza esprimere lo stato del fluido con questi due valori, perché attraverso di essi si può risalire alle energie corrispondenti.

Il ciclo termodinamico di riferimento per l'apparato esotermico a vapore è detto *ciclo di Hirn* (od anche, sebbene impropriamente, *ciclo di Rankine*) ed è sostanzialmente formato da quattro trasformazioni che possono essere schematizzate come in figura (2):

- una compressione adiabatica di liquido (tratto 1-2) nella pompa di alimento
- una ebollizione isobara (tratto 2-3) nella caldaia; notare che in 2 il termovettore è liquido, mentre in 3 è vapore surriscaldato
- una espansione adiabatica di vapore (tratto 3-4) in turbina
- una condensazione isobara (tratto 4-1) nel condensatore; notare che in 4 il fluido è vapore, mentre in 1 è liquido

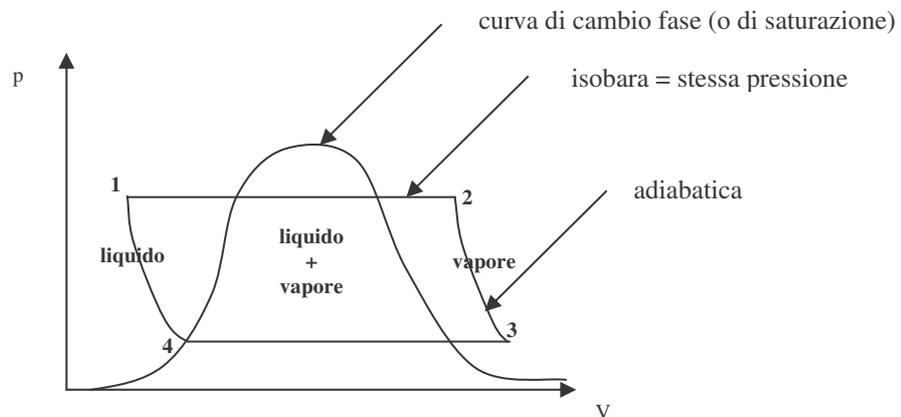


Figura 2: Ciclo Hirn su piano p,V

La rappresentazione della figura (2) è solo una delle molte rappresentazioni possibili su piani diversi, ma è importante ricordare che, al di là della forma, il ciclo è formato sempre dalle medesime trasformazioni.

L'apparato a vapore utilizza come fluido motore (o termovettore) l'acqua, nelle sue fasi liquida e vapore; esso è formato sostanzialmente da cinque elementi distinti che compongono il ciclo:

- **la caldaia:** rappresenta la sorgente calda, il luogo dove l'energia è ceduta al fluido. L'acqua entra in caldaia ad alta pressione, normalmente tra i 50 e gli 80 kg/cm², e nella caldaia, grazie al calore sviluppato dalla combustione, si riscalda e si converte in vapore; la pressione di uscita del vapore è eguale a quella di ingresso dell'acqua, ma le temperature sono molto diverse: generalmente l'acqua entra tra i 120 e i 160°C ed il vapore esce a temperature tra i 400° ed i 500°C: questa differenza tra le temperature di ingresso e di uscita del fluido è indice dell'energia che la caldaia ha ceduto all'acqua.

Gli apparati motori a vapore ancora utilizzati in Marina Militare utilizzano delle caldaie Foster-Wheeler, costruite su licenza dall'Ansaldo, del tipo "D": il nome "tipo D" deriva dalla forma della caldaia stessa che ricorda una "D", come si può notare nella figura (3); nella stessa figura può essere notata la *camera di combustione*, i *fasci tubieri*, i *collettori*: nella figura (2) non compaiono i bruciatori poiché la parte frontale della caldaia è stata rimossa per permettere la visione dell'interno.

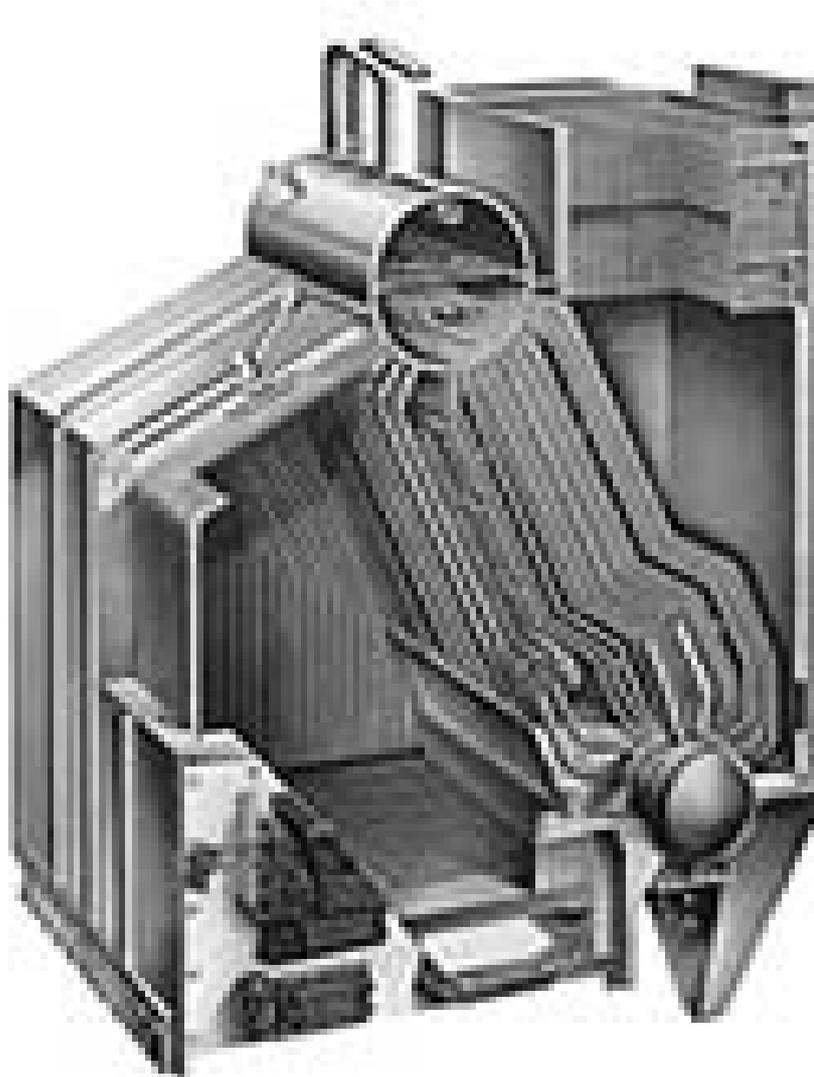


Figura 3 Caldaia Marina (Foster-Wheeler tipo "D")

La caldaia Foster-Wheeler nasce per bruciare combustibile pesante, come si può dedurre dalle dimensioni praticamente eguali di larghezza e profondità; la superficie di scambio non è molto grande e quindi il rendimento η_c è abbastanza limitato, ma questo permette di costruire una caldaia di peso e dimensioni relativamente contenute.

La figura (4) rappresenta una caldaia marina Babcock & Wilcox per gasolio: si noti la profondità della camera di combustione (la caldaia Foster-Wheeler nasce, infatti, per bruciare combustibile pesante), il collettore, i fasci tubieri: la camera di combustione è circondata da fasci tubieri i cui scopo è quello di raccogliere quanto più possibile il calore generato dalla combustione e trasferirlo all'acqua; come si è detto in precedenza non tutto il calore generato dalla combustione viene ceduto all'acqua: se ciò avvenisse i fumi uscirebbero dalla caldaia ad una temperatura eguale all'aria in ingresso. Poiché ciò non avviene, maggiore è la temperatura dei fumi, minore è la quantità di calore che il termovettore riesce ad assumere.

Il collettore è il punto nel quale l'acqua viene immessa nel corpo della caldaia, e dal quale viene distribuita in tutti i tubi, nei quali avviene il cambio di fase; poiché il vapore è più leggero dell'acqua esso ritorna al collettore, dal quale viene prelevato, ulteriormente riscaldata (o più propriamente *surriscaldato*), ed inviato alle utenze.

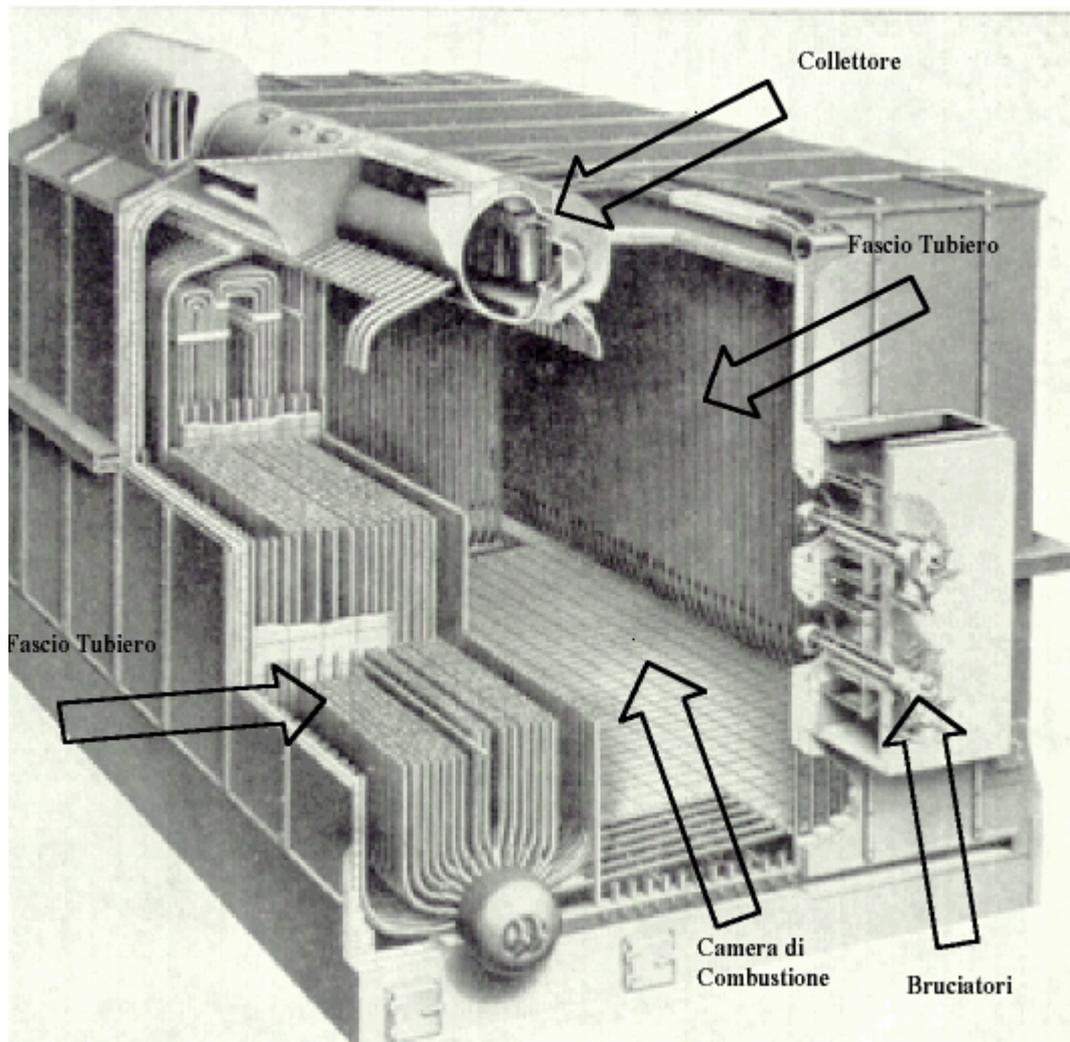


Figura 4: Caldaia marina Babcock & Wilcox Co.

I bruciatori sono il modo con cui vengono introdotti nella caldaia il comburente (aria) ed il combustibile (gasolio) in modo da realizzare la combustione e quindi la generazione di calore; le dimensioni della camera di combustione *sono dettate dal tipo di combustibile*: nella figura (3) la caldaia è stata progettata per bruciare combustibile pesante (generalmente detto nafta) e le dimensioni in pianta della caldaia (larghezza e profondità) sono praticamente eguali; nella figura (4) la caldaia è progettata per bruciare gasolio o gas, per cui la profondità è prevalente sulla larghezza.

Si ricordi che la caldaia nasce per bruciare un certo tipo di combustibile e se questo viene variato le prestazioni della caldaia possono diminuire anche in modo estremamente consistente.

Riprendendo quanto detto nel capitolo 2 e facendo riferimento alla figura (5) si noti come l'acqua entra ed esce dalla caldaia alla stessa pressione pari a 50 kg/cm^2 ma a temperatura molto diverse (450°C contro i 150°C in ingresso): in questa forte differenza di temperatura e nella differenza di stato (liquido in ingresso, vapore in uscita) che si manifesta il calore² assunto dal termovettore nel passaggio nei fasci tubieri.

Tale calore proviene dalla combustione di un combustibile (il gasolio, per la Marina Militare) e di un comburente (l'aria), ma non tutto il calore generato viene ceduto all'acqua: una parte sfugge come perdita con i fumi; la temperatura dei fumi è segnale della bontà della trasmissione di calore all'acqua e deve essere quanto più contenuta possibile.

² Calore od energia: ricordiamo una volta di più che il calore è una delle forme in cui si manifesta l'energia

Infatti detto Q_C la totalità del calore generato dalla combustione, Q_1 quello assunto dall'acqua e Q_F quello dei fumi, vi sarà tra essi la relazione:

$$Q_1 = Q_C - Q_F$$

od anche, come riportato a pag 15,

$$Q_1 = \eta_c \cdot Q_C \quad \text{e quindi} \quad Q_F = (1 - \eta_c) \cdot Q_C$$

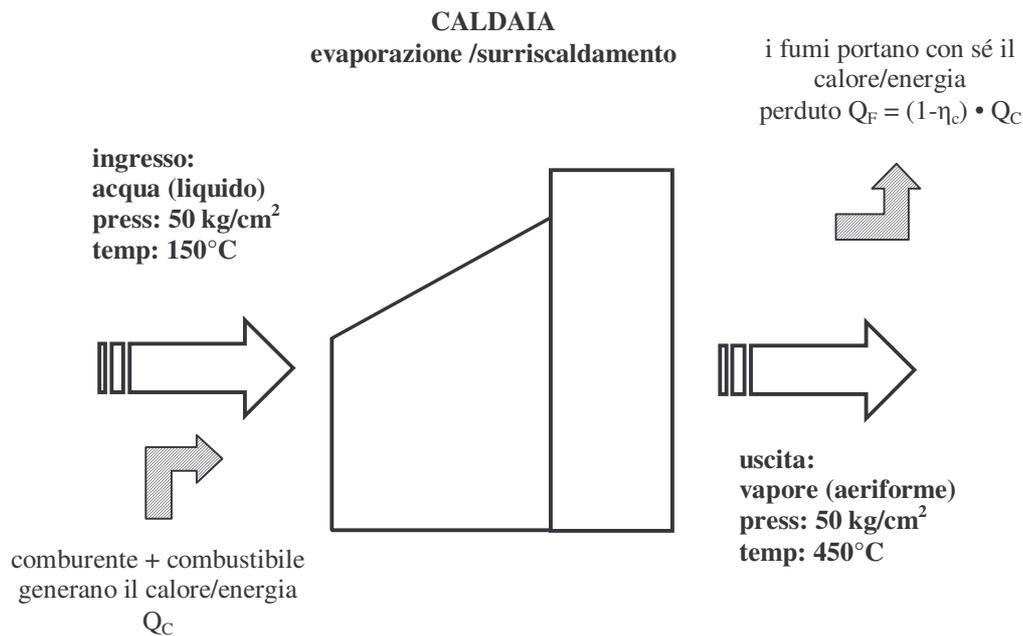


Figura 5: Schema funzionale di caldaia

Si presti attenzione al fatto che la perdita di energia nei fumi NON è il calore Q_2 che deve essere fornito alla sorgente fredda per chiudere il ciclo: questa non è una perdita ineliminabile ed infatti sarà eliminata nei motori endotermici. Questo tipo di perdita viene detto "perdita per trasmissione di calore".

- **la turbina:** è la macchina nella quale avviene la conversione dell'energia termica in energia meccanica; nella turbina degli appositi dispositivi, detti ugelli, convertono l'energia presente nel fluido in velocità del fluido stesso. Nella pratica sono dei condotti la cui sezione ha una forma particolare che provoca un'accelerazione del flusso, ovvero un aumento di velocità: questa accelerazione si produce a spese dell'energia del fluido stesso, che quindi esce dall'ugello ad una pressione e temperatura minori di quella d'ingresso; proprio il valore minore di questi due parametri all'uscita indicano come una parte di energia sia stata consumata, e questa è proprio quella utilizzata per accelerare il fluido; il fluido entra quindi in una ruota palettata che obbliga il vapore ad un cambiamento di direzione. Poiché la paletta agisce sul vapore, il vapore agisce sulla paletta imponendo la rotazione della ruota palettata attorno al proprio asse, che è collegato all'asse dell'elica

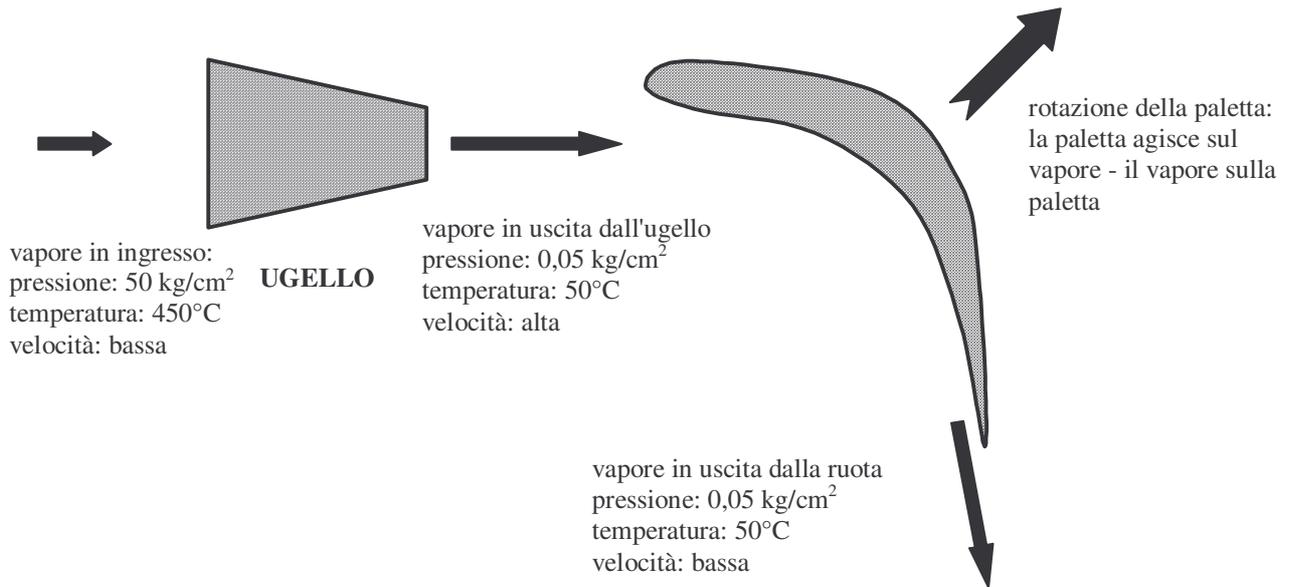


Figura 6: Schema funzionale di una turbina

La figura (6) illustra il funzionamento di massima di una turbina: nell'ugello l'energia del vapore viene trasformata in aumento di velocità e ciò può essere soprattutto notato dalla differenza delle temperature in ingresso ed uscita del fluido dall'ugello stesso; questa elevata velocità viene indirizzata sulla paletta che ne muta la direzione: come la paletta agisce sul vapore, obbligandolo a cambiare direzione, così il vapore agisce sulla paletta, facendola ruotare attorno al suo asse.

La turbina, nel suo funzionamento, è una macchina complessa, come si può notare dalla figura (7): ad esempio non è pensabile di convertire in velocità una quantità di energia così grande in un solo ugello, come postulato nella figura (6), quindi la turbina reale sarà spesso dotata di tante *corone palettate* dette *stadi*. Il principio di funzionamento, però, rimane quello illustrato.

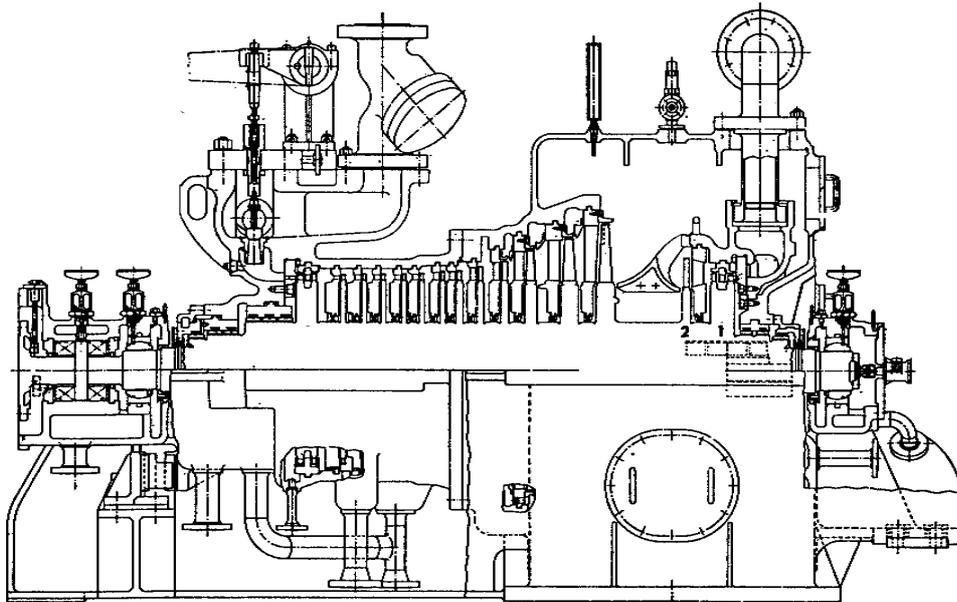


Figura 7 Turbina a Vapore

Si deve anche notare che, nonostante la bassa temperatura con la quale il vapore lascia la turbina, il termovettore è ancora vapore e questo perché la pressione è sufficientemente bassa; per riconvertire il vapore in liquido e quindi chiudere il ciclo sarà necessario asportare questa energia.

- **il condensatore:** il vapore lascia la turbina con una certa quantità di energia residua ed il condensatore è il luogo ove questa viene sottratta al vapore riconvertendolo in acqua; il calore contenuto nel vapore viene ceduto all'acqua di mare: poiché si desidera produrre la maggiore quantità di lavoro meccanico possibile si cerca di fare in modo che il vapore entri nel condensatore con le minime pressione e temperatura possibili, cioè con la minore energia residua possibile³; nel condensatore il vapore si riconverte in acqua e l'energia risultante viene ceduta all'acqua di mare, che funge quindi da sorgente fredda.

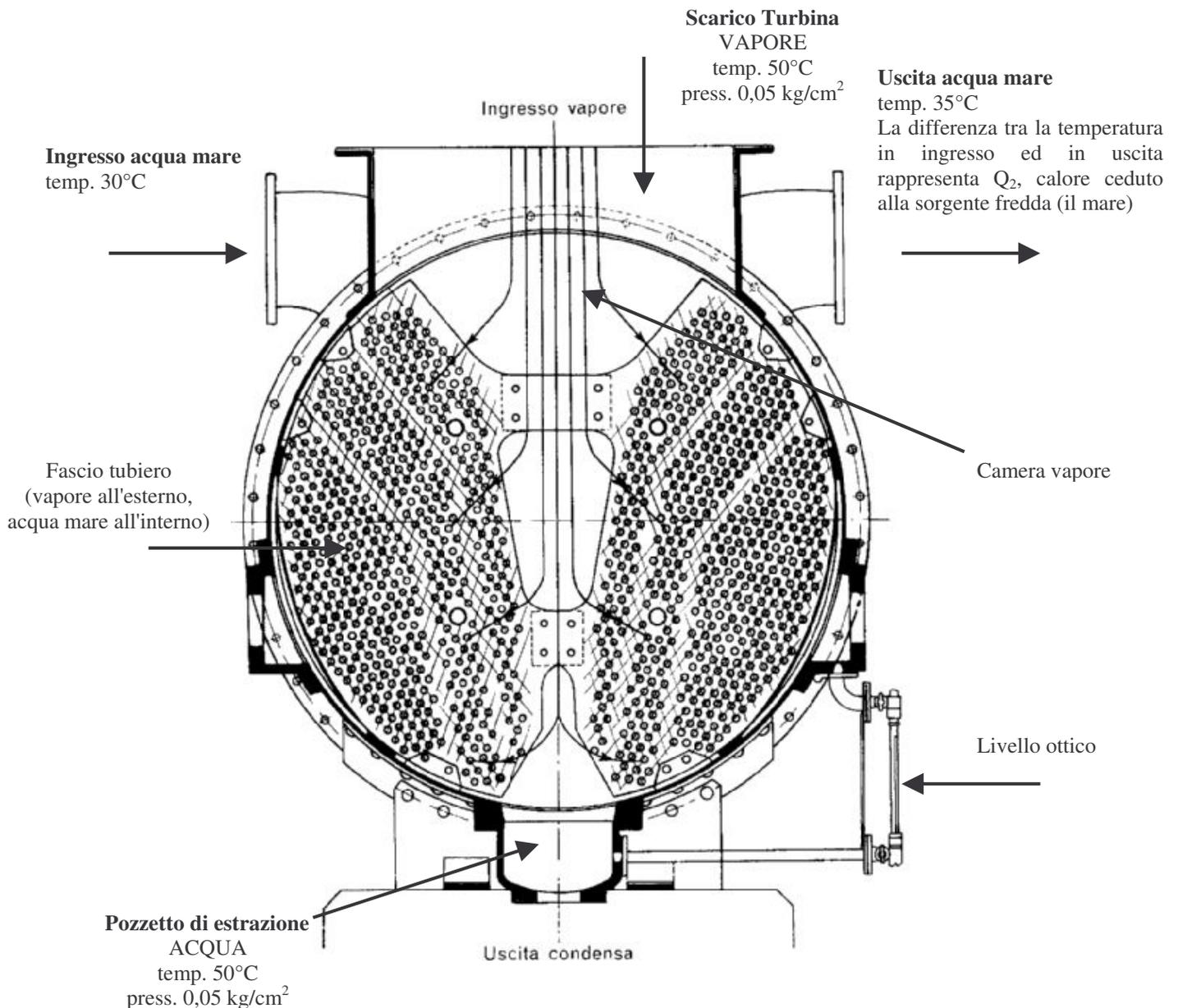


Figura 8: Condensatore

³ Come si è visto nella sezione della turbina, minore è la pressione minore viene ad essere la temperatura e minore è la carica energetica che il vapore porta con sé all'uscita della turbina: diminuendo la pressione e la temperatura si aumenta la quantità di energia che viene convertita in lavoro meccanico

Fisicamente il condensatore (si consideri la figura (8)) è costituito da un fascio tubiero nel quale scorre l'acqua di mare lambito all'esterno dal vapore: il vapore cede calore all'acqua di mare e si condensa, gocciola sui fasci tubieri e si raccoglie sul fondo nel *pozzetto di estrazione*, dal quale aspira la pompa di estrazione; il condensatore è appeso sotto la turbina, cioè il vapore che ha terminato di lavorare nella macchina entra direttamente nel condensatore. Mentre il vapore e l'acqua rispettivamente entrano ed escono dal condensatore alla stessa pressione e temperatura, l'acqua di mare esce dal condensatore ad una temperatura nettamente superiore: la cessione di calore/energia da parte del vapore è rappresentata dalla variazione di *fase* (da aeriforme a liquido), mentre il calore ceduto all'acqua di mare produce la variazione di temperatura.

L'acqua di mare è la sorgente fredda, il calore a questa ceduto è Q_2 , rappresenta una perdita ma è ineliminabile: il condensatore è fondamentale per il funzionamento dell'impianto tanto quanto la caldaia.

- **la pompa di estrazione ed il deareatore:** la pompa di estrazione è il dispositivo che aspira l'acqua dal condensatore principale e la invia ad un serbatoio detto deareatore che costituisce il polmone dell'impianto. Infatti la quantità di lavoro meccanico prodotto dall'apparato dipende dalla quantità di vapore che attraversa la turbina in un certo tempo, ovvero dalla portata di vapore: durante un aumento di velocità, il deareatore tende a svuotarsi, cedendo parte della sua riserva di acqua al circuito per superare il temporaneo aumento della richiesta, mentre in caso di diminuzione della velocità esso tende a riempirsi, raccogliendo l'eccesso di acqua presente nel ciclo stesso.

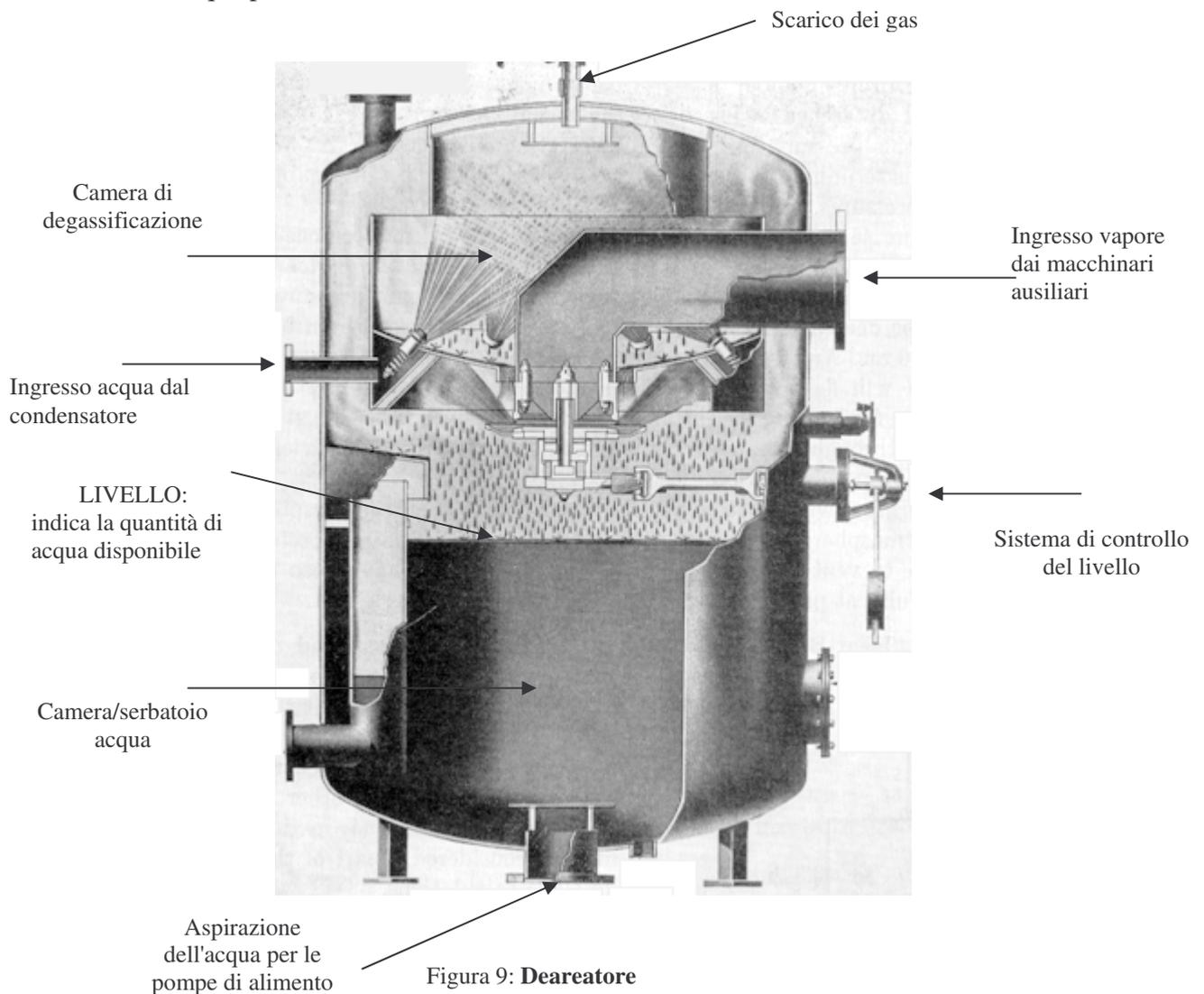


Figura 9: Deareatore

La camera acqua rappresenta la riserva di acqua per il circuito del vapore e deve essere mantenuta *a livello* il che avviene tramite un apposito dispositivo.

L'altra importante funzione del deareatore è quella di rimuovere l'aria ed in particolare l'ossigeno dall'acqua di estrazione, ossigeno che è responsabile delle corrosioni all'interno dell'apparato: questo avviene miscelando il vapore proveniente dai macchinari ausiliari⁴ e l'acqua di estrazione dal condensatore nella camera di deareazione. I gas vengono espulsi all'esterno da un'apposita uscita.

- **la pompa di alimento:** è il dispositivo che aspira l'acqua dal deareatore, dove si trova a bassa pressione e temperatura, la comprime riportandola alle condizioni di ingresso in caldaia e quindi chiudendo il ciclo.

La pompa di alimento è generalmente azionata a sua volta da una turbina a vapore di dimensioni contenute ed è un componente molto importante dell'apparato: il blocco della pompa di alimento comporterebbe lo svuotarsi della caldaia e quindi la fermata dell'impianto; un apposito sensore controlla il funzionamento della pompa di alimento: se la pompa si ferma e non si riesce ad inviare sufficiente acqua alla caldaia (od ad *alimentarla*) l'impianto automaticamente si ferma o, come si dice, *va in blocco*.⁵

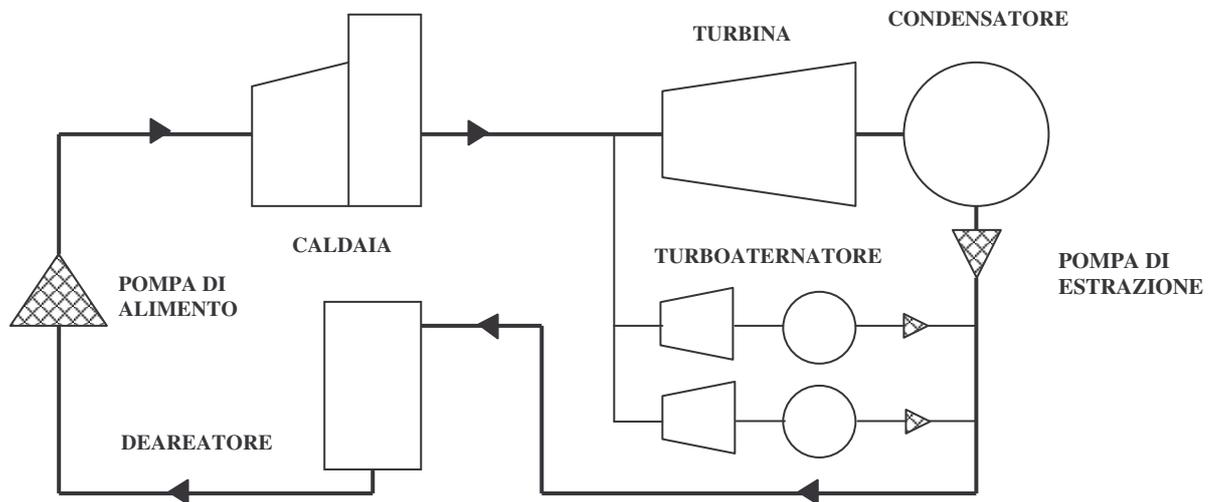


Figura 10: Schema di massima di impianto a vapore

ELEMENTI DI CONFRONTO TRA IMPIANTI

Gli apparati motori a vapore hanno dimostrato di essere estremamente robusti ed efficienti: l'esperienza ha dimostrato che il verificarsi di una avaria tale da compromettere il funzionamento dell'impianto è molto più raro in questo sistema che in quelli basati su diesel e T.A.G.; inoltre questa tipologia di impianto invecchia meno rapidamente delle altre, ovvero gli intervalli fra le revisioni generali sono maggiori che negli altri.

Inoltre questi apparati non richiedono dei sistemi di controllo particolarmente raffinati e questo si traduce in impianti di automazione più semplici rispetto agli altri casi e quindi meno costosi e meno soggetti ad avarie; di contro però richiedono una maggiore quantità di personale per la conduzione e

⁴ I macchinari ausiliari sono quei macchinari dell'apparato che non sono né turbina principale né turbolaternatori, ma, ad esempio, la turbopompa di estrazione o di alimento.

⁵ Per "blocco della caldaia" si intende l'intervento di una qualche sicurezza che arresta l'attività di combustione e quindi spegne la caldaia; tra questi uno è la fermata della pompa di alimento.

sono molto onerosi circa la piccola manutenzione (sostituzione di guarnizioni, revisioni di valvole), perché composti da un gran numero di componenti.

Sebbene in linea generale le caldaie possano utilizzare qualunque tipo di combustibile, per problemi di uniformità si utilizza lo stesso combustibile delle navi con apparati endotermici, ovvero gasolio F-76; questa soluzione però non permette di sfruttare uno dei principali pregi degli impianti a vapore, ovvero l'utilizzo di combustibile poco pregiato e quindi più economico: per questo motivo il costo di gestione di questi impianti in termini di combustibili si pone in una posizione intermedia tra i motori diesel (notevolmente più economici) e le T.A.G. (leggermente più dispendiose).

Il problema principale degli apparati a vapore sono però l'ingombro ed il peso elevato che li porta, a parità di potenza installata, ad essere molto più ingombranti sia delle T.A.G. che dei motori diesel, ed anche notevolmente più pesanti: questo comporta che a parità di dislocamento il carico utile (cioè i sistemi d'arma) della nave viene considerevolmente ridotto oppure, a parità di carico utile si richiede maggiore dislocamento e quindi navi più grandi.

Inoltre l'apparato motore a vapore necessita di un tempo di approntamento molto elevato, ovvero il tempo necessario fra l'accensione della caldaia e l'inizio dell'erogazione della potenza sull'asse è di circa 6 ore, assolutamente non paragonabile con quello dei motori diesel e delle T.A.G. che è di poche decine di minuti.

Nonostante l'apparato a vapore sia sensibile alle condizioni esterne, come ad esempio la temperatura dell'acqua di mare, lo è meno degli altri apparati; però è molto sensibile all'effetto della melma aspirata dal fondo, come si è avuto modo di vedere, e lo è in misura maggiore degli altri tipi di impianti, il che lo rende poco adatto per l'uso su fondali bassi od in acque fluviali.

La turbina a vapore produce la propria coppia massima da ferma, ovvero la "forza" con cui viene fatto girare l'asse è massima quando l'asse è fermo; questo permette di sviluppare grandi potenze anche a bassa velocità e torna particolarmente utile in caso di operazioni di rimorchio; inoltre non vi è la necessità di interporre tra l'uscita della turbina e l'asse dell'elica un giunto che permetta di avviare la macchina e portarla a regime prima di metterla sotto carico, come invece accade per i motori diesel e le T.A.G..

La turbina a vapore non è una macchina reversibile, ovvero il vapore può attraversarla solo in una direzione ben precisa: non è possibile ottenere l'inversione del moto (cioè la marcia indietro) con la stessa macchina con cui si produce il moto in avanti della nave; per questo motivo sulle navi a vapore la marcia indietro è realizzata con una apposita piccola turbina, ben distinta da quelle principali; proprio la grandezza della copia a giri zero e la velocità bassa a cui si va a marcia indietro permette di contenere notevolmente le dimensioni delle turbine di marcia indietro; questa particolarità ha reso, nel passato, la turbina a vapore molto apprezzata dai progettisti navali, ma attualmente è stata gradualmente soppiantata dalla tecnologia delle eliche a passo variabile.

Dimensioni dell'apparato	Grandi; la necessità della superficie di scambio impone grandi dimensioni, soprattutto per le caldaie
Peso dell'apparato	Grandi; il trasporto del vapore ad alta pressione richiede molte tubazioni e di spessori considerevoli
Prontezza della risposta	Elevata; la turbina esprime la coppia massima a giri zero
Tempo di approntamento	Elevato; dalle quattro alle sei ore
Costo di acquisizione	Medio; richiede molto materiale ma non di elevata tecnologia
Costo di utilizzo	Medio; consumo relativo di combustibili e lubrificanti
Consumo specifico	Medio; consumo contenuto se ben progettato
Tipo di combustibile	Praticamente qualunque
Costo di gestione	Medio; nell'insieme richiede molte manutenzioni ma poco onerose
Quantità e qualità di personale	Richiede molto personale ma di bassa qualità
Costo di manutenzione	Basso; richiede molte manutenzioni e pp.dd.rr. ma poco onerose
Vita totale	Elevata; praticamente la più longeva
Affidabilità	Elevata

Vulnerabilità	Elevata; gli apparati sono di grandi dimensioni
Funzionamento degradato	Molto spinto; nella pratica i punti critici sono molto pochi
Impatto operativo	Elevato; molto rumoroso, con grandi segnature IR

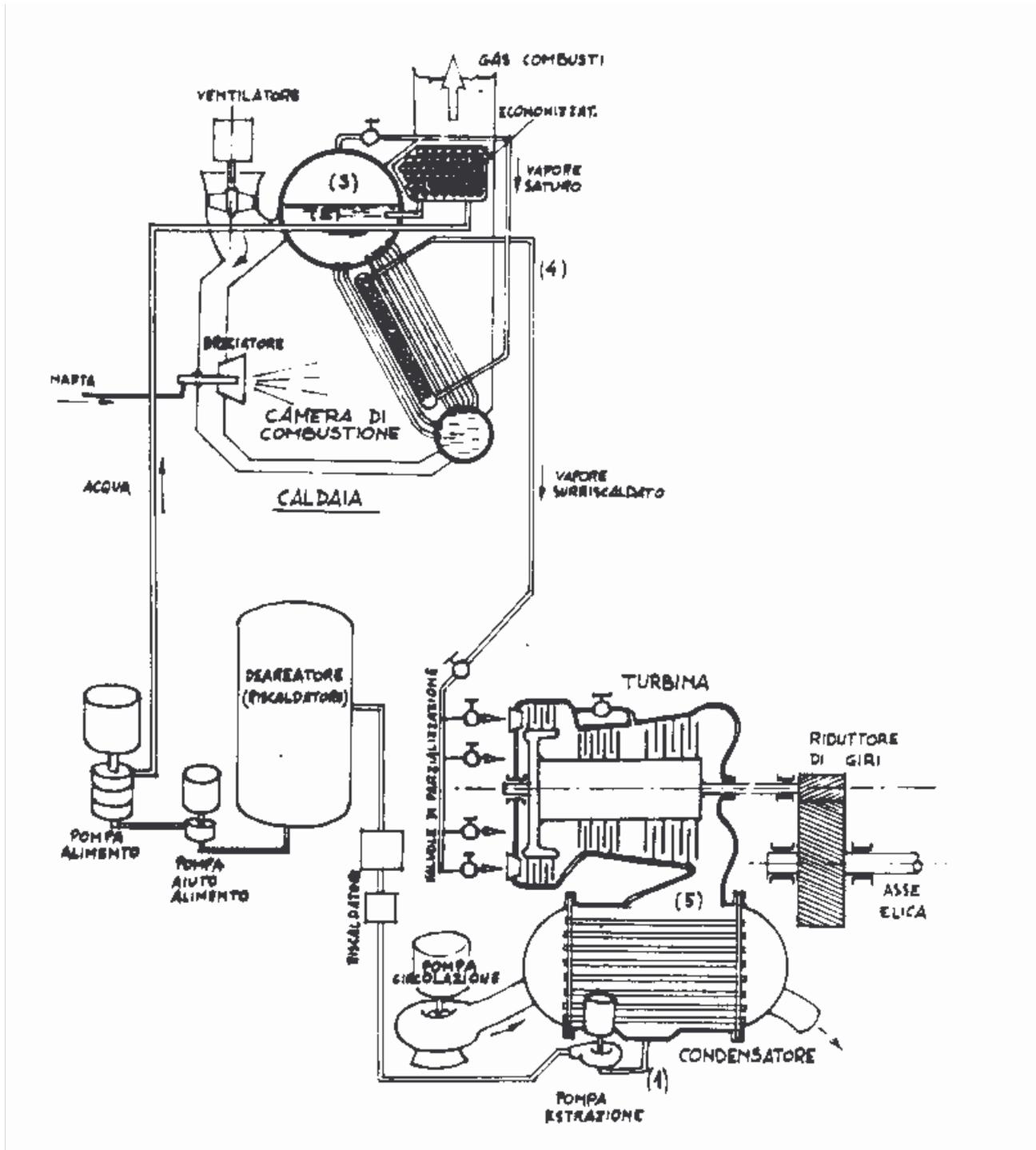


Figura 11: Schema semi-dettagliato di impianto a vapore

6. APPARATI CON MOTORI ENDOTERMICI

Il motore endotermico è la naturale evoluzione del ciclo esotermico, il ciclo nel quale la combustione avviene *all'interno e con il concorso* del termovettore, eliminando quindi il problema dello scambio termico tra la sorgente calda ed il fluido: la sorgente calda, infatti, viene ad essere *all'interno* del fluido stesso.

Come si è visto nel capitolo 5 pag. 34 il calore che il fluido acquisisce nell'impianto esotermico è la differenza tra quello generato dalla combustione e quello perduto con i fumi, ovvero:

$$Q_1 = Q_C - Q_F \quad \text{quindi} \quad Q_1 = \eta_c \cdot Q_C$$

e nel capitolo 2 pag. 15 si è osservato che tanto maggiore è la superficie di scambio A, tanto più η_c tende al valore massimo di uno; si è visto inoltre che il lavoro totale è pari a:

$$L = \eta_{th} \eta_c Q_C$$

ovvero dal calore/energia generata dalla combustione per il prodotto dei rendimenti *termodinamico e di combustione*.

I cicli endotermici traggono la loro origine dalla considerazione che se la combustione avviene all'interno del fluido allora il problema dello scambio termico viene eliminato, cioè il rendimento di combustione η_c diviene pari ad uno; il ciclo che ne è all'origine è sostanzialmente diverso da quello Hirn tipico degli impianti a vapore e si può dimostrare che ha rendimento termodinamico (η_{th}) inferiore; poiché, però, il rendimento totale del ciclo a vapore è il prodotto di due termini, entrambi minori di uno, appare chiaro che tale valore prodotto sarà *minore* di ognuno dei due presi singolarmente: soprattutto a causa del contenimento dei pesi e degli ingombri così essenziale per le navi militari, il rendimento di combustione η_c è così basso da ridurre il rendimento totale ad un valore inferiore a quello dei motori endotermici.

Il motore endotermico, quindi, che appare penalizzato da un punto di vista teorico, diventa nella realtà estremamente vantaggioso non solo per le dimensioni contenute ed i pesi limitati (la mancanza di superfici di scambio riduce le esigenze in termini di volume e peso) ma anche per i consumi limitati.

CICLO OTTO

I motori endotermici si dividono in due grandi categorie: quelli endotermici alternativi, ovvero i motori a benzina e diesel, e quelli rotativi, ovvero le turbine a gas (T.A.G. o turbogas); sebbene queste due tipologie possano sembrare molto diverse, sfruttano lo stesso principio ovvero fare avvenire la combustione all'interno del fluido motore, ovvero una combustione endotermica.

I motori alternativi sono nati nella seconda metà del XIX secolo con lo scopo di risolvere il problema della trasmissione del calore al fluido motore, problema che imponeva, per gli apparati motori esotermici, la necessità di grandi superfici di scambio e quindi di grandi dimensioni; il primo motore storicamente proposto è stato quello alternativo a ciclo Otto, seguito, alla fine del XIX secolo dal motore ciclo diesel e, negli anni '40 del XX, dal turbogas.¹

Il motore funzionante a ciclo otto è schematicamente formato da un cilindro nel quale scorre un pistone, chiuso sulla sommità da un dispositivo detto "*testa*" o "*testata*", nel quale sono ricavate delle aperture che vengono alternativamente aperte e chiuse da apposite "*valvole*"; nella testata è

¹ Si tenga presente che gli studi teorici dei cicli otto, diesel e bryton (turbogas) vengono completati nella seconda metà del XIX secolo; l'applicazione tecnica dei cicli nella costruzione dei motori è stata sostanzialmente limitata dalla tecnologia dei materiali, troppo primitiva per permettere certe applicazioni

ricavato anche l'alloggiamento per una coppia di elettrodi, detti "*candela*", come illustrato nella figura (1).

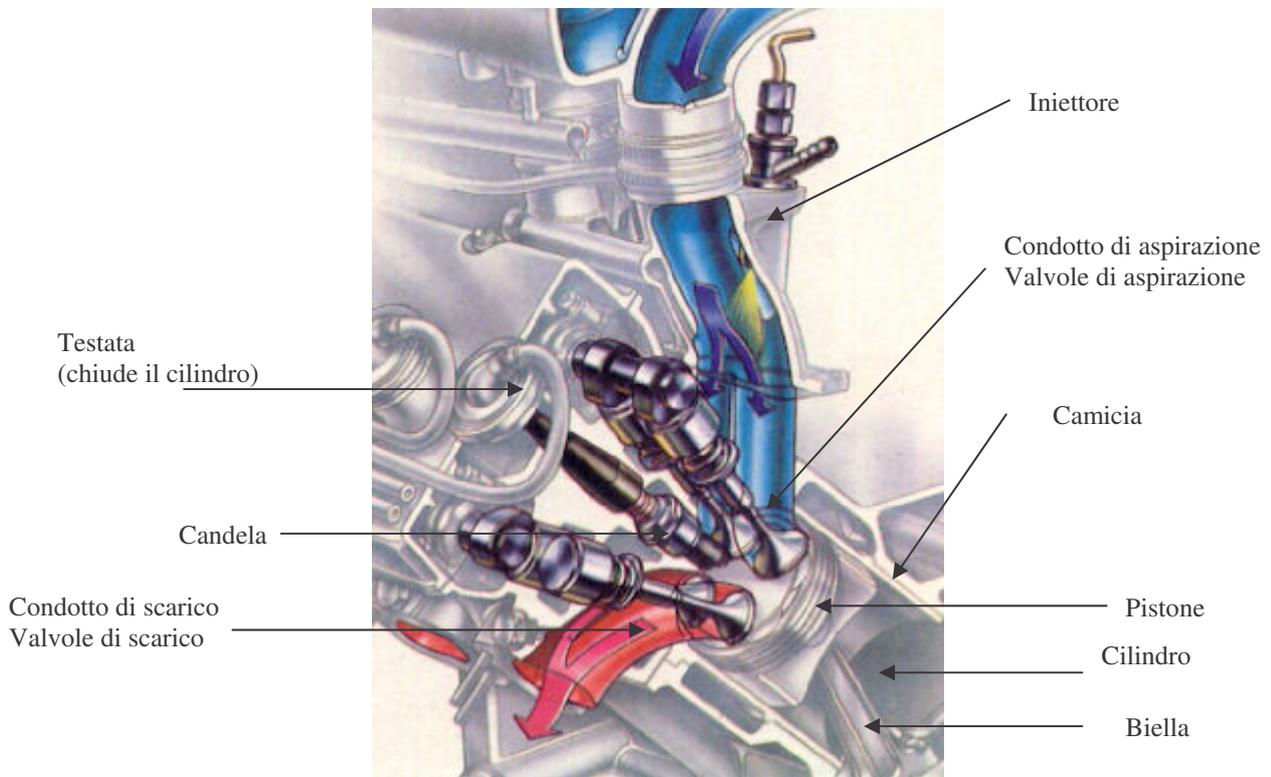


Figura 1: **Motore automobilistico 4 tempi, 16 valvole, iniezione m-p**

Il pistone (o "*stantuffo*") è collegato ad una asta detta "*biella*" la quale è vincolata, nell'altro estremo, ad un elemento dell'albero motore denominato "*manovella*"; nella figura (2) è rappresentato l'assieme pistone e biella per un motore diesel navale veloce.

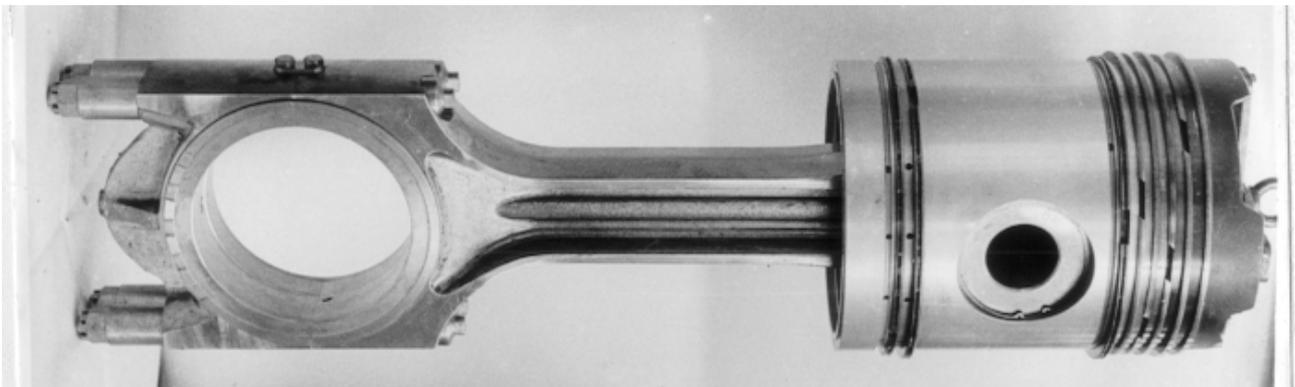


Figura 2: **Pistone con biella**

questo sistema permette di convertire il moto traslatorio del pistone in un moto rotativo e viceversa; il ciclo Otto che sarà esaminato, ovvero quello a 4 tempi, si compone di sei trasformazioni termodinamiche:

- una corsa di aspirazione (tratto A-B)
- una compressione adiabatica (tratto B-C)

- una combustione a volume costante (tratto C-D)
- una espansione adiabatica (tratto D-E)
- uno scarico a volume costante (tratto E-F)
- una corsa di scarico(tratto F-A)

La figura (3) illustra le fasi in relazione al moto del pistone nel cilindro, mentre la figura (4) illustra le stesse fasi nella forma di trasformazione termodinamica; come si è già detto per il ciclo Hirn, qualunque piano è equivalente, ma storicamente si preferisce utilizzare il piano di Clapeyron (p,V).

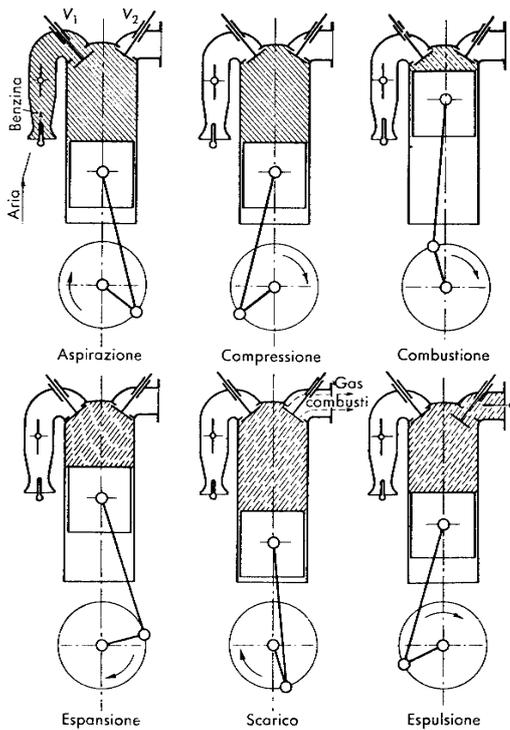


Figura 3: Fasi caratteristiche ciclo Otto

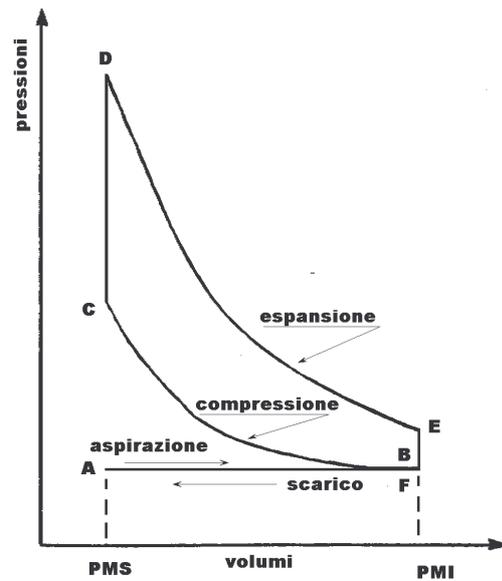


Figura 4: Fasi termodinamiche ciclo Otto, piano (p,V)

Le trasformazioni si realizzano mentre il pistone si muove: il punto più "alto" che il pistone raggiunge viene detto punto morto superiore (o PMS), quello opposto punto morto inferiore (o PMI): le trasformazioni avvengono nei successivi passaggi del pistone come si evince dalla figura (5).

Nel punto (A) (fig. 4) il pistone si trova al PMS, si chiude la valvola di scarico e si apre quella di aspirazione: il pistone inizia la sua corsa verso il PMI e questo movimento provoca una depressione che richiama aria dall'esterno provocando il riempimento del cilindro con la *miscela* dando luogo alla *corsa di aspirazione*, che termina quando il pistone è giunto al PMI, ovvero al punto (B) (fig. 4).

Si noti, osservando la figura (1) che l'iniettore inserisce il combustibile *nel collettore di aspirazione e non nel cilindro*: nel ciclo Otto l'iniezione è esterna al cilindro e per questo motivo l'aria che entra portando con sé i vapori di benzina viene detta miscela; se ogni cilindro ha un suo iniettore il motore è detto *ad iniezione multipoint* se l'iniettore è unico viene detta *iniezione singlepoint*.²

² Prima della diffusione dell'iniezione (nella seconda metà degli anni '80), favorita dall'evoluzione tecnologica elettronica, veniva utilizzato un dispositivo detto "carburatore"; il carburatore, che è un dispositivo meccanico, ora è in disuso, utilizzato esclusivamente per piccoli motori, non soggetti alle norme antinquinamento.

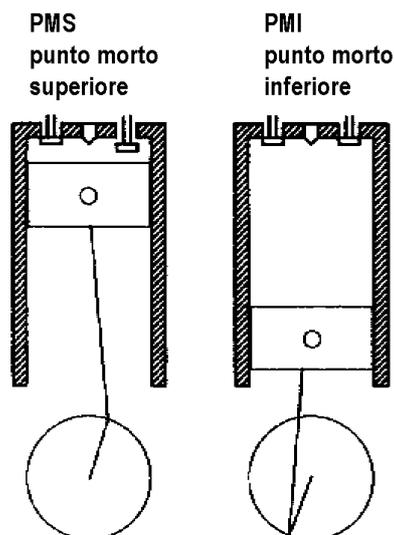


Figura 5: Posizione PMS e PMI

Nel punto (B) si ha la contemporanea chiusura della valvola di aspirazione e il cambio di direzione del pistone che ripercorre il cilindro indirizzato verso il PMS: questo movimento prende il nome di *corsa di compressione* perché, essendo chiuse le valvole, il pistone comprime la miscela e ne aumenta sia la pressione che la temperatura in misura chiaramente dipendente dalla lunghezza della corsa stessa; quando il pistone è arrivato nel PMS ovvero al punto (C) tra la coppia di elettrodi presenti nella candela scocca una scintilla che provoca la combustione: questo fenomeno è estremamente veloce e cioè si compie in un tempo così ridotto da rendere trascurabile lo spostamento che il pistone subisce nello stesso tempo ed è per questo motivo (cioè la enorme differenza fra la velocità della combustione e quella del pistone) a far sì che tale trasformazione possa essere definita *combustione a volume costante* ed infatti i punti (C) e (D) sono caratterizzati dallo stesso volume.

La combustione avvenuta tra i punti (C) e (D) provoca un violento aumento della pressione e della temperatura all'interno del fluido, rappresentativo di un forte aumento dell'energia della miscela che costituisce la sorgente calda del ciclo: come si è avuto modo di osservare non è necessario trasferire il calore dalla sorgente al fluido perché questo è già nel fluido.

La pressione generata dalla combustione spinge il pistone nuovamente dal PMS al PMI cioè dal punto (D) al punto (E), in quella che è detta *corsa di espansione*, che viene interrotta nel punto (E) dall'apertura della valvola di scarico: l'apertura della valvola provoca un brusco crollo della pressione nel cilindro che si porta al livello della pressione atmosferica in un tempo così breve da non permettere, in analogia con quanto visto per la combustione, un sensibile spostamento del pistone; la trasformazione tra (E) ed (F) è lo scarico a *volume costante*.

Il pistone, a questo punto, inizia nuovamente la sua corsa verso il PMS fino a ritornare al punto (A): durante questa corsa, detta *corsa di scarico*, il moto dello stantuffo obbliga i gas combusti (che si trovano alla pressione atmosferica) ad uscire dal cilindro passando attraverso la valvola di scarico che rimane aperta fino al punto (A), quando il ciclo ricomincia.

Si sottolineano alcune caratteristiche peculiari del ciclo:

- nel ciclo Otto appena descritto il combustibile viene mescolato al comburente *prima* dell'ingresso nel cilindro; questa operazione veniva fatta tramite un dispositivo noto come *carburatore* che è stato sostituito negli anni '90 con *l'iniettore*: anche l'iniettore, però, agisce *a monte* del cilindro
- la combustione avviene nel momento in cui tra i due elettrodi della candela scocca la scintilla: il dispositivo che controlla il momento di *lancio della scintilla* viene detto *accensione* che nel passato veniva ottenuto tramite sistemi elettromeccanici mentre oggi

vengono utilizzati sistemi elettronici; la combustione avviene in un momento preciso deciso dal costruttore e per questo motivo i motori a ciclo otto vengono anche detti *ad accensione comandata*

- il combustibile utilizzato deve in primo luogo miscelarsi con l'aria in modo ottimale ed in secondo luogo deve bruciare in modo estremamente rapido per garantire la sostanziale costanza del volume durante la combustione; combustibili con queste caratteristiche sono i primi risultati della distillazione del petrolio e vengono detti *benzine*: per questo motivo i motori a ciclo otto sono generalmente detti *motori a benzina*. Per via delle loro particolari caratteristiche, la produzione delle benzine è piuttosto complessa e rappresenta esclusivamente una aliquota del prodotto della distillazione del petrolio e per questo motivo ha un costo generalmente elevato
- durante l'esecuzione del ciclo il pistone percorre quattro volte lo spazio tra il PMS ed il PMI: una prima volta tra il punto (A) ed il (B), una ulteriore, in senso opposto tra (B) e (D), nuovamente tra (D) ed (F) ed infine tra (F) ed (A); per questo motivo il motore viene detto a *quattro tempi*, indicando le quattro corse dello stantuffo necessarie per compiere un ciclo; bisogna notare, inoltre, che mentre lo stantuffo percorre le quattro corse necessarie l'albero motore esegue due rotazioni complete

Il motore è schematicamente composto da un certo numero di parti: in primo luogo *l'incastellatura* (figura (6)) ovvero la struttura fissa che sorregge tutte le parti mobili del motore e che è composta da più parti unite insieme tramite saldatura o collegamenti rimovibili (per esempio perni prigionieri);

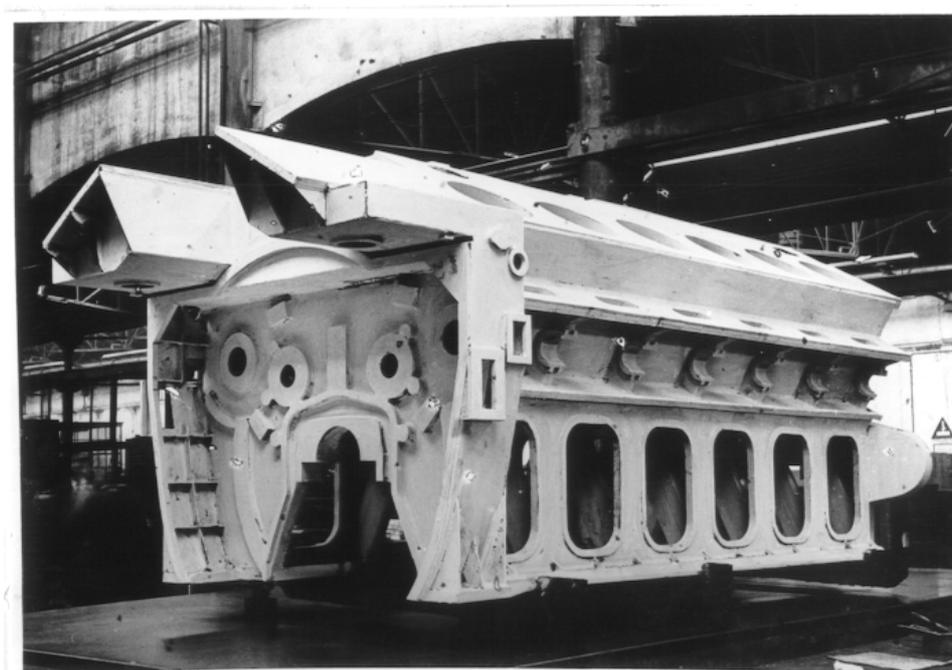


Figura 6: Incastellatura di un motore navale

nei piccoli motori, ad esempio quelli automobilistici, l'incastellatura viene realizzata in un unico pezzo per fusione e prende il nome di *monoblocco*; all'interno dell'incastellatura o del monoblocco sono realizzati i cilindri nei quali vengono inserite le *camicie* ovvero la struttura nella quale scorre il pistone: poiché il fluido non deve "scavalcare" il pistone, tra la camicia e quest'ultimo vi deve essere una tolleranza molto fine e quindi si preferisce lavorare la camicia invece del monoblocco o dell'incastellatura. Inoltre, allo scopo di mantenere il più costante possibile la temperatura della camicia, tra questa e l'incastellatura sono realizzate delle camere nelle quali scorre l'acqua di refrigerazione.

Il pistone è corredato da un certo numero di *fasce elastiche* o *fasce*, anelli di materiale pregiato il cui scopo è quello di garantire la tenuta tra il pistone e la camicia senza però usurare quest'ultima:

chiaramente poiché comunque vi è uno scorrimento, una certo fenomeno di usura si ha e quindi questo componente deve essere sostituito più volte durante la vita del motore (figura (7)).

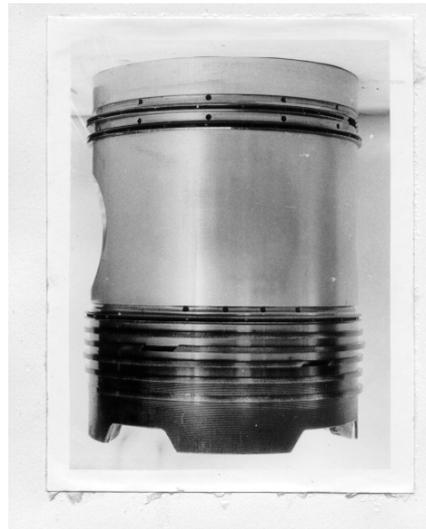


Figura 7: Pistone con fasce elastiche

Il pistone, come si è visto, è collegato ad un'asta detta *biella*, che a sua volta è collegata sull'*albero a gomiti*, ovvero l'albero motore, che con la sua particolare forma permette la conversione del moto da alternativo a rotativo;

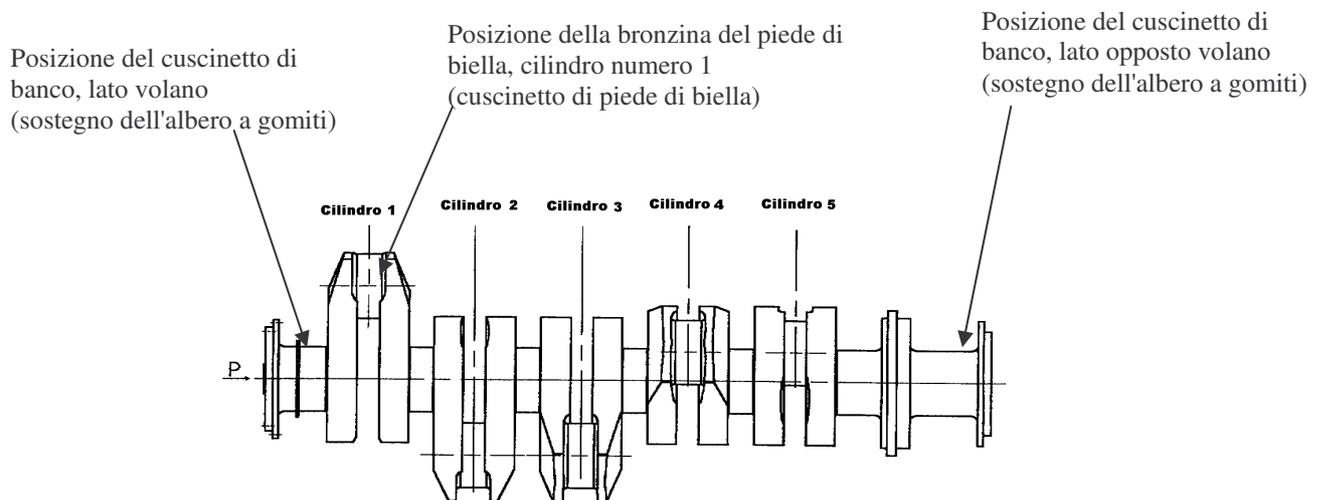


Figura 8 Albero a gomiti con posizione dei cuscinetti di banco e bronzine

la biella è corredata da due cuscinetti detti *della testa di biella* e *del piede di biella*: quello della testa è posto nell'accoppiamento con il pistone, quello del piede nell'accoppiamento con l'asse ed alle volte è detto *bronzina*; inoltre l'asse è sorretto e mantenuto in posizione da altri cuscinetti, detti *cuscinetti di banco*, come si evidenzia nella figura (8).

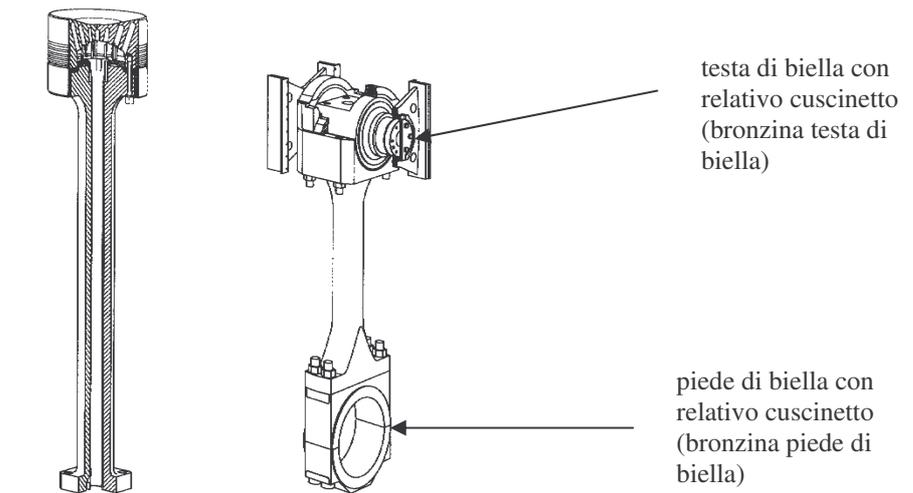


Figura 9: Pistone e biella

Lo scopo dei cuscinetti è quello di consentire il moto relativo dei vari componenti sviluppando il minimo attrito possibile: ciò è ottenuto ricorrendo a fluidi lubrificanti (l'olio) ed a materiali detti *antifrizione* ovvero realizzati in modo da avere il minore attrito possibile; nel passato veniva usato il bronzo antifrizione³ mentre attualmente si utilizzano apposite *leghe antifrizione*, conosciute anche come *metallo bianco* o *metallo rosa*, per il tipico colore della fusione; un'altra importante caratteristica dei cuscinetti è quella di avere un punto di fusione notevolmente più basso di quello degli elementi con cui lavorano in modo da cedere prima di danneggiare il pezzo che servono in caso di funzionamento anormale: chiaramente è più semplice ed economico sostituire dei cuscinetti di banco rispetto all'intero asse del motore; la figura (9) evidenzia la posizione delle bronzine di testa e piede di biella.

La parte superiore del cilindro è chiusa dalla *testata* o *testa*, sulla quale sono posizionate le *valvole* che permettono alternativamente l'ingresso della miscela e l'uscita dei gas esausti; le valvole costituiscono una "*strozzatura*" per il moto del fluido e quindi una certa perdita: a questo scopo si cerca di aumentare la sezione di passaggio aumentando il numero delle valvole sempre che le dimensioni della testata lo consentano: attualmente la maggior parte dei motori a benzina utilizzano due valvole per cilindro, lasciando ad applicazioni più spinte (e costose) l'uso di tre, quattro ed anche cinque valvole; nei motori marini diesel l'utilizzo di quattro valvole per cilindro è lo standard.

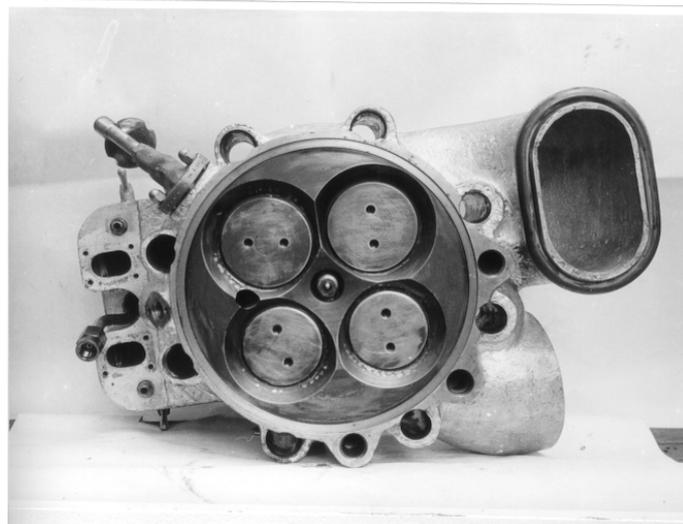


Figura 10: Testata con 4 valvole

³ Da cui il nome "bronzine"

Da rilevare che in un motore a quattro tempi la valvola di aspirazione rimane aperta dal punto (A) al punto (B) e quella di scarico dal punto (E) ad (A) ovvero ogni due giri dell'albero motore si aprirà una volta la valvola di aspirazione ed una quella di scarico; poiché il momento dell'apertura delle valvole è rigidamente collegato alla posizione del pistone e quindi a quella dell'albero motore, da quest'ultimo prende il moto un apposito *albero a camme* che, ruotano a metà del numero di giri dell'asse motore, comanda l'apertura e la chiusura delle valvole.

La figura (11) mostra l'azione delle camme sulle valvole: poiché le camme sono poste nella testata vengono chiamate *camme in testa*.

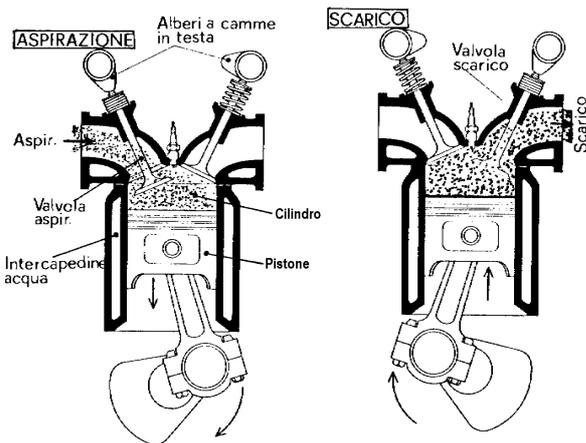


Figura 11: Distribuzione tramite camme (in testa)



Fig 12: Valvole con molle, dischi e coni

Le camme possono essere anche poste in posizione diversa, ad esempio nell'incastellatura, ed esse azionano le valvole mediante delle aste chiamate *punterie*; se il motore, come sempre accade nei

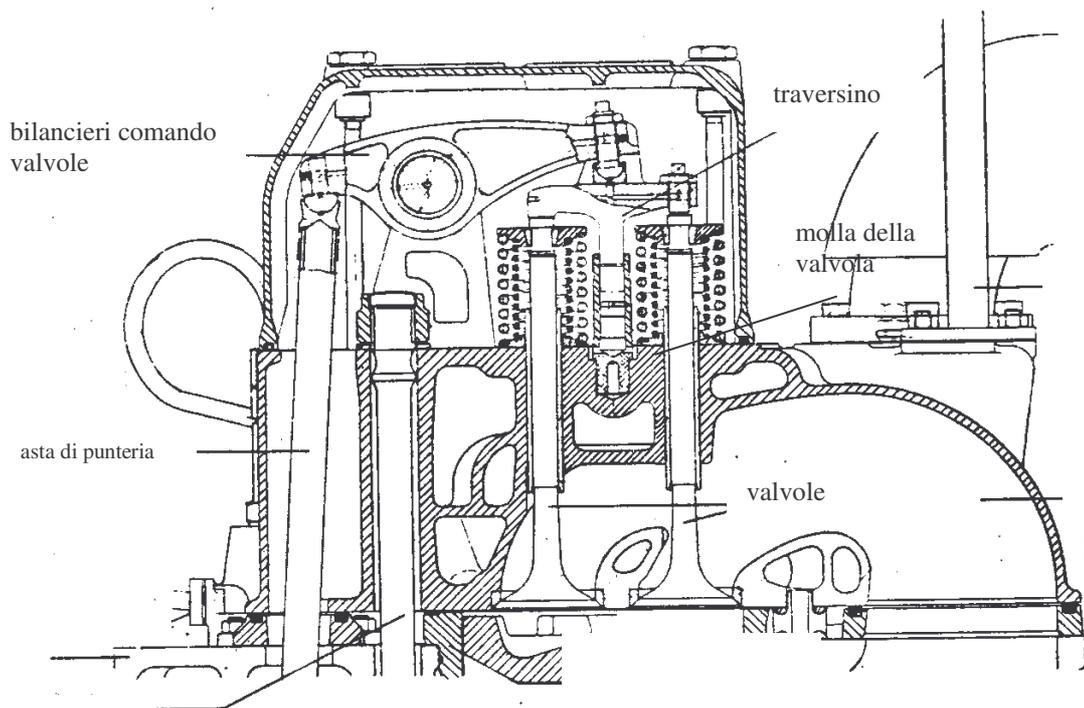
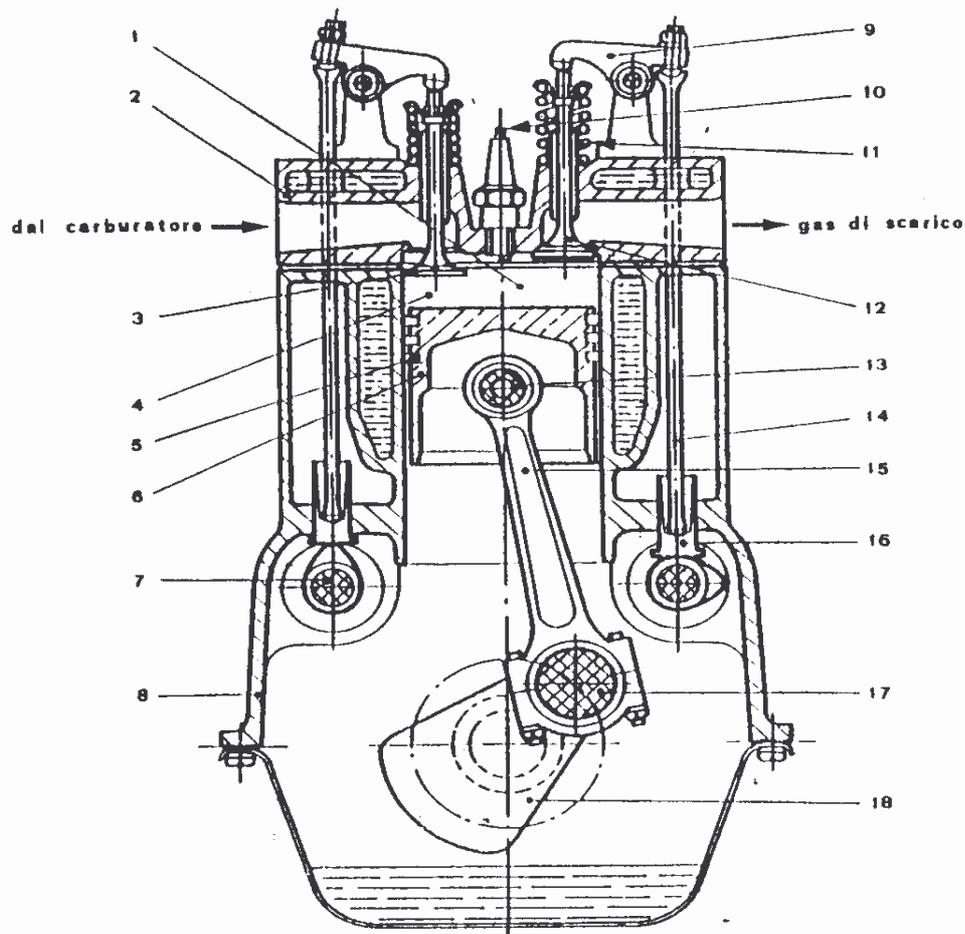


Figura 13: Distribuzione tramite camme, asta di punteria, forcilla e cavallotto

motori diesel navali, ha quattro valvole, le punterie agiscono su una leva (detta *bilanciere o forcella*) ed un *traversino* (detto anche *cavallotto*) che le apre contemporaneamente (figura(13)).

La valvola, dalla particolare forma ad imbuto rovesciato, come si può notare nella figura (12), è normalmente mantenuta chiusa da una molla che impone il contatto fra l'otturatore ed il seggio ; la camma, dall'apposito profilo, impone l'apertura della valvola caricando la molla: in normale funzionamento la camma ed il gambo della valvola devono essere sempre a contatto, allo scopo di evitare urti e rotture sul gambo e per questo motivo si provvede alla *registrazione* delle valvole; l'operazione di registrazione è estremamente importante e deve essere fatta regolarmente, pena la rottura improvvisa di valvole, aste, bilancieri e traversini.

Sulla testata è ricavato l'innesto della candela che sporge nel cilindro ed è collegata al circuito di accensione.



- | | |
|-------------------------------|------------------------|
| 1. Camera di combustione | 10. Candela |
| 2. Testa | 11. Molla |
| 3. Valvola di aspirazione | 12. Valvola di scarico |
| 4. Cilindro | 13. Perno |
| 5. Fascie elastiche | 14. Asta |
| 6. Stantuffo | 15. Biella |
| 7. Albero della distribuzione | 16. Punteria |
| 8. Basamento | 17. Albero a gomiti |
| 9. Bilanciere | 18. Manovella |

Figura 14: Riepilogo nomenclatura motore

La figura (13) riepiloga i principali elementi del motore riferendosi ad un motore a benzina, quattro tempi, ciclo Otto: si consideri però che molti di questi elementi sono identici nel motore diesel.

Quando il pistone si trova al PMS il volume presente nel cilindro è detto *volume della camera di combustione* e viene indicato con V_{CC} , mentre quando si trova al PMI è detto *volume totale* (V_T); il rapporto tra questi due volumi è detto *rapporto volumetrico di compressione* e si indica con ρ , da cui:

$$\rho = V_T/V_{CC} \quad \text{poiché } V_T > V_{CC} \quad \text{allora } \rho > 1$$

Il rapporto di compressione ha una importanza cruciale nei motori perché si può dimostrare che il rendimento $\eta_{th} = f(\rho)$ e maggiore è ρ , maggiore è η_{th} e quindi a parità di potenza prodotta il motore con rendimento maggiore avrà consumo specifico *minore*.

La differenza fra il V_T e V_{CC} è detta *cilindrata*: anche la cilindrata è un parametro molto importante perché si può dimostrare che la potenza prodotta è direttamente proporzionale alla cilindrata del motore (a parità di numero di giri); se il motore è *pluricilindrico o plurifrazionato* ovvero se ha un numero di cilindri maggiore di uno, come sempre accade per i motori ad eccezione di quelli di potenza limitata, con cilindrata si intende la somma delle cilindrata di ogni singolo cilindro ovvero la *cilindrata totale*; si faccia riferimento alla figura (15).

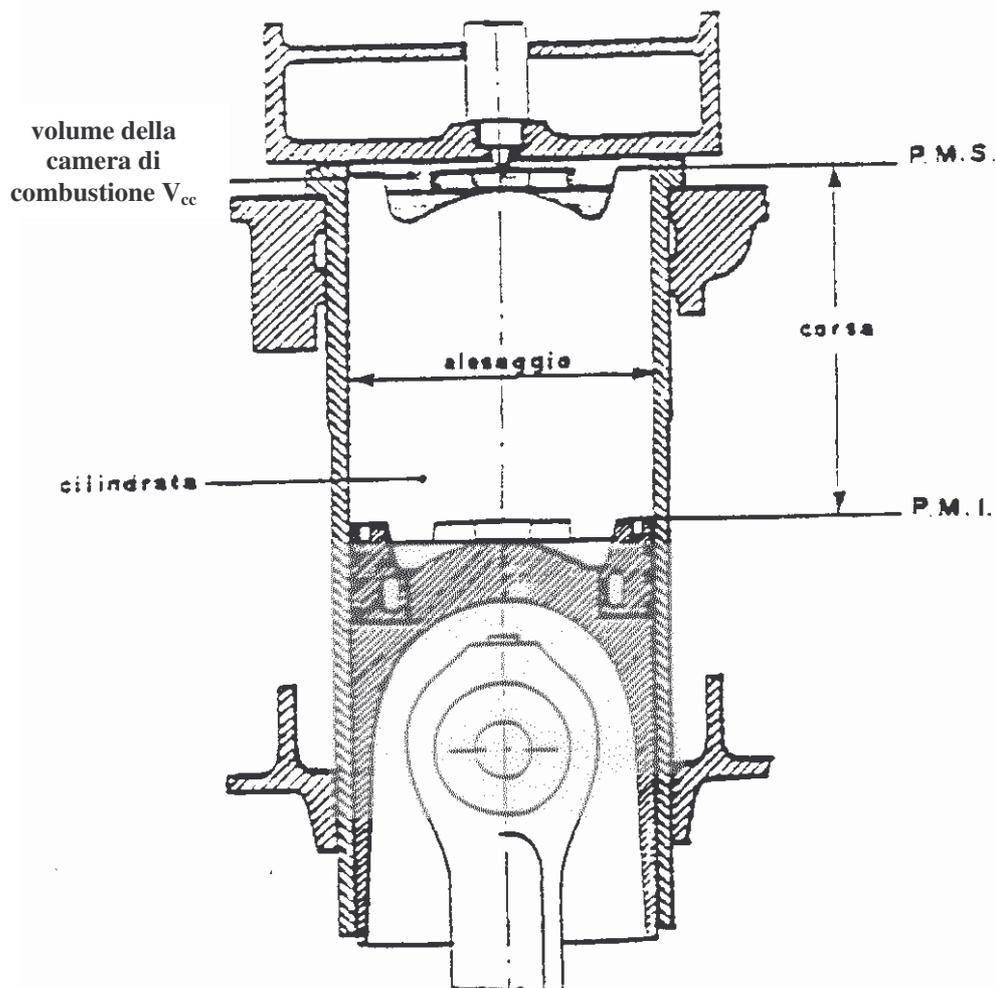


Figura 15: Elementi geometrici di un motore

Si può osservare che la cilindrata è il volume percorso dal pistone durante il suo passaggio dal PMS al PMI e viceversa: essa è quindi anche eguale all'area del pistone per la distanza fra i due punti morti: tale distanza è indicata come *corsa*, mentre l'area del pistone viene calcolata come $(D/2)^2 \cdot \pi$, ove D è il diametro del pistone che viene anche chiamato *alesaggio*; mentre per i motori a benzina generalmente si parla di rapporto di compressione ρ e cilindrata (espressa in cm^3), per i motori più grandi (come vedremo nei diesel) si preferisce usare il rapporto di compressione, l'alesaggio e la corsa, per il semplice motivo che le cilindrata sarebbero enormi.

In questo tipo di motore il consumo è strettamente legato al rapporto di compressione ρ : a parità di potenza erogata, infatti, il motore con ρ maggiore consumerà di meno; si potrebbe pensare allora di aumentare ρ allo scopo di pervenire al rendimento maggiore e quindi al minimo consumo, ma ciò non è possibile a causa del meccanismo stesso con cui è stato concepito il motore.

Durante la fase di compressione il pistone comprime la miscela e, causa la velocità del processo, non solo aumenta la pressione ma anche la temperatura: sia la pressione P che la temperatura T di fine compressione dipendono dal rapporto ρ e quindi aumentando questo aumenteranno sia l'una che l'altra; d'altro canto la benzina, come tutti i combustibili, ha una sua *temperatura di autoaccensione*, ovvero una temperatura oltre la quale la combustione inizia spontaneamente, senza la necessità di un intervento esterno: nel caso del motore ciclo otto la combustione deve verificarsi esattamente nel punto (C), punto che rappresenta il momento di lancio della scintilla e non deve verificarsi in anticipo ovvero spontaneamente.

Questa situazione di autoaccensione è particolarmente critica per il motore: in primo luogo la potenza erogabile diminuisce fortemente sia perché *non viene sfruttata tutta la cilindrata a disposizione del motore*, sia perché, avvenendo la combustione prima che il pistone raggiunga il PMS, la stessa pressione si oppone alla "salita" dello stantuffo, provocando una fortissima perdita; inoltre il motore è progettato per funzionare secondo un certo ciclo e questo comporta un aumento degli urti che, oltre a produrre il tipico rumore vibratorio detto *battito in testa*, possono comportare la rottura di elementi meccanici.

Per tali motivi il rapporto di compressione dei motori a benzina è limitato e tale limite è la temperatura di autoaccensione del combustibile utilizzato⁴: per esprimere il comportamento di una benzina essa viene confrontata con una miscela di n-ottano, un idrocarburo particolarmente stabile, e si indica con il valore percentuale di n-ottano della miscela di eguale comportamento; questa percentuale è anche detta *numero di ottano*. Per aumentare la temperatura di autoaccensione di una benzina si possono utilizzare degli stabilizzanti che quindi ne aumentano il numero di ottano (in tempi passati veniva usato il piombo tetraetile) in ogni caso si comprende come, a meno di non voler ricorrere a benzine estremamente particolari e prodotte apposta, il rapporto di compressione ρ del motore a benzina è sostanzialmente limitato superiormente (generalmente non si superano 10-11)

CICLO DIESEL

Storicamente posteriore al ciclo otto, il ciclo diesel rappresenta la macchina alternativa per eccellenza e, sebbene costruttivamente assomigli molto al motore benzina, non di meno è basato su un principio di funzionamento completamente diverso che ne ha decretato il successo rispetto al motore a benzina; sebbene questa affermazione possa sembrare azzardata, soprattutto se si considera solamente un particolare tipo di realizzazione (il campo automobilistico, nel particolare), si deve tener presente che il ciclo otto viene realizzato solo per tale mercato e per mercati di nicchia del aeronautici (motori a benzina per piccoli aerei od elicotteri) mentre in ogni altro campo, dalla propulsione ferroviaria, trasporto terrestre e impianti navali alla produzione di energia elettrica il predominio del diesel è assoluto; inoltre i punti di autoaccensione e di infiammabilità del gasolio

⁴ Se il motore è ben progettato non vi dovrebbero essere problemi di autoaccensione, a meno che non si cambino le caratteristiche del combustibile; un caso recente è stata la fine della produzione di benzina "rossa" che ha condannato a dismissione molti motori progettati per funzionare con questa (n ottano 98 contro 96 della verde).

sono notevolmente più alti di quelli della benzina e quindi la conservazione a bordo del combustibile comporta problemi notevolmente minori dal punto di vista della sicurezza antincendio.

Il diesel viene realizzato con uno schema molto simile al motore ciclo otto: anche in questo caso un pistone scorre all'interno di un cilindro dotato di apposita camicia e chiuso da una testata nella quale sono ricavate le valvole mentre è assente la candela ed al posto di quella vi è un dispositivo chiamato "*iniettore*" il cui scopo è quello di inserire il combustibile all'interno del cilindro; queste differenze macroscopiche si spiegano se si analizzano le trasformazioni del ciclo, comparandole con quelle del ciclo Otto (figura (16)):

- una corsa di aspirazione (tratto A-B)
- una compressione adiabatica (tratto B-C)
- una combustione a pressione costante (a differenza dal ciclo otto ove la combustione è a volume costante); (tratto C-D)
- una espansione adiabatica (tratto D-E)
- uno scarico a volume costante (tratto E-B)
- una corsa di scarico (tratto B-A)

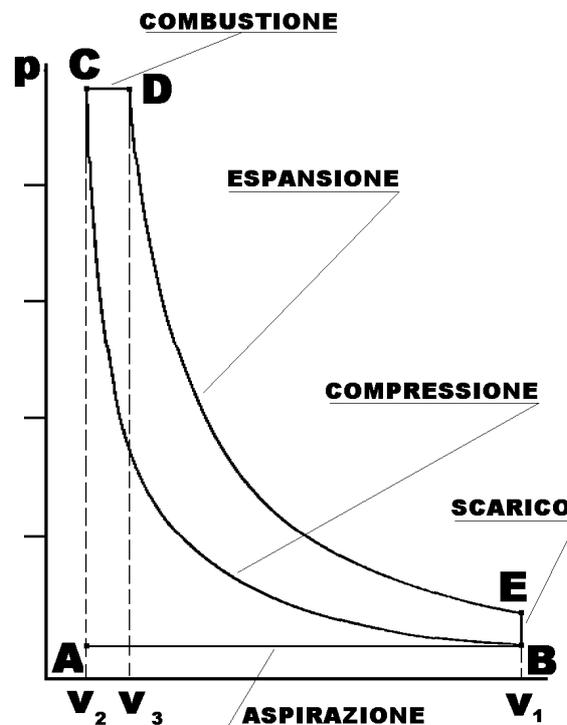


Figura 16: Ciclo termodinamico diesel

l'unica differenza, la cui importanza va molto oltre ciò che può essere una pura sensazione, risiede nel diverso tipo di combustione: essa avviene tra i punti (C) e (D), mentre il pistone ha già iniziato il suo movimento discendente dal PMS al PMI; infatti si considera che il combustibile bruci in un tempo relativamente prolungato tale da permettere un sensibile spostamento del pistone e questo spostamento compensa l'aumento di volume dovuto alla combustione, stabilizzando la pressione.

Se si analizza nel dettaglio il ciclo diesel si nota come tra i punti (A) e (B), durante il movimento del pistone dal PMS al PMI si compia la corsa di aspirazione, mentre dal punto (B) al (C) si ha la corsa di compressione e dal punto (C) al (D) si ha la combustione che, come si è detto si realizza durante il movimento dello stantuffo dal PMS al PMI; ma come si innesca la combustione se, come si è visto, questo tipo di motore non prevede l'uso della candela?

Durante la corsa di compressione, per le ragioni esposte nel ciclo otto, la pressione e la temperatura aumentano, e tale aumento è dipendente dal ρ rapporto volumetrico di compressione: analogamente a quanto detto per le benzine, anche il combustibile dei diesel ha una sua temperatura di

autoaccensione per cui, aumentando adeguatamente il rapporto ρ , è possibile che l'aria presente al termine della compressione nel cilindro abbia una temperatura tale da far sì che il combustibile bruci "spontaneamente" ovvero in modo indipendente da una causa esterna.

Per questo motivo i motori a ciclo diesel sono detti ad *accensione spontanea* perché l'accensione si realizza non mediante un intervento esterno, ma grazie alla temperatura dell'aria compressa dal pistone al PMS; in pratica il motore diesel utilizza come sistema di innesco proprio ciò che rappresenta il limite maggiore del motore a ciclo Otto.

Le peculiarità distintive del ciclo diesel possono essere così riassunte:

- il combustibile viene mescolato al comburente *all'interno del cilindro*, quando l'aria presente ha raggiunto condizioni di stato tali da permetterne l'accensione; il sistema di accensione presente nei cicli otto non esiste nei cicli diesel, nel quale l'iniezione però avviene all'interno del cilindro tramite *l'iniettore*; la pressione di iniezione è molto più elevata perché la pressione è molto alta.
- la combustione avviene spontaneamente quando il combustibile viene immesso all'interno del cilindro ed ha una durata relativamente prolungata: il combustibile utilizzato in tale tipo di motore ha delle caratteristiche inferiori rispetto alle benzine e viene denominato *gasolio*⁵ e quindi ha un tempo di combustione sensibilmente più elevato.

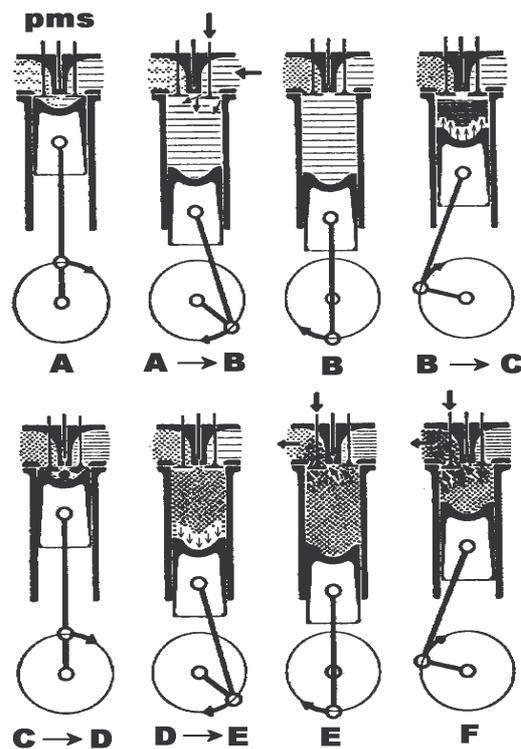


Figura 17: Fasi caratteristiche del ciclo Diesel (si faccia riferimento alla fig. (16))

- il ciclo diesel si basa proprio sull'autoaccensione che, nel ciclo otto, rappresenta invece un problema molto severo: date le sue caratteristiche meno raffinate il gasolio è non solo più facile da produrre ed in quantità maggiori rispetto alle benzine, ma anche notevolmente più

⁵ Nella fraseologia comune il gasolio viene anche chiamato diesel o nafta (quest'ultimo termine generalmente viene riservato a gasoli di scarsa qualità); in realtà, da un punto di vista chimico, mentre il termine diesel rappresenta una errata trasposizione del nome dell'inventore del ciclo al combustibile utilizzato, il termine nafta indica il primo prodotto della distillazione del petrolio, prodotto estremamente pregiato e costoso, da cui il termine nafta, per quanto molto utilizzato è errato.

economico; inoltre avendo una temperatura di autoaccensione considerevolmente più elevata non solo permette rapporti di compressione più elevati, ma ne ha necessità per realizzarsi. Infatti se il ciclo otto non permette rapporti di compressione $\rho > 10-11$, il ciclo diesel non permette rapporti $\rho < 8$, ma contestualmente può arrivare fino a $\rho = 15-16$.

- l'elevato ρ comporta pressioni maggiori e quindi spessori maggiori: per ciò il motore diesel a parità di potenza è più pesante e meno brillante (la variazione di regime di rotazione richiede più tempo, ovvero è meno "scattoso")
 - come nel motore Otto il consumo dipende molto da ρ rapporto geometrico di compressione: per questo motivo a parità di potenza il motore diesel consuma di meno
- Infatti anche per il ciclo diesel esiste una relazione molto stretta fra rendimento termodinamico e rapporto di compressione ρ , come nel caso del ciclo otto, sebbene non eguali: a parità di ρ il ciclo otto ha un rendimento superiore al ciclo diesel, ma per sua costruzione il rapporto di compressione volumetrico del ciclo diesel è generalmente molto superiore a quello del ciclo otto; diretta conseguenza di ciò è che generalmente i motori diesel vengono realizzati con elevati ρ , hanno corse molto superiori ai motori a benzina e quindi possono realizzare potenze anche elevate con un numero di cilindri relativamente basso.

Da un punto di vista strutturale il motore diesel è molto simile al motore a benzina, con la sua incastellatura, camicia, pistone guarnito con fasce, valvole ed albero della distribuzione, albero motore a gomiti su cui sono intestate le bielle guarnite con cuscinetti il tutto sorretto dai cuscinetti banco e completato con un volano; generalmente poiché le potenze richieste a tali motori sono elevate, anche le dimensioni dei cilindri sono considerevolmente diverse rispetto ai motori ciclo otto, e di conseguenza tutti gli altri componenti. Per via delle maggiori dimensioni, la soluzione dei cilindri plurivalvole è stata adottata prima nei motori diesel ed infatti i motori industriali hanno normalmente quattro valvole per cilindro.

La maggiore diversità strutturale tra le due macchine è sostanzialmente il circuito di iniezione: non solo il punto di immissione è diverso (prima del cilindro per la benzina e nel cilindro per il gasolio), ma anche le pressioni a cui bisogna iniettare il combustibile sono molto diverse; infatti affinché si abbia una buona combustione, ovvero la reazione tra il comburente ed il combustibile generi la maggior quantità di calore possibile, il combustibile stesso deve essere mescolato molto bene con l'aria.

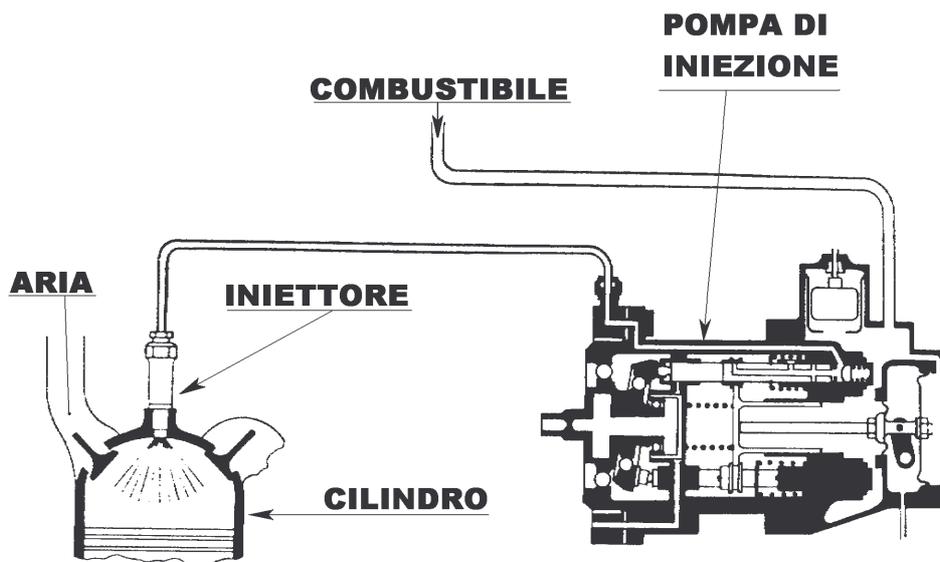


Figura 18: Circuito di iniezione con pompa Bosch per motore Diesel

La pressione di iniezione nel motore diesel è notevolmente più alta rispetto a quella del motore a benzina per motivi che possono essere così delineati:

- necessità di iniettare nel cilindro a pressioni molto elevate (anche 30 bar contro 1 bar del motore a benzina)
- necessità di una migliore polverizzazione, che richiede iniettori sostanzialmente diversi perché devono lavorare a pressioni più elevate

Per i motori diesel si sono diffuse alcune soluzioni:

- iniezione in precamera a bassa pressione (soluzione tipicamente automobilistica)
- iniezione diretta con pompa di iniezione unica per tutti i cilindri (pompa tipo *bosh*, iniezione a media pressione, per diesel di media potenza, generazione elettrica e trazione ferroviaria, con circuito come raffigurato in fig (18))
- iniezione diretta con iniettore pompa (per iniezione alta pressione, tipica di elevate potenze e della propulsione navale, come raffigurato nella fig (19))
- iniezione da collettore pressurizzato attraverso valvola di mandata all'iniettore elettrocomandata (tipo *common-rail*, che si inizia a diffondere su tutte le tipologie di diesel)

L'iniezione tipo *common-rail* è la trasposizione nel campo del diesel dell'iniezione della benzina: a causa delle elevatissime pressioni il concetto, già ben conosciuto, ha dovuto attendere per essere applicato la maturità tecnologica dei materiali con i quali vengono realizzati i componenti meccanici.

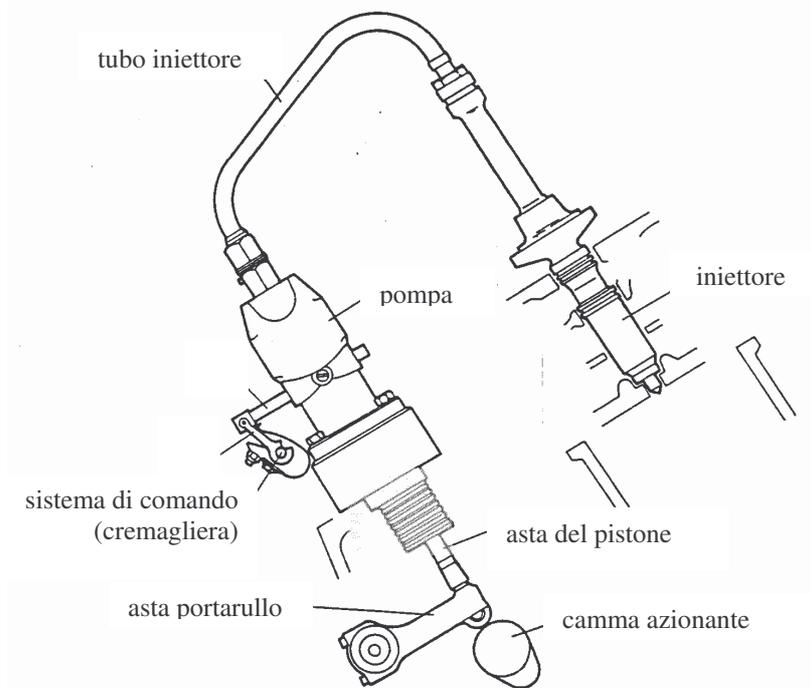


Figura 19: Sistema pompa-iniettore GMT

Il comando dell'iniezione, comunque essa sia realizzata, è affidato ad un apparato estremamente complesso chiamato *autoregolatore*: l'autoregolatore è un sistema che traduce i dati di potenza richiesta che arrivano dal *sistema di telecomando del motore* e lo traduce in un segnale di iniezione: in pratica dosa il carburante al motore in funzione della potenza richiesta; l'autoregolatore, però, provvede anche a mantenere il motore al numero di giri impostato al variare delle condizioni esterne (come colpi di mare o sventate) facendo sì che il motore sia in grado di fornire la potenza richiesta da un evento transitorio, occasionale ed imprevedibile senza l'intervento dell'operatore.

CLASSIFICAZIONE DEI DIESEL

A differenza dei motori a benzina che sostanzialmente sono eguali, esiste una considerevole varietà di motori diesel con caratteristiche di coppia, potenza e numero di giri massimi molto diversi, che variano dai piccoli motori automobilistici fino ai due tempi lenti per la propulsione navale.

A seconda della *qualità* del gasolio utilizzato si hanno motori diesel di dimensioni via via crescenti: se la qualità del gasolio è elevata si utilizzano rapporti di compressione contenuti e regimi di rotazione elevati, mentre se le qualità del gasolio sono peggiori i rapporti di compressione saranno maggiori e minore la velocità di rotazione; chiaramente aumentare i rapporti di compressione vuole dire aumentare le dimensioni del motore.

Iniziando dai motori per autotrazione che sono detti *superveloci* il cui massimo regime di rotazione va dai 3000 - 4000 rpm, e che utilizzano un gasolio particolarmente pregiato, si hanno poi i motori diesel *veloci* dagli 800 ai 1800 rpm, i motori diesel *semiveloci* dai 400 ai 800 rpm ed i motori diesel *lenti* dai 90 ai 200 rpm; mentre le prime tre categorie sono generalmente costituite da motori a quattro tempi, l'ultima, per una combinazione di grandi dimensioni e particolare lentezza del ciclo, è fondamentalmente costituita da motori due tempi che vengono chiamati *diesel lenti due tempi*.

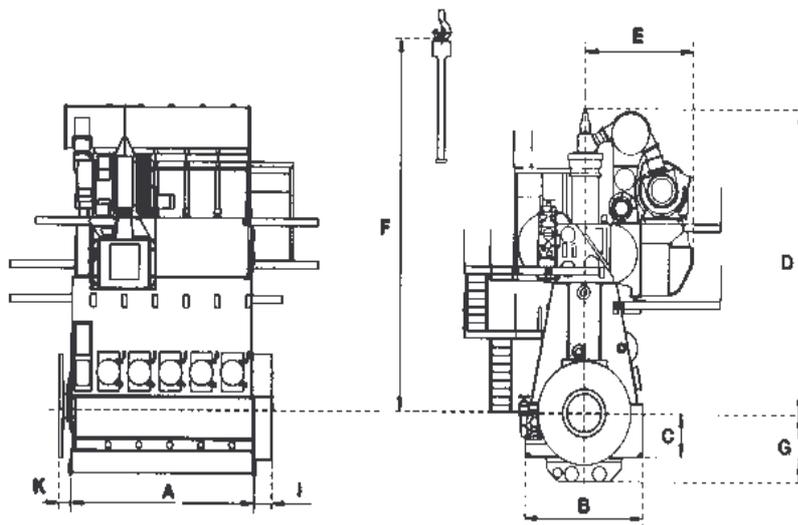


Fig 20: Motore diesel lento due tempi SULZER RTA84C

Il motore diesel lento due tempi SULZER RTA84C è il classico esempio della categoria: motore a due tempi, arrangiamento in linea, fornibile con un numero di cilindri che può variare da 6 a 12; alesaggio 0,84 m, corsa 2,4 m; potenza massima da 24300 kW a 6 cilindri a 48600 kW a 12 cilindri a 102 giri/min.
 Altezza (D + G) : 13,52 m
 Larghezza base (B): 4,32 m
 Larghezza cielo (E) : 4,75 m
 Lunghezza (A): da 11,08 a 21,68m
 Peso: da 850 a 1570 t

Le dimensioni delle macchine crescono in modo molto marcato passando dai diesel per autotrazione a quelli lenti: non solo, infatti, è necessario un rapporto di compressione più elevato e quindi corse più lunghe per giungere a temperature che permettano l'autoaccensione di combustibili di scarsa qualità, ma anche le pressioni in gioco sono molto marcate, da cui le stesse componenti dovranno avere spessori e quindi pesi maggiori per sopportare l'elevato carico termico e meccanico; si passa quindi dal motore diesel superveloce che può essere contenuto nel cofano di una vettura (o di un camion, o di un carro armato od ancora all'interno di una locomotiva) al motore diesel veloce, molto utilizzato per gruppi elettrogeni (soprattutto di continuità, come negli ospedali negli aeroporti e nelle centrali nucleari), per trazione ferroviaria e propulsione navale, soprattutto militare, dall'ingombro verticale di circa un paio di metri, al motore semivelece, utilizzato per grandi gruppi elettrogeni, trazione ferroviaria industriale (treni merci) e propulsione navale, con ingombro verticale fino ai 4-5 metri, fino al motore 2 tempi lento a corsa superlunga, per la propulsione di traffico mercantile lento (petroliere, rinfusiere, etc) che può arrivare a 10-12 metri di altezza.

L'utilizzo di un combustibile scadente non solo comporta un basso costo di carburante ma anche un elevato rendimento dovuto al grande p necessario, il che rende il diesel lento due tempi una macchina senza rivali da un punto di vista economico, ma le grandi dimensioni ed i pesi elevati ne

vincolano l'utilizzo soprattutto nel campo militare ove peso ed ingombro sono parametri fondamentali; inoltre i bassi regimi di rotazione, che permettono un accoppiamento diretto elica-motore, non consentono lo sviluppo di quelle elevate velocità che sono necessarie alle navi militari. Alla luce delle considerazioni fatte si comprende come i diesel superveloci siano utilizzati negli impieghi terrestri, quelli veloci siano molto sfruttati per la propulsione navale militare e la generazione elettrica soprattutto su navi veloci e di dimensioni contenute, mentre i diesel semiveloci siano utilizzati per la propulsione civile e militare di navi di dimensioni maggiori ma velocità più contenute, come ad esempio LPD e rifornitori; i motori lenti hanno largo impiego nel traffico mercantile di grandi dimensioni, come petroliere e rinfusiere, ma pesi ed ingombri li rendono inutilizzabili nelle realizzazioni militari.

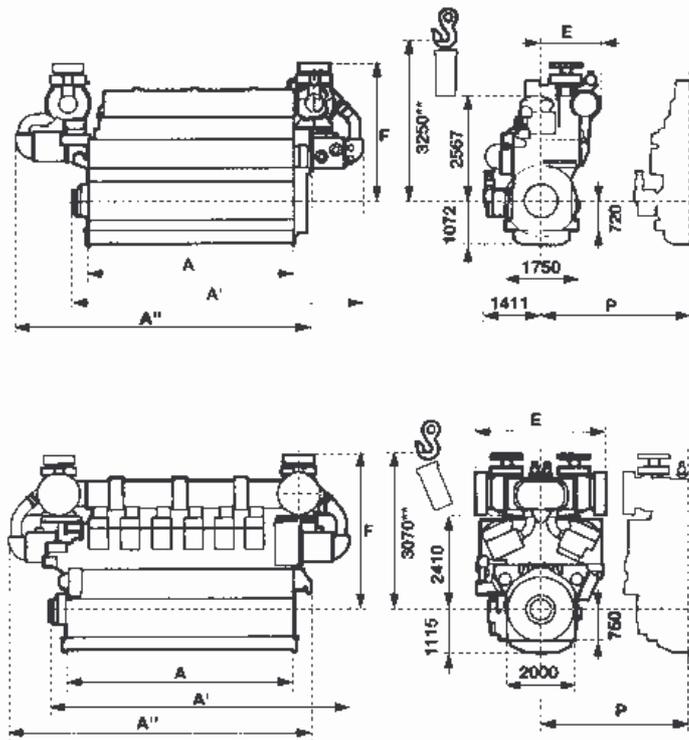


Fig 20: Motore diesel mediumspeed SULZER ZA40S

Il motore diesel medium speed quattro tempi SULZER ZA40S è il classico esempio della categoria: motore a quattro tempi, arrangemento sia in linea che a V, fornibile con un numero di cilindri che può variare da 6 a 18; alesaggio 0,4 m, corsa 0,56 m; potenza massima da 4500 kW a 6L a 13500 kW a 18V a 510 giri/min

Altezza (F) : 3,38 m 6L / 4,15 m 18V

Larghezza: 1,75 m 6L / 2,0 m 18V

Lunghezza (A''): 7,77 m 6L / 10,48 m 18V

Peso: 59 t 6L / 145 t 18V

LA SOVRALIMENTAZIONE

Fino ad ora sono stati considerati motori che aspirano aria alla pressione atmosferica: ciò comporta che la pressione di inizio compressione sia quella atmosferica mentre quella di fine compressione viene ad essere funzione del rapporto di compressione ρ ; naturalmente vi è un limite alla quantità di combustibile che può essere utilizzata all'interno del cilindro e questo limite è relativo alla quantità di *aria* presente, quantità espressa chiaramente in massa.

E' chiaro, però, che maggiore è la quantità di combustibile bruciata maggiore sarà il calore introdotto nel ciclo e quindi maggiore sarà il lavoro e la potenza erogata; si è visto nel capitolo 3 che, tanto nei motori diesel quanto in quelli a benzina, la potenza e la coppia istantanea richiesta viene ottenuta dosando la quantità di combustibile immesso nel ciclo; ovviamente è possibile bruciare una quantità di combustibile inferiore al massimo consentito, ma non è possibile bruciarne una quantità superiore, per l'ovvio motivo che il combustibile in eccesso *non trova* ossidante in grado di reagire con esso e, di conseguenza, rimane incombusto e viene semplicemente trascinato nei condotti di scarico dove, oltre a rappresentare una perdita e quindi un costo, può anche creare

seri problemi⁶; si è potuto vedere che le curve di coppia e potenza massima sono delle curve il cui parametro, ovvero la quantità di combustibile immesso, è massimo.

La *sovralimentazione* è l'insieme dei dispositivi che permettono di introdurre nel cilindro più aria e quindi di poter bruciare più carburante, ottenendo coppie e potenze maggiori; per ottenere ciò si immette nel collettore di aspirazione aria a pressione maggiore: logicamente la quantità di aria che fisicamente entra nel cilindro è più grande e permette di bruciare più carburante, ottenendo una maggiore coppia e potenza.

Il primo grande vantaggio della sovralimentazione è che motori con dimensioni quasi identiche hanno incrementi di coppia e potenza considerevoli passando dalla versione aspirata a quella sovralimentata; la sovralimentazione viene realizzata utilizzando un *compressore* che aspira l'aria dall'esterno e la manda al collettore di aspirazione rifornendo i cilindri di fluido con densità δ_s maggiore di quella δ_a che sarebbe propria del motore aspirato: a parità di volume (quello della cilindrata) a densità maggiore corrisponde quantità maggiore⁷.

La sovralimentazione produce sempre un considerevole aumento delle curve di coppia e potenza, ma influenza anche il rendimento η del motore, necessitando di maggiore carburante: il calcolo del rendimento del motore sovralimentato non è semplice e non può essere previsto a priori, dipendendo da una serie di parametri piuttosto complessi, ma generalmente rappresenta una diminuzione di rendimento per i motori a benzina, un aumento di rendimento per quelli diesel.

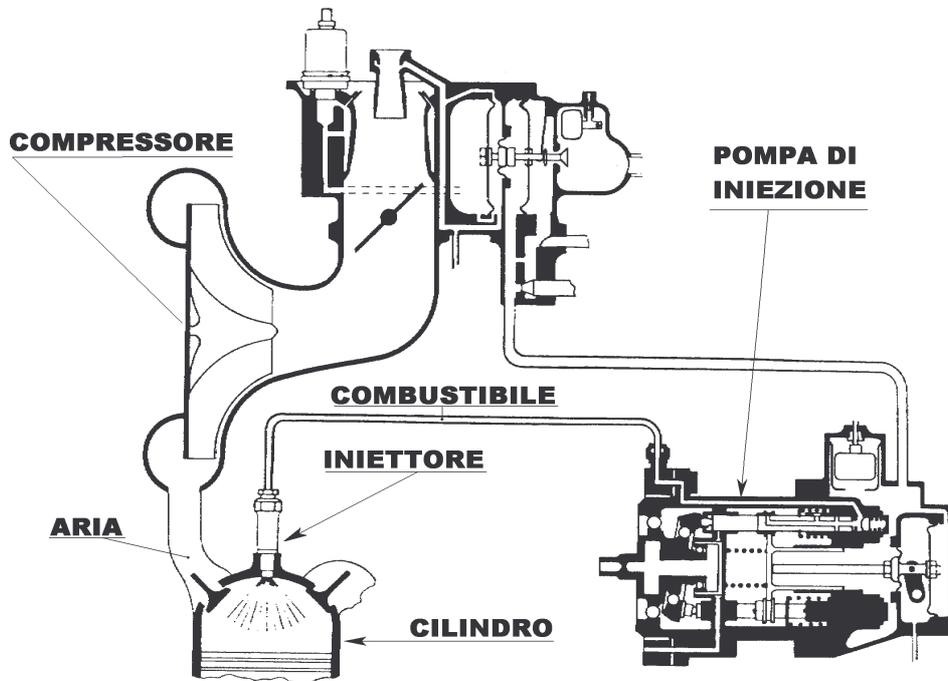


Figura 21: Schema sovralimentazione per motore diesel

Lo scopo della sovralimentazione dei motori a benzina è quello di aumentare la coppia e la potenza a basso numero di giri, in modo da avere una risposta più brillante, mentre per il motore diesel si preferisce ottimizzare l'aspetto del consumo.

L'elemento fondamentale della sovralimentazione è il *compressore* il cui scopo è quello di aumentare la pressione nel collettore di alimentazione: nella figura (21) è riportato lo schema di

⁶ Accumulandosi può provocare piccoli scoppi o piccoli incendi, e, nel caso dei grandi motori, anche incendi non piccoli nelle condotte di scarico. Questo problema si avverte molto spesso nei motorini o nei vecchi motori automobilistici "truccati"

⁷ Si consideri però che la massa e la pressione non sono direttamente proporzionali: raddoppiando la pressione non raddoppia la densità, che cresce in misura considerevolmente minore

sovralimentazione per motore diesel, ma per il motore a benzina l'unica differenza è rappresentata dalla pompa di iniezione che è assente.

La compressione dell'aria è un fenomeno che richiede una grande energia (la compressione è adiabatica nel compressore tanto quanto nel cilindro) energia che può essere fornita in modi diversi:

- prelevandola direttamente dall'asse motore. Il vantaggio di questa tecnologia è quello di avere una risposta in termini di coppia e potenza molto elevati anche a bassi giri, lo svantaggio che il rendimento del motore è fortemente penalizzato perché l'energia utilizzata per muovere il compressore è dedotta direttamente da quella prodotta dal motore stesso. Questa tecnologia è molto apprezzata sui motori automobilistici, associata a compressori volumetrici per piccole portate, ma solo su vetture di fascia alta, ove il costo di gestione è elemento non importante, come ad esempio le Mercedes Kompressor⁸

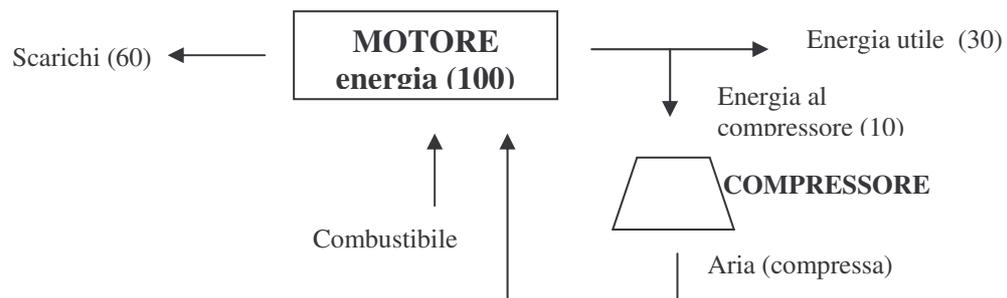


Figura 22: Schema di sovralimentazione compressore-asse

Dalla figura (22) si nota come parte della energia prodotta dal motore sia impiegata per azionare il compressore, comportando quindi una diminuzione del rendimento del motore e quindi un aumento del consumo.

- attraverso l'utilizzo di un motore ausiliario (ad esempio elettrico). Tale sistema è prototipico e permetterebbe vantaggi identici alla tipologia precedente con una considerevole semplificazione sul compressore, a fronte di un rendimento ancora minore e peso ed ingombro maggiore

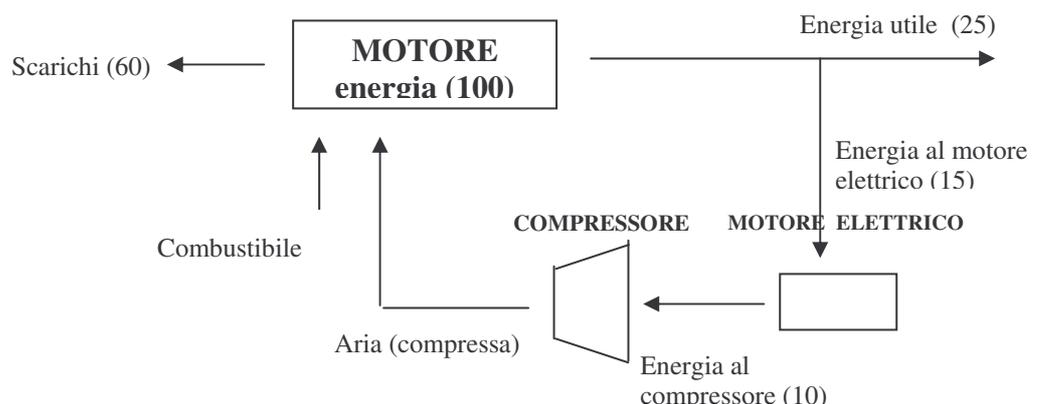


Figura 23: Schema di sovralimentazione compressore-motore ausiliario

- sfruttando l'energia associata ai gas di scarico i quali, oltre a rappresentare sempre una perdita inevitabile per il ciclo, nel caso del motore sovralimentato sono associati ad una

⁸ Tra l'altro questo tipo di tecnologia fu adottato, nella prima metà degli anni '80, da Lancia per la Trevi Volumex, ma il settore in cui era posizionata la vettura non giustificava l'aumento dei consumi.

carica energetica superiore a quelli relativi al motore aspirato ed a sua volta dipendente dal grado di sovralimentazione. Il vantaggio di questa tecnologia è l'utilizzo proprio dell'energia che comunque sarebbe perduta con i gas di scarico (un aumento del rendimento, quindi) con un peso ed un ingombro limitato, lo svantaggio una brillantezza minore ed una risposta non sempre soddisfacente ai bassi regimi.⁹ Tale sistema è quello preferito sui motori automobilistici diesel ed, in generale, in tutte le altre classi di questi ultimi.

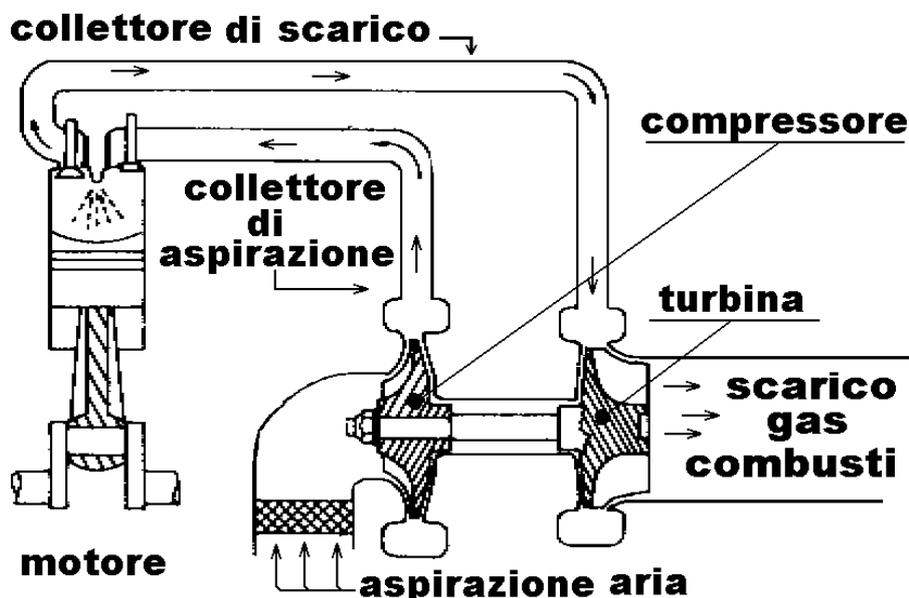


Figura 22: Sovralimentazione mediante turbocompressore

Nella figura (22) è rappresentato il sistema che, tramite l'utilizzo di una *turbina*, che sfrutta l'energia posseduta dagli scarichi, muove un asse al quale, a sua volta, è calettato il compressore: l'intero gruppo prende il nome di *turbocompressore*. Questa tecnologia, applicata per la prima volta in modo diffuso ai motori automobilistici solo all'inizio degli anni '80, non è una scoperta recente, essendo stata introdotta per i motori diesel circa un ventennio prima, consentendo molto spesso, oltre al consueto aumento di coppia e potenza anche un significativo aumento del rendimento.

La tecnologia del *turbocompressore* è stata diffusamente applicata sia ai motori diesel che a quelle benzina e ciò ha comportato che l'accezione "motore turbo" sia diventata sinonimo di motore sovralimentato, il che è chiaramente erroneo, essendo la sovralimentazione ottenibile non solo dal recupero di energia dei gas di scarico ma anche tramite gli altri sistemi illustrati.

A causa dell'introduzione di aria a pressione più elevata di quella atmosferica, la sovralimentazione si adatta meglio ai motori diesel rispetto a quelli a benzina che sono vincolati dal problema dell'autoaccensione.

La compressione dell'aria comporta però un aumento di temperatura che riduce in modo marcato la densità dell'aria e quindi l'efficienza del sistema: la compressione è, infatti, adiabatica e quindi *trattiene il calore*, in modo identico a quanto accade nel cilindro; se però l'aria, una volta compressa, venisse raffreddata allora la densità risultante sarebbe superiore a quella presente a fine compressione e parte della perdita di efficienza sarebbe eliminata: questo significa che il rapporto pressione densità diviene più diretto.

Questo sistema, impiegato nella quasi totalità dei motori diesel ed in misura minore anche nei motori a benzina, viene detto *intercooling* (ovvero raffreddamento intermedio) e lo scambiatore di calore nel quale viene raffreddata l'aria di sovralimentazione viene chiamato *intercooler*: sulle navi della Marina Militare l'intercooling è sempre presente.

⁹ Per tale motivo, su molti motori a benzina, si utilizzavano sistemi per migliorare la reattività ai bassi regimi, come, ad esempio, le valvole "waste-gate"

L'intercooler è uno scambiatore di calore aria-acqua mare: l'aria compressa dalla turbina (o dalle turbine, come nel caso dei GMT 320.20 DVM utilizzati sulle fregate Maestrale e sui caccia De La Penne) passa all'esterno di un fascio tubiero al cui interno scorre l'acqua di mare: poiché la temperatura dell'ultima è circa 30°C, mentre quella dell'aria compressa è sui 150°C, l'aria si raffredda sensibilmente aumentando la propria densità.

ELEMENTI DI CONFRONTO TRA IMPIANTI

I motori diesel, nelle differenti classi, high-speed, medium-speed e slow-speed sono divenuti, nel corso degli ultimi cinquant'anni, l'apparato motore navale per eccellenza considerando infatti che non solo una buona parte delle navi militari sono propulse con tale sistema ma che la gran maggioranza del traffico mercantile imbarca esclusivamente motori diesel.

Sebbene anche l'apparato motore diesel abbia, a similitudine degli altri tipi di apparati, vantaggi e svantaggi, la comparazione tra i primi ed i secondi è tale da renderlo l'apparato preferito quando non siano necessarie delle prestazioni estreme in termini di potenza, coppia, risposta e durata.

In linea generale i motori diesel non sono resistenti come gli apparati a vapore, poiché il moto alternativo degli stantuffi induce degli sforzi molto intensi ed assolutamente irregolari e per lo stesso motivo invecchiano abbastanza rapidamente e richiedono interventi di revisione ad intervalli regolari e relativamente ravvicinati, con una estesa sostituzione di elementi (come ad esempio le fasce, gli iniettori, i cuscinetti di testa e piede di biella, le valvole, le camicie) il che può rendere piuttosto onerosa tale attività.

Inoltre l'automazione che permette la conduzione del motore diesel è leggermente più complessa di quella relativa agli impianti a vapore e quindi più onerosa, ma di contro il motore è completamente autonomo e quindi richiede una quantità di personale per la conduzione minima; oltretutto il motore diesel richiede una piccola manutenzione molto limitata e quindi dall'impatto economico quasi trascurabile, a patto che le revisioni vengano eseguite agli intervalli stabiliti e sostituendo i pezzi previsti.

Il motore diesel, per la sua natura di impianto assemblato, è considerevolmente meno flessibile di un apparato a vapore, ovvero una qualunque avaria si verifichi al corpo del motore è potenzialmente un'avaria in grado di metterlo fuori uso: si deve anche considerare, però, che l'esperienza accumulata dai costruttori è tale da rendere la possibilità che tale avaria si verifichi molto limitata, fatta salva la buona conduzione ed il rispetto delle direttive di revisione.

In breve è vero che il motore diesel è meno robusto e flessibile di un impianto a vapore, ma tale limitazione è stata in gran parte riassorbita dalla affidabilità raggiunta dai produttori di diesel.

Il motore diesel può utilizzare, almeno in linea teorica, qualunque tipo di combustibile liquido, anche se nella realtà si utilizza, almeno nel campo navale militare il gasolio F-76; punti di forza del motore diesel sono il basso consumo specifico medio e la costanza del consumo al variare dell'andatura che lo rende sicuramente l'apparato più economico dal punto di vista dei costi di combustibile, poiché il consumo specifico medio è di gran lunga più contenuto rispetto agli apparati a vapore ed alle T.A.G.

L'impianto diesel ha ingombri e pesi molto più contenuti rispetto all'impianto a vapore: ciò comporta che a parità di dislocamento una quantità di spazio maggiore può essere dedicato ai sistemi d'arma o a parità di peso si richiede minore dislocamento e quindi dimensioni più contenute; inoltre esistono in commercio motori diesel di praticamente qualunque potenza, da cui l'offerta di prodotti è tale da permettere di scegliere la macchina migliore con pochi compromessi.

In più il motore diesel richiede un tempo minimo per l'avviamento, infatti tra la messa in marcia e l'erogazione di potenza è sufficiente attendere una decina di minuti affinché le temperature dei vari componenti si stabilizzino in condizioni di lavoro

Il motore diesel è sensibile alle condizioni esterne, soprattutto alla temperatura dell'aria aspirata: aumentando tale temperatura diminuisce la densità e quindi la potenza erogabile; per sua natura il motore è più sensibile dell'apparato motore a vapore ma meno della T.A.G.; inoltre, è molto meno sensibile di questa alla formazione di depositi salini nelle condotte dovuti all'aria salmastra e, grazie alla limitata necessità di acqua per il raffreddamento, è molto meno sensibile dell'apparato a vapore al passaggio su bassi fondi od acque fluviali.

A differenza della turbina a vapore, il motore diesel non produce coppia a giri zero, da cui esiste un valore di rotazione minimo che l'albero motore può mantenere: questo rende il motore diesel particolarmente sensibile agli aumenti di resistenza e soggetto a sovraccarico, da cui poco indicato per le operazioni di rimorchio.

Il motore diesel è una macchina irreversibile, ma a differenza della turbina la reversibilità è dovuta sostanzialmente alla legge di apertura delle valvole: sono stati realizzati, nel passato, motori sul cui albero di distribuzione vi erano due camme, una per la marcia avanti ed una per la marcia indietro che venivano inserite a seconda del tipo di moto richiesto; l'unico problema di tale sistema, ora abbandonato grazie alla tecnologia delle eliche a passo orientabile era la necessità di arrestare il motore per eseguire la traslazione e la necessità di riavviarlo nuovamente.

Il motore diesel è più facile da condurre di un impianto a vapore, sia in conduzione normale che senza automazione, richiede attenzione ma è sostanzialmente meno pericoloso di un impianto a vapore ed è più facile da tenere sotto controllo; assorbe le variazioni di carico con una risposta meno pronta del primo, ma non tende a sfuggire al controllo e soprattutto è più facile evitare transitori del sistema di regolazione dalle conseguenze disastrose.

Dimensioni dell'apparato	Molto contenute per i diesel veloci; abbastanza contenute per i diesel semiveloci; grandi per i diesel lenti ma sempre considerevolmente minori dell'impianto a vapore.
Peso dell'apparato	Molto contenuti per i diesel veloci; abbastanza contenuti per i diesel semiveloci; grandi per i diesel lenti, ma sempre considerevolmente minore dell'impianto a vapore.
Prontezza della risposta	Bassa; il diesel esprime il minimo della coppia e della potenza al numero di giri minimo.
Tempo di approntamento	Basso; da disapprontato a pronto a muovere in 30 minuti
Costo di acquisizione	Basso; richiede pochi elementi di tecnologia non esasperata ed estremamente affidabile.
Costo di utilizzo Consumo specifico Tipo di combustibile	Basso; consumo relativo di combustibili e lubrificanti Basso; consumo contenuto Gasolio di qualità medio alta per diesel veloci, medio bassa per semiveloci, combustibile pesante per diesel lenti.
Costo di gestione	Medio; nell'insieme richiede manutenzioni abbastanza frequenti ma abbastanza onerose (sostituzioni di parti)
Quantità e qualità di personale	Richiede abbastanza personale ma di buona qualità
Costo di manutenzione	Medio; richiede manutenzioni abbastanza frequenti e pp.dd.rr. di costo medio-elevato
Vita totale	Media; dopo 40.000 ore è più conveniente sostituirlo.
Affidabilità	Abbastanza elevata
Vulnerabilità	Media; gli apparati sono di medie dimensioni
Funzionamento degradato	Limitato; nella pratica il motore è un punto critico di per sé
Impatto operativo	Elevato; molto rumoroso, con grandi segnature IR

CENNI SUI MOTORI A DUE TEMPI

Nella trattazione del capitolo si è parlato sostanzialmente di motori a quattro tempi, che sono di gran lunga i più diffusi, ma esistono anche motori a due tempi che, sebbene rappresentino delle applicazioni di mercato abbastanza relative in quantità ed in potenza sviluppata, comunque esistono. La differenza fondamentale tra il ciclo due tempi e quello quattro tempi è che il primo si completa in due corse del pistone dal PMI al PMS e viceversa, anziché in quattro e questo permette di ottenere, a parità di dimensioni, una potenza maggiore.

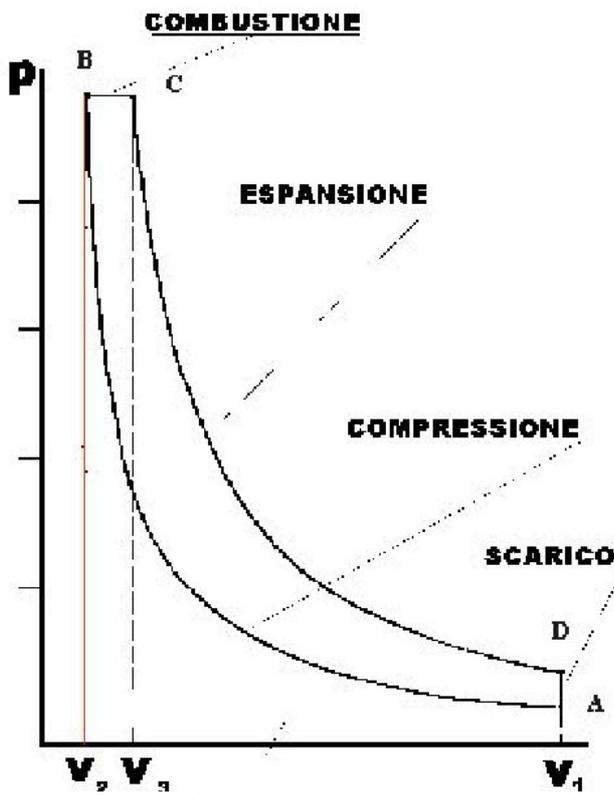
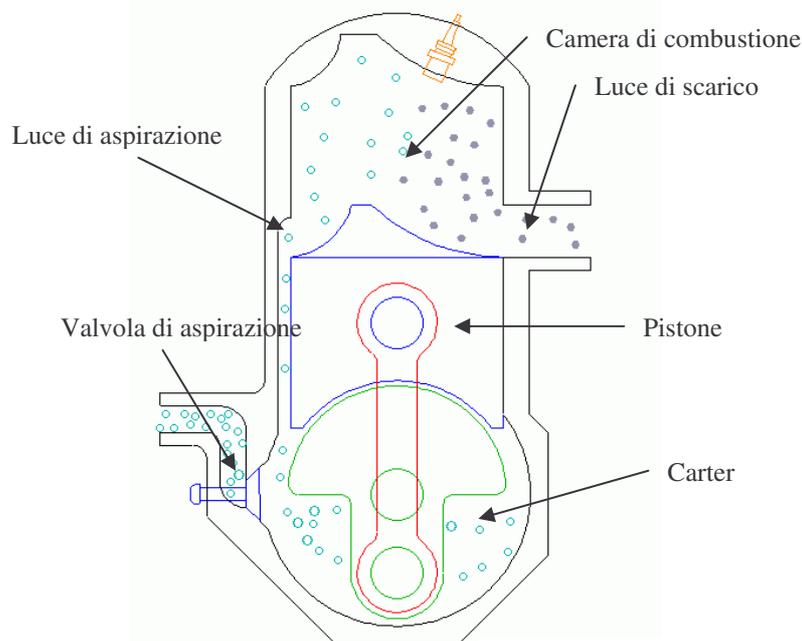
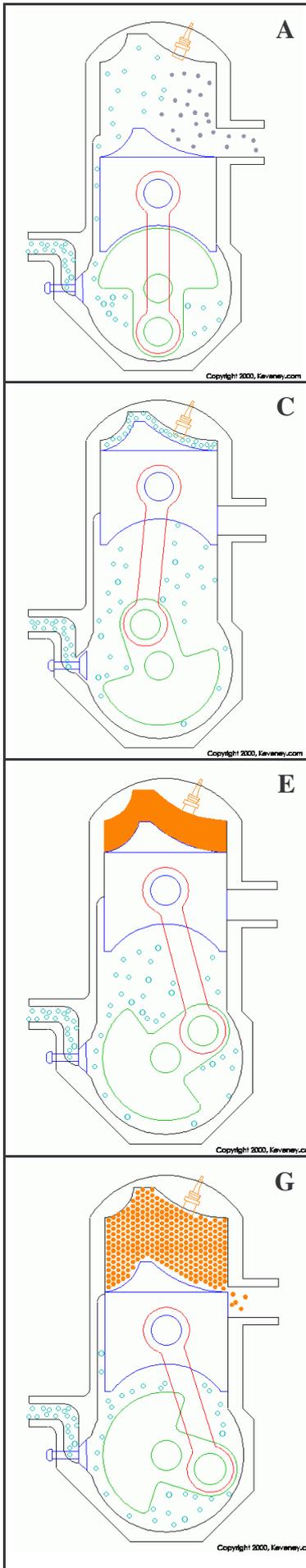


Figura 23: Ciclo diesel per motore due tempi

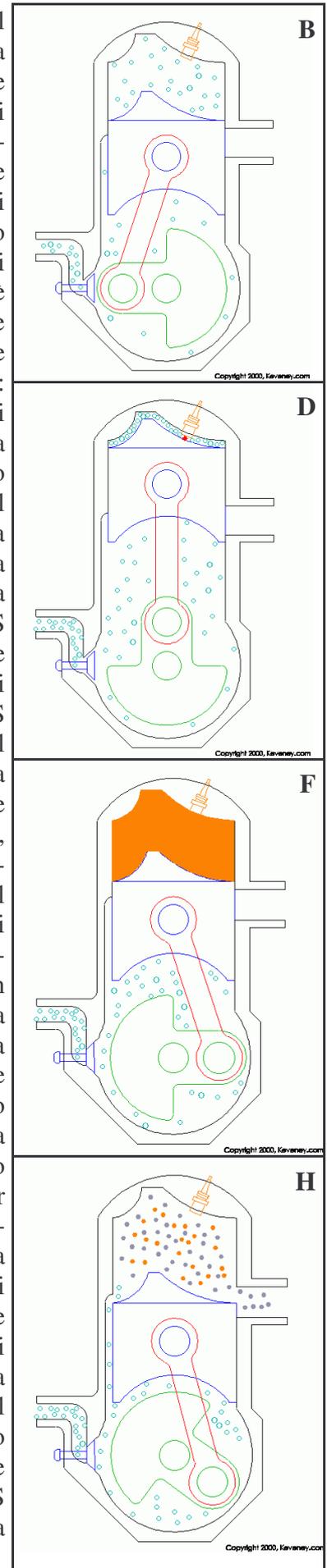
Nella figura (23) è rappresentato un ciclo diesel per motori a due tempi: come si può notare, eventualmente confrontandolo con quello rappresentato nella figura (16) esso si realizza in due movimenti del pistone, dal punto morto inferiore, identificato con A, al punto morto superiore, punto B, e successivamente ritornando al punto morto inferiore (punti D ed A). In pratica mancano le due corse di aspirazione e di scarico: la fase di aspirazione avviene durante quella di compressione mentre, come nel motore quattro tempi fase di espansione e scarico avvengono insieme. Riferendosi alla figura (24), si noti come il cilindro del motore a due tempi, nella forma classica, non è dotato di valvole ma di *luci o feritoie di aspirazione e scarico*; nella figura è rappresentato, per semplicità didattica, un motore due tempi per usi motociclistici, ma il suo funzionamento è molto simile (nonostante l'accensione comandata) a quella di un due tempi diesel.

Figura 24: Monocilindro motociclistico 2 tempi





La sequenza illustra il funzionamento del motore ciclo Otto due tempi; nella figura (A) il pistone è al punto morto inferiore ed è in corso il lavaggio della camera di combustione ovvero l'aria passa, attraverso la luce di aspirazione, dal carter, dove si trova in pressione, alla camera di combustione, forzando i gas di scarico fuori da questa attraverso la luce di scarico; la valvola di aspirazione è chiusa. Nella figura (B) il pistone compie la corsa dal PMI al PMS e chiude sia le luci di scarico che quelle di aspirazione: l'aria intrappola nella camera di combustione si comprime mentre la valvola di aspirazione si apre (per effetto della depressione creata dal moto del pistone). La compressione nella camera di combustione e l'aspirazione della miscela nel carter continuano fino a quando il pistone non giunge al PMS (figura (C)), la valvola di aspirazione permane aperta ed il carter si riempie di miscela, all'arrivo del pistone al PMS scocca la scintilla come in figura (D). Il forte aumento di pressione dovuto alla combustione comporta che il pistone inverta il proprio moto, dal PMS al PMI, producendo lavoro e contemporaneamente comprimendo la miscela presente nel carter; contemporaneamente la valvola di aspirazione è chiusa. L'espansione continua fino a quando il moto del pistone non scopre la luce di scarico, come in figura (F), comprimendo ulteriormente l'aria presente nel carter. Prima di raggiungere il PMI il pistone scopre la luce di scarico (figura (G)) ed immediatamente la pressione crolla praticamente al livello atmosferico, mentre la miscela nel carter è compressa a pressione considerevolmente superiore: quando, come nella figura (H) il pistone scopre la luce di aspirazione essa fluisce attraverso tale luce e procede al lavaggio e quindi all'espulsione dei gas di scarico dalla camera di combustione, ricominciando il ciclo come nella figura (A). L'intero ciclo è stato realizzato con soli due spostamenti del pistone dal PMI al PMS e viceversa. Si comprende come la posizione (aperta o chiusa) della valvola



sia fondamentale per la realizzazione del ciclo, consentendo la compressione della miscela all'interno del carter; poiché nel carter vi sono gli accoppiamenti del piede di biella e l'albero motore, si comprende perché i piccoli motori di questo tipo funzionino a *miscela* ovvero con una mescolanza di benzina ed olio (generalmente il tenore di olio è tra il 2 ed il 4%), il cui scopo è quello dei lubrificare tale accoppiamenti.

I grandi motori diesel lenti due tempi sono generalmente dotati di un collettore di aspirazione dell'aria con aria in pressione: riferendosi alla figura (25) si nota come l'aria viene compressa la

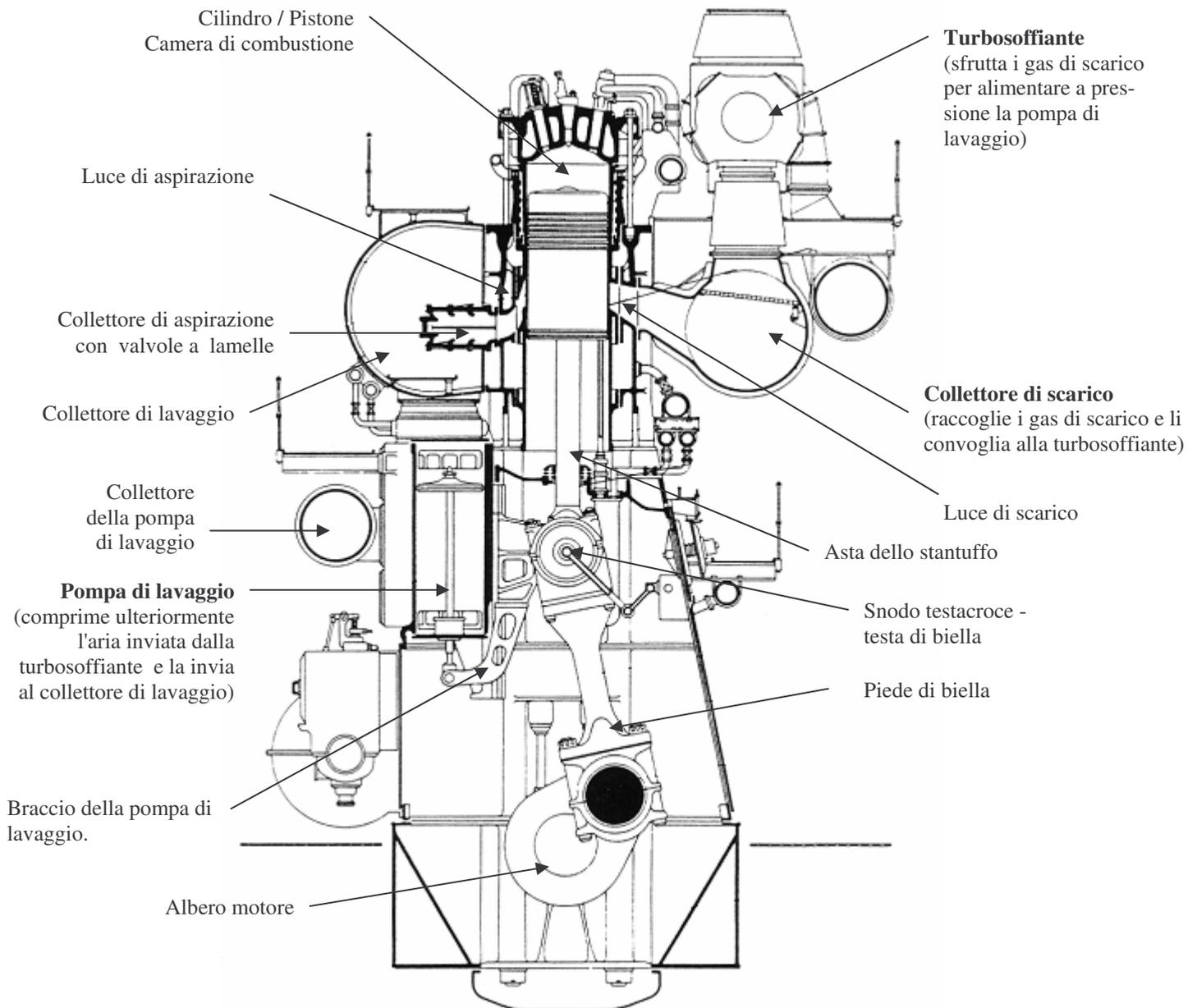


Figura 25: Motore diesel 2 tempi FIAT 1060S a lavaggio trasversale

dalla turbosoffiante una prima volta ed inviata al collettore della *pompa di lavaggio* dalla quale viene compressa una seconda volta ed inviata al collettore di lavaggio; quest'ultimo alimenta, per ogni cilindro, un *collettore di aspirazione* attraverso il quale l'aria giunge a delle *luci di aspirazione*: durante il moto dello stantuffo, in prossimità del PMI, le luci di aspirazione e scarico vengono scoperte e l'aria del collettore di lavaggio, a pressione maggiore dei gas combusti, spinge questi ultimi nel collettore di scarico immettendo nel cilindro la quantità di aria necessaria per eseguire un nuovo ciclo; questo sistema di luci contrapposte nel quale solo la posizione dello stantuffo permette o non permette il passaggio dell'aria e dei gas combusti, viene detto *lavaggio trasversale*.

Poiché l'aria di lavaggio deve trovarsi a pressione maggiore dei gas al termine dell'espansione, il rendimento di questi motori è molto elevato ma, nel contempo, non permette di recuperare una energia sufficiente per comprimere l'aria in aspirazione: per questo motivo vi è la pompa di lavaggio alternativa¹⁰ il cui scopo è innalzare ulteriormente la pressione di lavaggio.

Si noti, inoltre, come il collettore di aspirazione sia dotato di valvole a lamelle che si chiudono qualora, per cause diverse, la pressione nel collettore di lavaggio sia insufficiente, inferiore, cioè, a quella dei gas combusti.

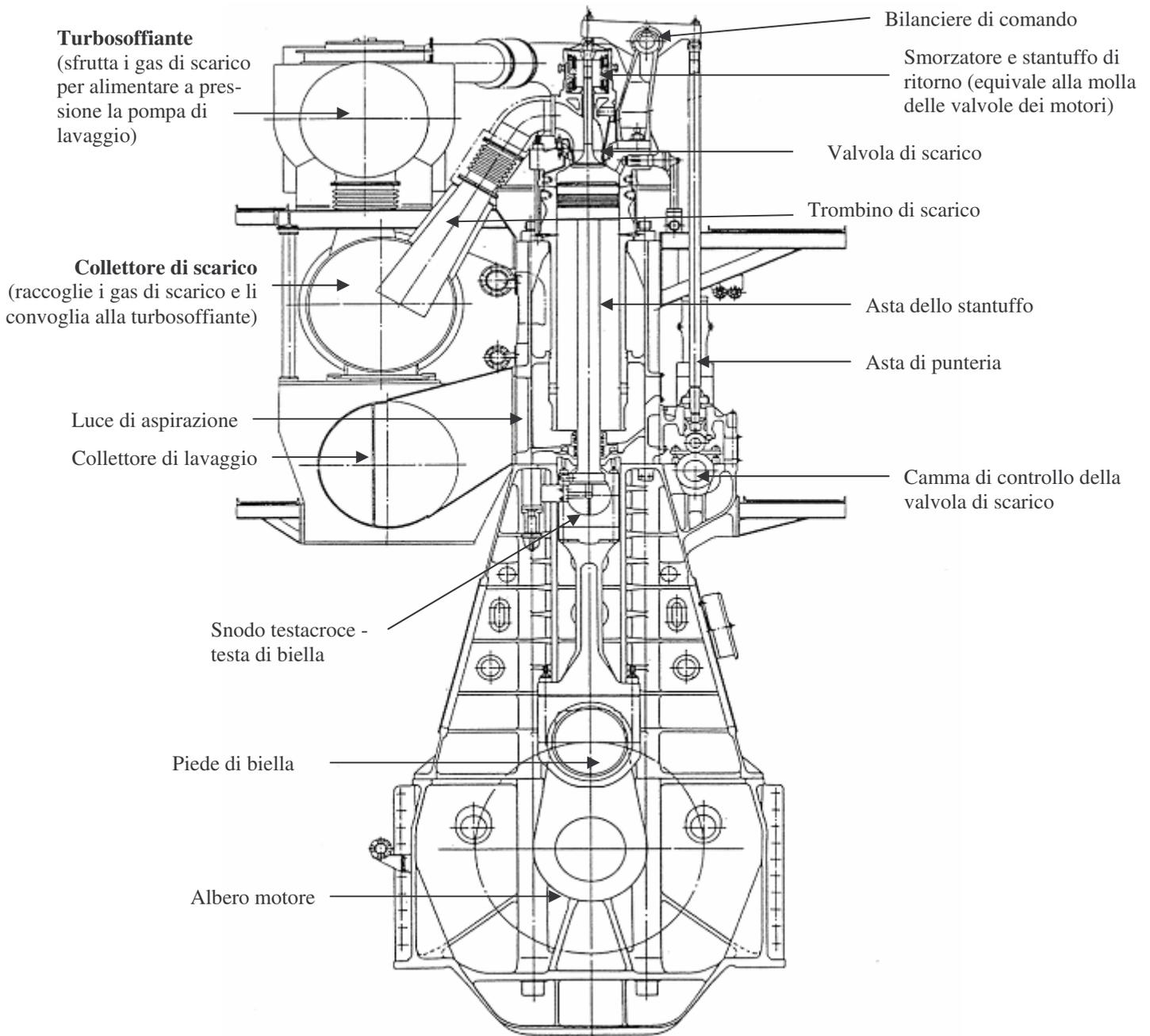


Figura 26: Motore diesel 2 tempi Mitsubishi UEC60LS a lavaggio longitudinale e valvola in testa

Per superare i limiti del lavaggio trasversale i costruttori di motori sono ricorsi al lavaggio *longitudinale* con luci di aspirazione e valvola di scarico; tale sistema permette di aumentare la corsa utile dello stantuffo a parità di dimensioni (e quindi la potenza erogata), permette di sfruttare in modo più razionale l'energia dei gas di scarico e quindi rende inutile la pompa di lavaggio (il che

¹⁰ Dotata cioè di moto alternativo, come i pistoni, dai quali prendono il moto tramite il *braccio della pompa di lavaggio*

si traduce in maggiore potenza utile disponibile sull'albero motore), rende impossibile il ritorno dei gas combusti sul collettore di aspirazione, permettendo di evitare le valvole a lamelle, ma soprattutto, grazie alla maggiore corsa utile, permette di bruciare combustibili molto degradati (e quindi poco costosi) con velocità di rotazioni molto basse.

Di contro, come si può notare nella figura (26), vi è la maggiore complicazione della valvola di scarico, normalmente di dimensioni molto grandi, che viene comandata da una apposita camma mediante un bilanciere ed una asta di punteria e corredata di un pistone attuatore-smorzatore, il cui scopo è principalmente quello di riportare la valvola in posizione di chiuso nel momento in cui il bilanciere termina la propria azione.

7. APPARATI CON TURBINE A GAS

Storicamente gli apparati motori su turbine a gas sono stati sviluppati dopo gli apparati endotermici basati su ciclo diesel, nonostante la loro ideazione sia per lo meno contemporanea: sebbene le macchine possano sembrare estremamente diverse il principio di funzionamento è straordinariamente simile e può essere visto come il superamento di alcuni limiti del ciclo diesel classico od, addirittura, come una sorta di ciclo diesel realizzato in altro modo.

Si è visto come il passaggio dagli apparati esotermici a quelli endotermici sia stato dettato dalla necessità di superare il problema del trasferimento del calore dalla sorgente calda al fluido motore e la prima risposta in tal senso siano stati prima il ciclo otto e poi quello diesel; rimane il problema che il lavoro e la potenza ottenibili dal motore alternativo sono legati alla quantità di fluido che vi opera e quindi alla cilindrata totale: ovviamente l'aumento della cilindrata comporta un aumento delle dimensioni fisiche del motore da cui, intuitivamente, vi è una relazione tra la potenza espressa e le dimensioni ed il peso della macchina; si prenda come esempio macroscopico il caso del motore diesel lento, due tempi, SULZER RTA84C, citato nella figura (20) a pag.57, che viene fornito nelle configurazioni da 6 a 12 cilindri, passando da una cilindrata di circa 30 m³ a circa 60 m³, e potenza da 24.300 a 48.600 kW (a 102 giri/min) ma con lunghezza che passa da 11,08 m a 21,68 e peso da 850 a 1570 t.

La turbina a gas nasce dal tentativo di ridurre le dimensioni fisiche delle macchine endotermiche a parità di potenza, svincolandosi dal problema della compressione tramite movimento alternativo del pistone: se fosse possibile comprimere il fluido in un modo diverso allora sarebbe pensabile poter ottenere una macchina in grado di operare con maggiori quantità di aria per unità di tempo, e quindi di produrre una grande potenza con dimensioni sostanzialmente inferiori a quelle del diesel.

Nonostante l'apparente semplicità del concetto la realizzazione pratica della turbina a gas è stata particolarmente complessa soprattutto perché la tecnologia dei materiali e delle lavorazioni era, all'atto della teorizzazione, assolutamente immatura: la prima turbina a gas a trovare applicazione pratica è stata quella che ha armato il Messerschmitt ME262 Schwalbe (rondinella) nel 1944 e che ha aperto, sebbene in modo drammatico, una nuova era in campo aeronautico; i problemi che i progettisti hanno dovuto affrontare sono stati:

- massima temperatura dei gas caldi che comportava grandi problemi di resistenza e durata alla palettatura delle turbine
- efficienza del compressore, poiché termodinamicamente parlando la compressione del gas è un'operazione complessa, costosa in termini energetici e di basso rendimento (per fare sì che il gas assuma 100 di energia occorre impiegarne 120)

L'evoluzione tecnologica dei materiali ha permesso di superare in parte questi limiti e costruire macchine sempre più potenti ed affidabili; le condizioni estreme, però, in cui si trovano ad operare i vari elementi e particolarmente la camera di combustione e la turbina di alta pressione, comporta che tali elementi nascano con una *vita operativa* ben definita, ed espressa in ore di funzionamento.

Ciò comporta che l'utente è tenuto a sostituire un certo numero di elementi o intere parti della turbina (ad esempio il generatore di gas) dopo un certo numero di ore di funzionamento: per il turbogas LM 2500 la General Electric che lo costruisce e lo commercializza prevede la sostituzione delle parti calde (*hot-parts substitution*: sostituzione della camera di combustione e della turbina di alta pressione) ogni 12000 ore di funzionamento, e quella dell'intero generatore di gas ogni 25000 ore; tali valori in ore non sono assoluti, ma sono funzione della massima potenza erogata dalla macchina: maggiore potenza equivale a maggiori temperature e, di conseguenza, maggiore stress dei materiali. Per tale motivo è lasciata all'utente la decisione su quale debba essere la massima potenza che il turbogas LM 200 può esprimere: un apposito programma di gestione software, unita con dei blocchi meccanici sulle parti mobili degli organi di attuazione, permettono di scegliere

potenze massime variabili dai 20000 Hp (come su nave Garibaldi) ai 27500 Hp (come sulla Classe De La Penne); naturalmente a potenze maggiori corrispondono vite più brevi degli elementi.

Infine è utile ricordare che tale apparato, pur potendo funzionare con una vasta gamma di combustibili, nasce per utilizzare combustibili liquidi come i keroseni ed i gasoli e non, come erroneamente si potrebbe ritenere, combustibili gassosi: l'accezione *turbina a gas* è in contrapposizione alla *turbina a vapore* ovvero con particolare riferimento al fluido motore che, nel primo caso è costituito dai *gas combusti*, nel secondo dal *vapore d'acqua*.

Nella sua forma completa tale apparato dovrebbe essere conosciuto come *turbina a gas combusti*, in modo da non trarre in inganno provocando un equivoco tra il fluido motore ed il combustibile utilizzato.

Per completezza si dirà che le turbine a gas possono essere distinte in due grandi categorie: le TAG di derivazione aeronautica e quelle industriali; le prime hanno caratteristiche superiori in termini di potenza specifica (ovvero per unità di peso e di volume) migliore reattività, le seconde sono soprattutto focalizzate nel contenimento dei consumi. La turbina marinizzata può nascere dall'una e dall'altra categoria, sebbene la gran parte delle turbine utilizzate nel campo navale derivino, di fatto, da motori aeronautici.

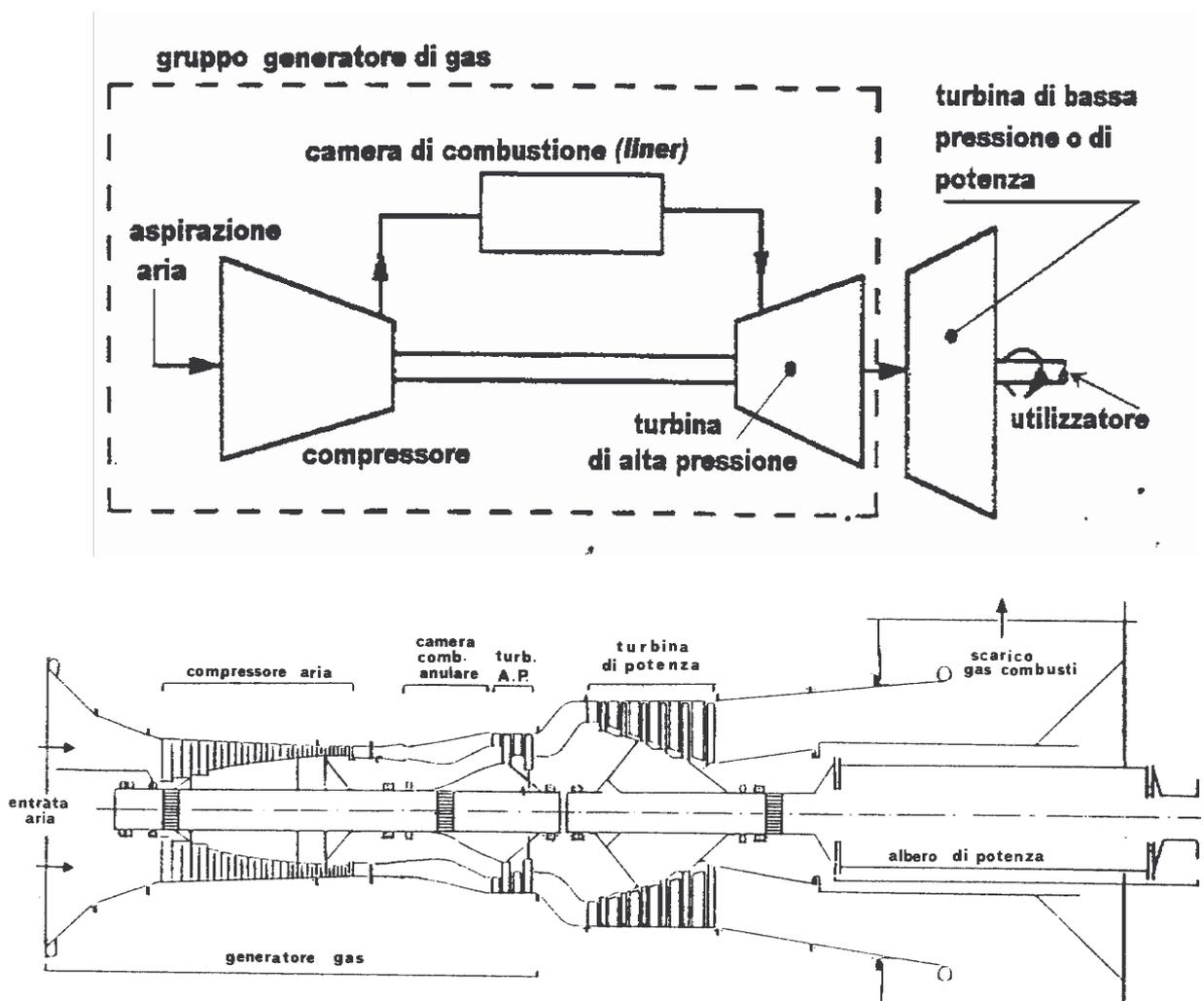


Figura 1: Schema funzionale e realizzazione effettiva della turbina LM 2500

Sebbene in commercio esistano molti modelli di turbina a gas, si farà riferimento a quella che viene più diffusamente utilizzata dalla Marina Militare, ovvero la General Electric-Fiat LM2500; tale macchina è costituita essenzialmente dai seguenti elementi: da un compressore, da un assemblaggio

di camere di combustione, da una turbina del compressore (o di alta pressione) e da una turbina di potenza (o di bassa pressione), a cui si aggiungono i necessari condotti per l'aspirazione e lo scarico con l'esterno.

Lo schema funzionale di una turbina a gas viene riportato nella fig. (1) : si possono comparare lo schema a blocchi con la realizzazione tecnica effettiva, notando come la TAG sia sostanzialmente composta dalle due distinte parti del *generatore di gas combusti* e della *turbina di potenza*. Come si è visto la potenza prodotta dalla combustione viene impiegata sia per la compressione dell'aria sia dall'utilizzatore esterno mediante le due turbine di alta e bassa pressione: queste due turbine *non sono meccanicamente collegate* ovvero possono ruotare indipendentemente l'una dall'altra per motivi che illustreremo in seguito; la TAG può essere quindi pensata scomposta in due gruppi funzionali ben distinti: il *generatore di gas* e la *turbina di potenza*.

Il generatore di gas è costituito da:

- un condotto di aspirazione opportunamente raccordato alla voluta di ingresso del compressore: trattandosi del percorso dell'aria in ingresso alla macchina viene costruito con grande attenzione, allo scopo di limitare al massimo le perdite di carico e quindi di poter permettere il passaggio della più grande quantità di aria possibile

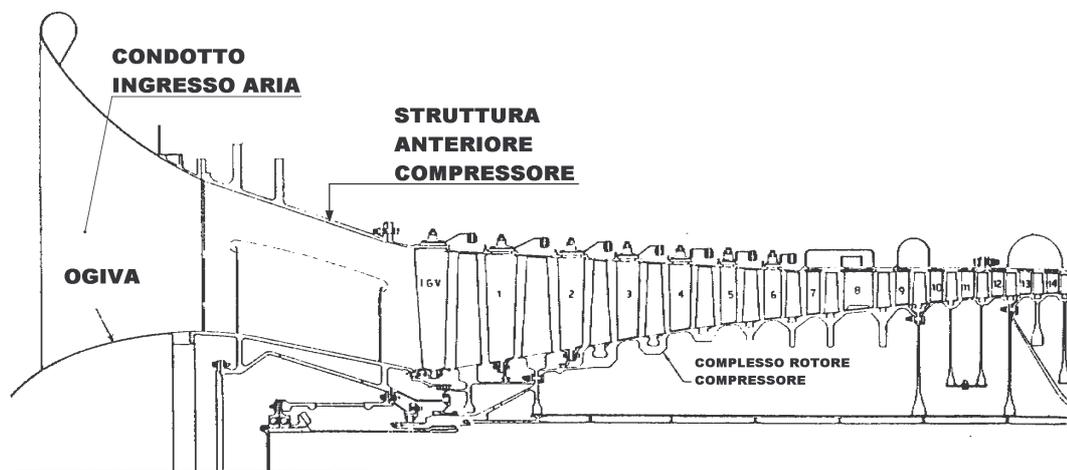


Figura 2: Condotto di aspirazione e compressore

- il compressore è di tipo assiale ovvero la direzione dell'aria è parallela all'asse della macchina sebbene nel passato siano stati utilizzati compressori centrifughi che vengono a tutt'oggi sfruttati per turbine di limitata potenza. Il compressore assiale è strutturalmente molto simile ad una turbina ad azione: esso è costituito da ruote palettate fisse dette *ruote statoriche* e ruote palettate rotanti, collegate all'asse del compressore, dette *ruote rotoriche*: una ruota statorica ed una rotorica formano uno *stadio di compressione*¹; a similitudine della turbina ad azione la sezione di passaggio delle ruote rotoriche è costante, mentre quella delle ruote statoriche è sensibilmente convergente: il funzionamento è quello di un *ugello al contrario*, con uno schema molto simile a quello della figura (5) a pag.35, con la differenza sostanziale che l'ugello viene dopo la paletta e serve ad aumentare la pressione e non a diminuirla². L'aria comburente viene aspirata dall'esterno ed incontra le palette della prima ruota statorica che vengono detti *deviatori*:

¹ Da notare che nel compressore lo stadio è formato da una ruota rotorica e da una statorica, mentre nella turbina accade esattamente l'opposto, ovvero lo stadio è composto dalla ruota statorica e da quella rotorica: questo accade perché mentre nella turbina si vuole sfruttare l'energia del fluido per ottenere un aumento di velocità e successivamente lavoro meccanico, nel compressore si sfrutta il meccanismo perfettamente opposto, ovvero il lavoro meccanico viene utilizzato per avere un aumento di velocità che a sua volta si converte in energia del fluido.

² Questo particolare tipo di ugello viene detto *diffusore*

i deviatori non appartengono agli stadi di compressione ed hanno come scopo quello di inviare l'aria alla ruota rotorica del primo stadio di compressione con un angolo di ingresso ottimale; la ruota rotorica, che ruota ad elevata velocità produce una consistente accelerazione nel flusso il che comporta, a sua volta, che la velocità di uscita dell'aria sia notevolmente più elevata di quella in ingresso: a questo punto essa entra nella ruota statorica del primo stadio di compressione ove la sezione convergente provoca una consistente diminuzione di velocità e, di conseguenza, un analogamente consistente aumento della pressione; se si ipotizza che la velocità in ingresso al primo stadio sia eguale a quella di uscita, allora si comprende come il lavoro meccanico consumato dalla ruota rotorica dello stadio sia stato convertito in energia del fluido, ovvero aumento della pressione e temperatura.

Naturalmente è impossibile convertire in modo totale il lavoro meccanico in energia del fluido, ad esempio a causa degli attriti di natura viscosa sia del fluido sulle palette che all'interno del fluido stesso: ciò implica che l'energia utilizzata per muovere il compressore non diviene integralmente energia del fluido anzi, a causa del basso rendimento della compressione la perdita è molto elevata.

Intuitivamente si comprende che l'azionamento del compressore, necessario per il funzionamento del turbogas, assorbirà molta dell'energia prodotta dal turbogas stesso.

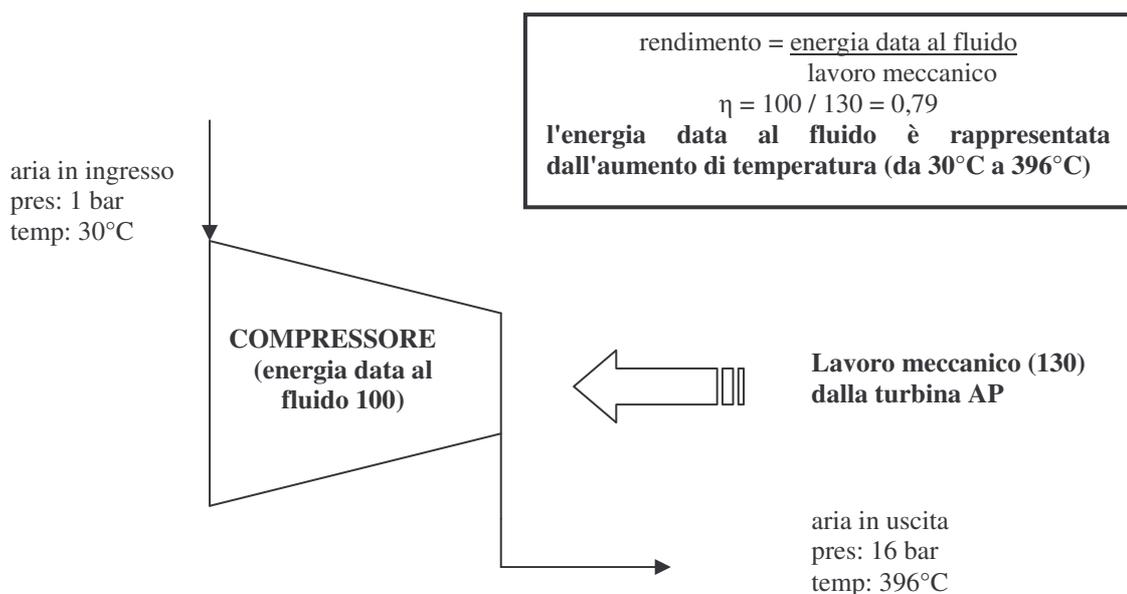


Figura 3: Schema di compressione aria

Esistono dei limiti fisici relativi al rapporto di compressione relativo al singolo stadio, cioè dell'aumento di pressione massimo che si può ottenere in uno stadio: i compressori sono quindi dotati di tanti stadi semplici quanti ne servono per raggiungere la pressione desiderata; in pratica ogni stadio è un piccolo compressore e l'aria in uscita dal precedente viene compressa ulteriormente dal successivo, come illustrato nella figura (4); il turbogas LM 2500 ha rapporto di compressione totale pari a 16.

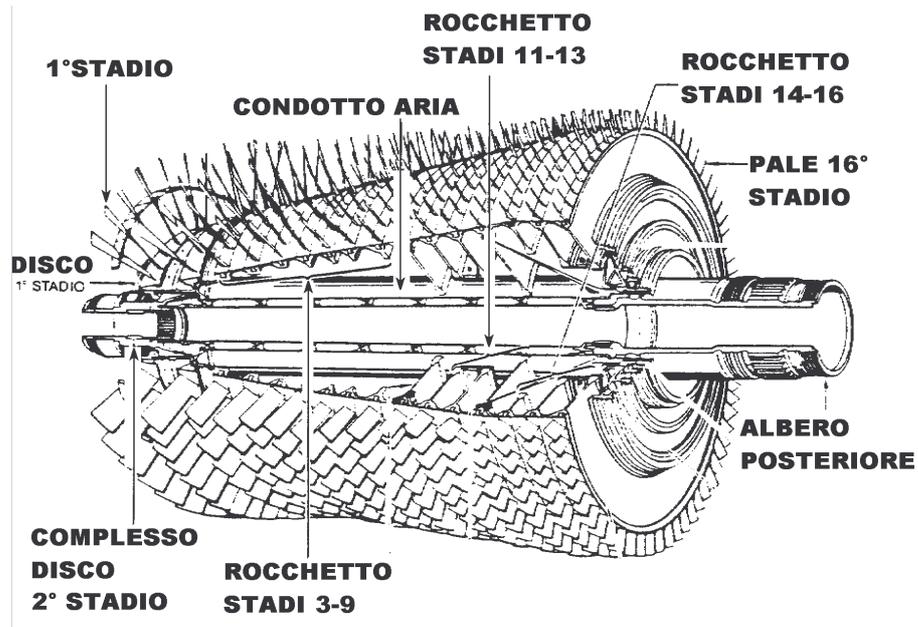


Figura 4: Rotore del compressore

- la camera di combustione, detta normalmente *liner*, ove vengono mescolati combustibile e comburente allo scopo di ottenere una combustione omogenea e stabile, ovvero un innalzamento di temperatura che sia all'incirca lo stesso in tutta la sezione della macchina e il cui valore sia dipendente solo dall'ascissa longitudinale della camera di combustione; se immaginiamo che il liner sia una sorta di tronco di cono e supponiamo che l'aria entri dalla base minore e i gas combusti dalla base maggiore, con l'accezione di combustione omogenea intendiamo che il valore di temperatura sia sostanzialmente costante su ognuna delle sezioni che si ottengono intersecando il liner con un piano parallelo all'asse, mentre con stabile intendiamo che il valore della temperatura dipende solo dalla posizione della sezione considerata rispetto all'origine della camera di combustione e non da altri parametri, ad esempio dal tempo.

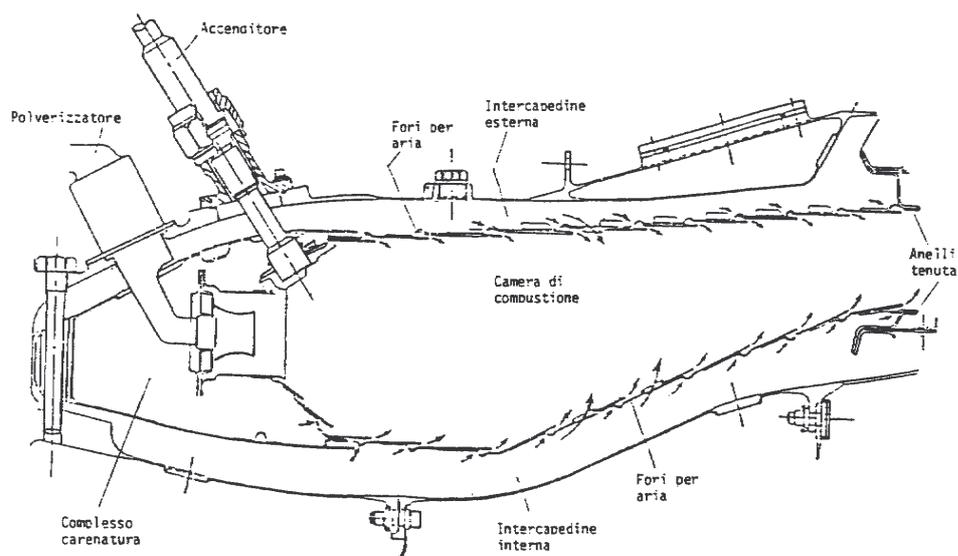


Figura 5: Camera di combustione

Queste situazioni, che possono essere ottenute grazie ad un attento progetto della camera di combustione, dovrebbero garantire un funzionamento ottimale della turbina, che

permetta sia di esprimere tutta l'energia chimica contenuta nel combustibile e convertirla in calore, sia di far giungere il fluido all'imbocco della turbina in condizioni ottimali, pronto a convertire la massima aliquota termodinamicamente possibile di calore in lavoro; nella figura (5) si possono notare gli elementi del liner tra i quali il *polverizzatore*, dotato di cono *sweeler*, ove l'aria primaria ed il combustibile vengono miscelati, l'accenditore che interviene all'avviamento, quando la compressione non è in grado di accendere il combustibile; si può notare inoltre la forma ad ugello del liner, il cui scopo è quello di immettere i gas combusti alla maggiore velocità possibile in turbina.

La camera di combustione è sollecitata termicamente in modo estremamente intenso perché è in senso assoluto il punto di maggiore temperatura del sistema; spesso nella camera di combustione non viene inviata l'intera portata dell'aria che passa nella turbina, ma una quantità minore, leggermente superiore alla quantità stechiometrica, il cui compito è quello di rendere possibile la combustione e viene detta *flusso primario* (od anche *aria primaria*) mentre la rimanente viene inserita dalla superficie laterale della camera di combustione ed il suo scopo è quello di stabilizzare l'attività di combustione sia in senso spaziale (al fine di evitare che alcuni punti del liner vengano ad avere temperature non sostenibili dai materiali) sia temporale (ovvero che in particolari condizioni, ad esempio nel caso di accelerazione o decelerazione della macchina, in alcuni punti del liner non si vengano a creare situazioni termicamente pericolose): questo secondo flusso viene detto *flusso secondario* (od anche *aria secondaria*).

Il liner è un componente essenziale della TAG ed anche se la sua progettazione può sembrare apparentemente semplice, nella realtà non lo è assolutamente e le sue prestazioni condizionano pesantemente le prestazioni della macchina; esso è anche uno degli elementi più sollecitati che quindi devono essere più spesso sostituiti nel corso della vita della macchina.

- la turbina di alta pressione rappresenta il punto in cui parte dell'energia prodotta dalla macchina viene utilizzata per garantirne la continuità di funzionamento, ma tale deduzione incide poi sulla potenza netta che l'apparato può erogare; fondamentale che la turbina AP sia disegnata per garantire il più alto rendimento possibile al generatore di gas, allo scopo di impiegare la minore aliquota possibile dell'energia totale generata

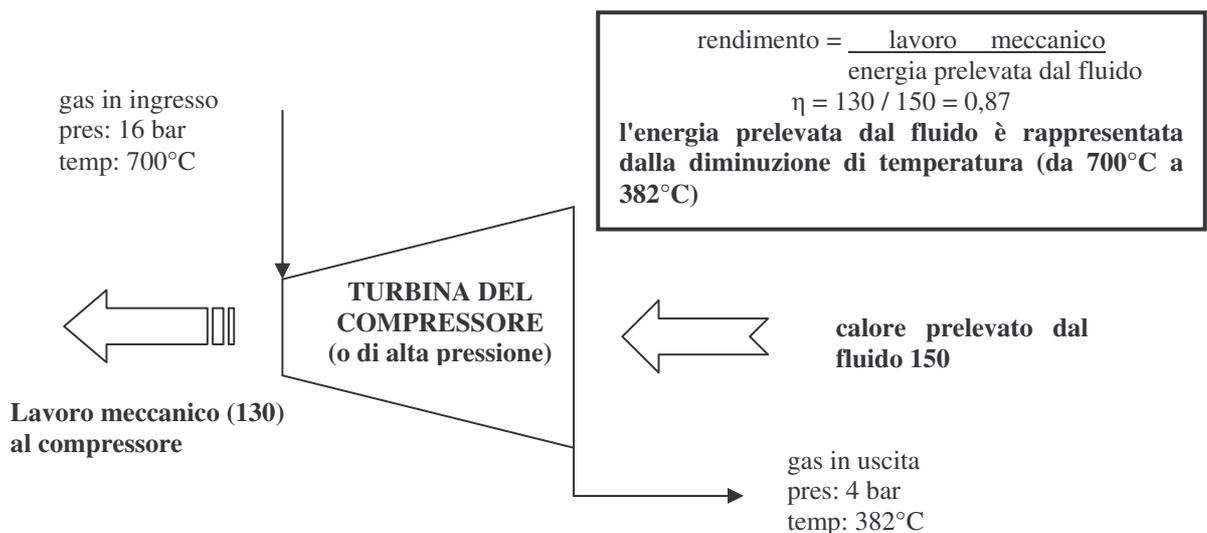


Figura 6: Schema per turbina alta pressione

dal turbogas: riferendosi alla figura (3), supponendo che 100 sia l'entità dell'energia acquisita dall'aria nella compressione, il buon rendimento del compressore fa sì che il lavoro meccanico introdotto sia il più vicino possibile a 100, (nella figura (3) lo si è posto eguale a 130, con rendimento di 0,77), mentre il buon rendimento della turbina di alta pressione fa sì che l'energia prelevata dai gas combusti sia il più possibile eguale a quella inviata al compressore, come dimostrato nella figura (6): poiché l'energia posseduta dai gas è rappresentata dalla temperatura, maggiore è l'aliquota prelevata per il compressore minore è la temperatura in uscita e quindi minore è l'energia disponibile per la turbina di potenza. Il problema fondamentale che affligge, in generale, le macchine a fluido e quindi sia le turbine, di alta e bassa pressione, che il compressore è la forte perdita di rendimento che si ha quando la potenza effettivamente impiegata è una frazione della massima potenza producibile dalla macchina: questa situazione comporta che, essendo la macchina ottimizzata per la potenza massima, l'utilizzo a potenza inferiore non comporta, ad esempio, il dimezzamento dei consumi, ma una riduzione molto inferiore: in breve si dice che *il consumo specifico aumenta*.

Inoltre la turbina di alta pressione è anche l'organo più sollecitato della macchina, poiché la sollecitazione è sia termica che meccanica: la sollecitazione termica, dovuta all'elevatissima temperatura dei gas in uscita dalla camera di combustione, tende a ridurre le caratteristiche di resistenza dei materiali, mentre la rotazione dell'albero genera, sulla singola paletta, una forza centrifuga che tende a staccarla dal suo alloggiamento sull'albero stesso; l'azione combinata della diminuzione di resistenza del materiale e della forte sollecitazione centrifuga rende il progetto della turbina estremamente delicato, essendo fondamentale che, per le considerazioni legate al rendimento fatte precedentemente, la forma delle palette stesse si mantenga assolutamente inalterata.

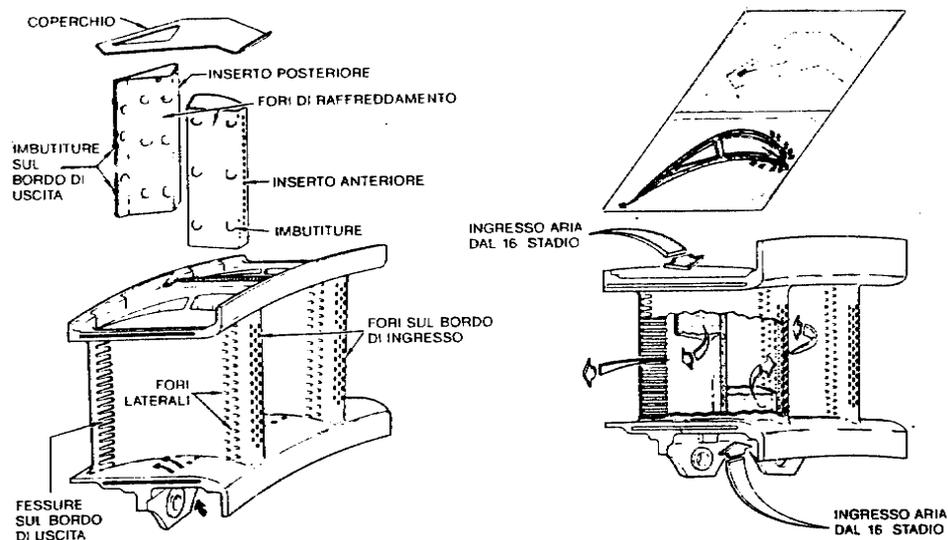


Figura 7: Particolare sistema di raffreddamento palette della turbina di alta pressione

Queste considerazioni legate alla resistenza del materiale impongono da una parte l'adozione di materiali estremamente pregiati e quindi costosi e difficile lavorazione, dall'altra la limitazione della temperatura dei gas che lavorano in turbina: poiché si è detto che l'energia prodotta nella combustione si evidenzia con un notevole aumento di temperatura, limitare la temperatura dei gas caldi implica una riduzione della potenza esprimibile dalla macchina stessa.

Per cercare di elevare il più possibile la temperatura dei gas senza compromettere la resistenza delle palette della turbina, vengono utilizzati due differenti approcci: in primo luogo parte dell'aria compressa spillata dal compressore viene immessa all'interno della paletta (che è cava), e da questa sfugge attraverso una serie di fori calibrati; di conseguenza si viene a creare un film fluido che diminuisce la temperatura dei gas che lambiscono il corpo della paletta stessa, come nella figura (7); il secondo sistema è quello di accettare una deformazione costante nel tempo, il che implica definire, appunto, una vita massima della paletta (e quindi della turbina) oltre la quale essa va necessariamente sostituita; tale approccio è detto *progettazione a creep*.³

- la turbina di bassa pressione o di potenza è l'organo nel quale viene prodotto il lavoro utilizzabile all'esterno; nonostante sia un organo molto meno sollecitato in senso generale della turbina di alta potenza, nondimeno il suo disegno è piuttosto complesso poiché si trova a lavorare con gas che hanno già perduto una considerevole parte della loro energia ed è necessario sfruttare la rimanente nel modo più intensivo possibile.

Dalla termodinamica si sa che al diminuire della pressione e temperatura il volume specifico dei gas tende ad aumentare, da cui la turbina di potenza tende ad essere considerevolmente più grande di quella di alta pressione: questo implica grandi dimensioni della palettatura e quindi notevoli sforzi sul corpo della paletta stessa; inoltre per sfruttare convenientemente l'energia residua dei gas deve essere dotata di un numero di stadi superiore.

Quanto precedentemente esposto può essere facilmente compresa se si considera come, a causa dell'aumentato volume specifico, per mantenere costante la portata in massa sia necessario sia lavorare con velocità maggiori che con maggiori sezioni di passaggio: infatti la turbina di potenza è dotata di 8 stadi, contro i 2 della turbina del compressore: si consideri in tal senso la figura (8).

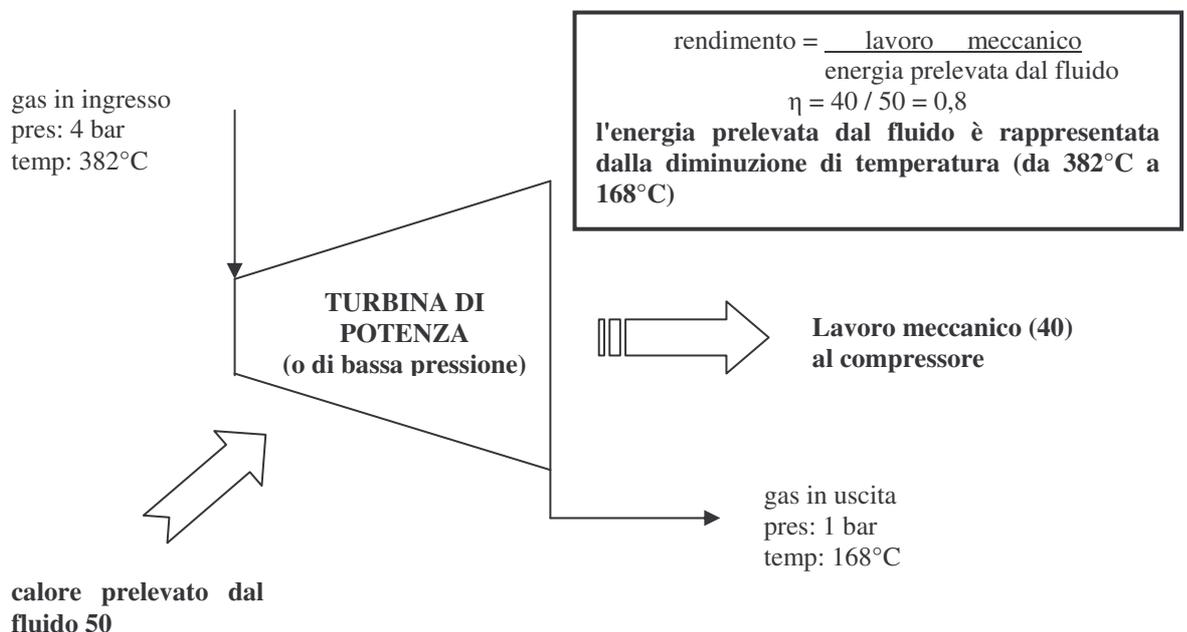


Figura 8: Schema per turbina bassa pressione

³ Si definisce *creep* il fenomeno dello scorrimento viscoso dei solidi alle elevate temperature: si suppone che durante il funzionamento la paletta si deformi allungandosi; quando l'allungamento supera un certo limite va sostituita.

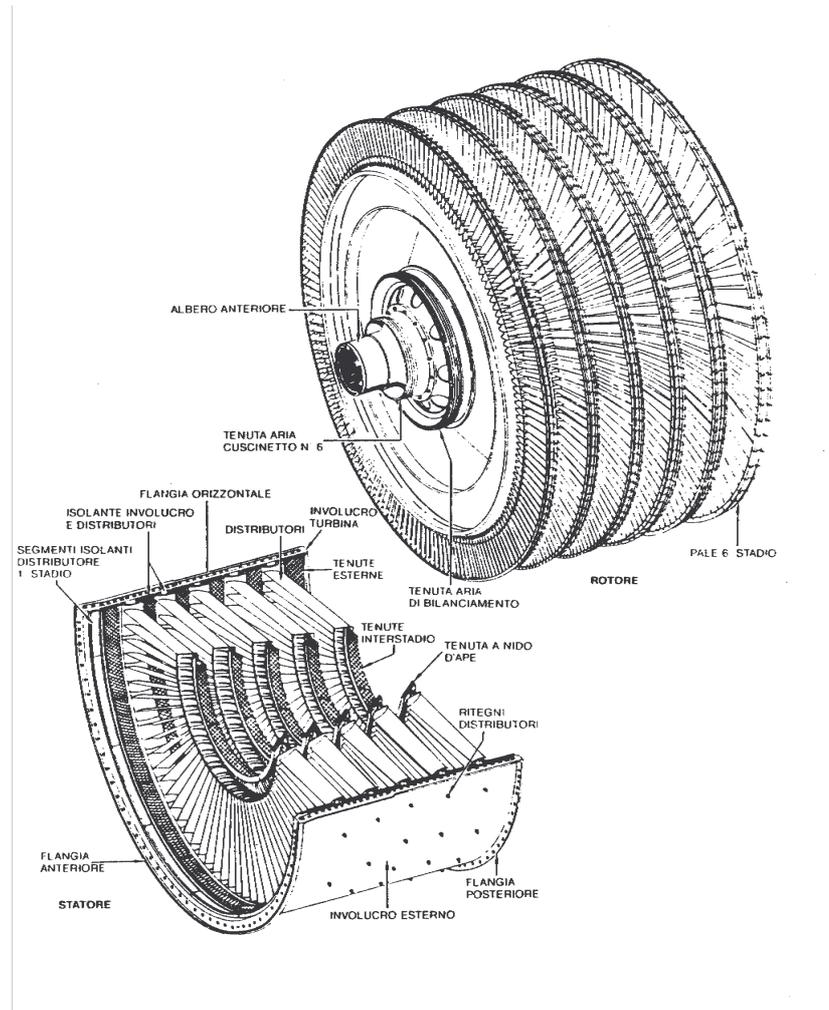


Figura 9: Turbina di potenza

Sebbene le temperature non siano in grado di sollecitare termicamente in modo eccessivo il materiale delle palette, non di meno le maggiori dimensioni della palettatura comportano una maggiore forza centrifuga che tende a strappare la paletta dal suo ancoraggio; la turbina di potenza deve essere disegnata prestando estrema attenzione al fatto che le palette non si deformino durante l'utilizzo e quindi non vi sia un'alterazione dei percorsi dei gas che provochi una drammatica perdita di rendimento.

Si noti inoltre come i gas che lasciano la turbina di potenza siano a temperatura maggiore di quella dell'aria in aspirazione, nell'esempio esposto la temperatura è di 168°C rispetto ai 30°C dell'aria in ingresso; tale differenza è il calore Q_2 scambiato con la sorgente fredda che, come nel caso del motore diesel, è l'atmosfera stessa.

La figura (10) rappresenta una sezione di turbogas Rolls Royce Proteus 1275 (utilizzata, in passato, sugli aliscafi della classe Sparviero come motore primo dell'idrogetto): si notino le forti variazioni di temperatura, indice di variazioni energetiche, che avvengono nel fluido dall'aspirazione (a temperatura di 15°C) fino allo scarico (alla temperatura di 477°C).

Si noti come la potenza assorbita dal compressore, 7528 Hp, indica energia che viene data all'aria comprimendola ma soprattutto elevandone la temperatura: essa infatti passa da 15°C a 282°C a fronte di un aumento di pressione piuttosto modesto (da 1 a 7,3 bar); è questo aumento di temperatura che rende la macchina così economicamente poco vantaggiosa.

Inoltre la variazione di temperatura nel fluido indica quanta energia viene scambiata e *in che direzione*: se la temperatura aumenta l'energia viene *data al* fluido dall'esterno, se diminuisce è il fluido che *cede energia* all'esterno.

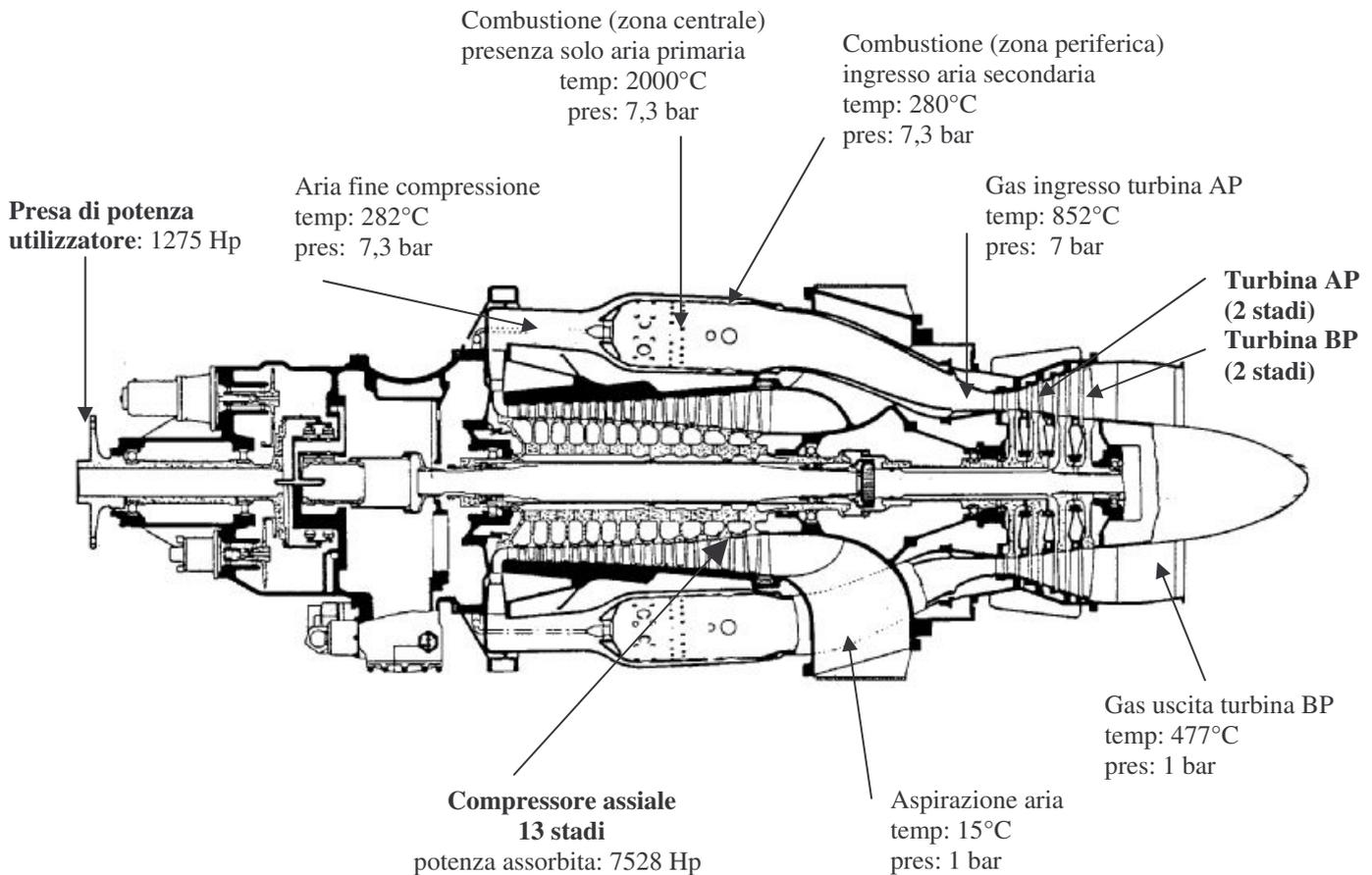


Figura 10: **Turbina marina RR Proteus 1275**

La turbina Proteus fu una delle prime TAG "marinizzate" ovvero motori aeronautici adattati all'uso navale: si notino le due turbine di alta e bassa pressione, con gli alberi coassiali (l'albero della turbina di potenza è quello più interno), la grande differenza fra la potenza assorbita dal compressore (7528 Hp) e quella disponibile all'esterno (1275 Hp)⁴, l'elevata temperatura dei gas in uscita (477°C) indice di un rendimento non brillante e quindi di elevati consumi.

Si notino anche le differenze tra la temperatura centrale di combustione (2000°C) e quella della periferia (280°C), dovuta all'iniezione dell'aria secondaria che stabilizza la combustione e protegge le pareti della camera di combustione stessa: l'aria primaria rappresenta il 33% della portata totale dell'aria, l'aria secondaria il 67%.

La T.A.G. GE LM 2500 è dotata, inoltre, di un certo numero di apparati ausiliari come la pompa alimento gasolio, la pompa di lubrificazione principale, il motore pneumatico di avviamento, il regolatore di giri (o governor), e la logica di controllo e sorveglianza; poiché i turbogas utilizzati nella propulsione navale derivano dalle turbine aeronautiche essi sono, in linea generale, autonomi dal punto di vista delle funzioni ausiliarie: infatti tutte le pompe ausiliarie della macchina (pompa combustibile, pompa lubrificazione etc.) sono mosse dall'asse del generatore di gas attraverso un

⁴ Si noti come la potenza utile prodotta, quella utilizzabile dall'utente, sia solamente il 14% della potenza totale prodotta dalle due turbine, di alta e bassa pressione, della macchina.

sistema di ingranaggi situato in un contenitore apposito posto sotto la turbina e detto, per l'appunto, *scatola ingranaggi*.

La figura (11) indica alcuni dei principali ausiliari che compongono il sistema LM 2500 utilizzato dalla Marina Militare: il *modulo di comando*, che di fatto gestisce la macchina attraverso un complesso sistema di procedure normalmente (ma non necessariamente) con il concorso dell'opera-

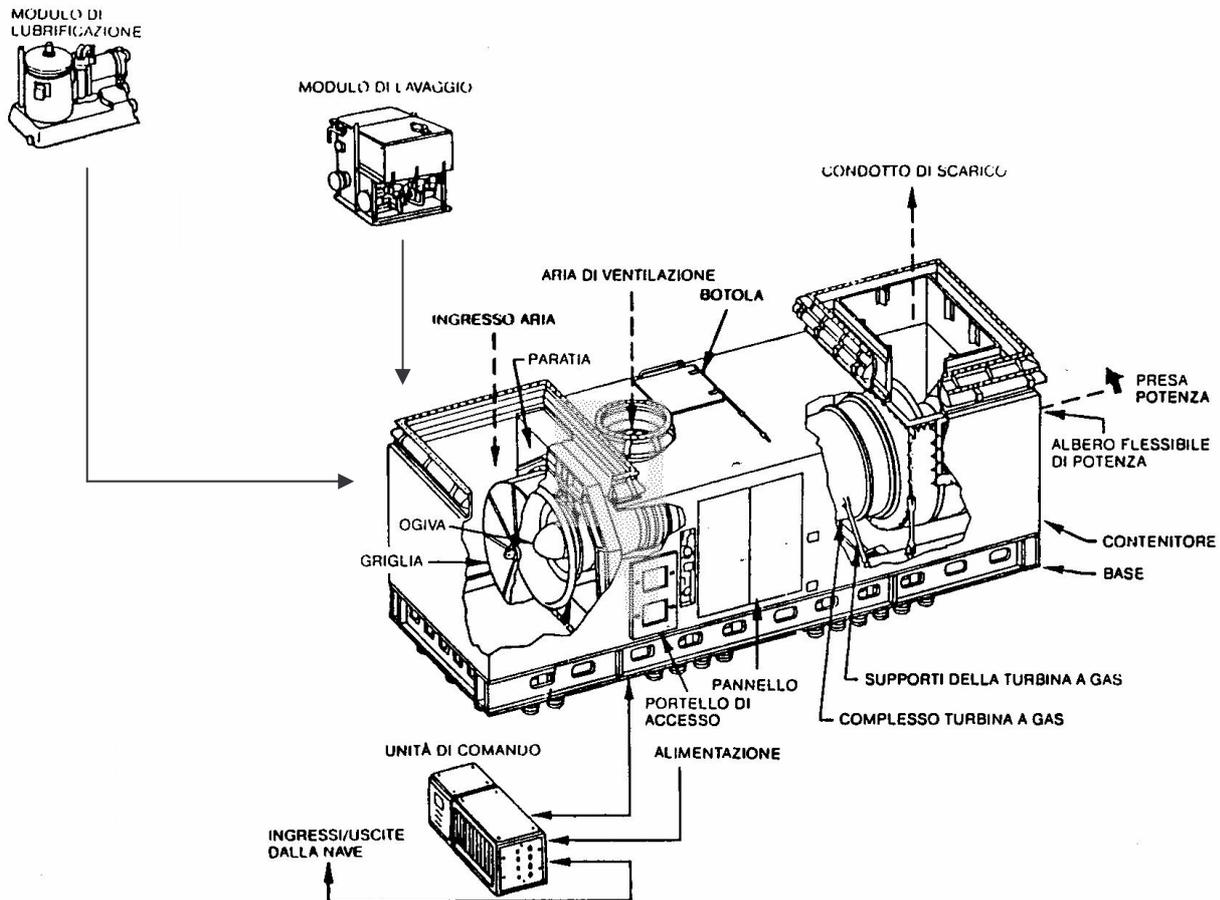


Figura 11: Ausiliari della TAG LM2500

tore umano, tramite l'interfaccia del sistema di comando e controllo, il *modulo di lubrificazione*, che contiene il serbatoio dell'olio lubrificante, lo scambiatore di calore per il suo raffreddamento e il sistema di filtraggio ed il *modulo di lavaggio*, utilizzato per lavare le palette del compressore e della turbina di alta pressione, pulendoli da eventuali depositi salini e residui di combustione ne comprometterebbero l'efficienza aerodinamica ed il rendimento, con conseguente aumento dei consumi.

ELEMENTI DI CONFRONTO TRA IMPIANTI

Le T.A.G. si sono imposte, negli ultimi vent'anni come l'apparato motore militare per eccellenza, poiché la gran parte delle navi militari utilizza tale sistema, mentre il suo utilizzo da parte delle marine mercantili è ancora piuttosto limitato, sostanzialmente a causa degli elevati costi di gestione che ne hanno fino ad ora condizionato l'installazione.

Nonostante ciò ne abbia dunque condizionato l'applicazione quindi ove siano stati considerati preminenti, la T.A.G. si è imposta invece dove siano richieste prestazioni elevate, alle volte

estreme, in termini di potenza, coppia e risposta, coniugate con ingombri in termini di volumi e di pesi molto contenuti.

Le T.A.G non sono resistenti come gli impianti a vapore ed i motori diesel, anzi, a differenza di questi si è visto che nascono con dei limiti di vita, espressi in ore di funzionamento, ben definiti e non molto elevati; ciò nonostante l'estrema compattezza della macchina e la modularità spinta permette di intervenire con sostituzioni anche radicali in tempi estremamente contenuti, sebbene con costi non trascurabili.

Inoltre l'automazione che sovrintende alla turbina è più sofisticata di quella sia dei motori diesel che degli impianti a vapore, rendendo impossibile la conduzione della macchina oltre un certo grado di degradazione dell'impianto; per di più il sistema è sensibile al buon funzionamento della rete di alimentazione elettrica e quindi, sebbene sia dotato di gruppi di continuità, non può prescindere dalla presenza di alimentazione per oltre un certo tempo.

Di contro la turbina necessita di pochissime persone per la conduzione, è virtualmente autonoma e l'operatore ha il solo compito di impostare la velocità di rotazione richiesta e di intervenire all'atto dell'avviamento e della fermata, oltre che in circostanze imprevedibili; anche la manutenzione è estremamente ridotta a paragone degli altri impianti da cui le esigenze di personale sono ridotte al minimo, sicuramente inferiori anche all'impianto diesel.

La turbina a gas è sicuramente il meno flessibile tra gli apparati considerati, anche per la sua natura di macchina completamente assemblata: ogni avaria si verifichi all'interno del generatore di gas o della turbina di potenza è potenzialmente critica, ovvero in grado di pregiudicarne totalmente il funzionamento; va però aggiunto che l'assenza di parti in moto alternativo, l'estrema cura nel progetto, dovuta anche alla sua derivazione aeronautica, l'affidabilità raggiunta dai costruttori, ha garantito, fino ad ora, una elevatissima sicurezza di funzionamento.

La turbina ha il limite di dover utilizzare, a meno di non alterare completamente lo schema di funzionamento fino ad ora delineato, un combustibile leggero, in grado di mescolarsi in modo molto completo con l'aria in tempi sostanzialmente brevissimi, capace di bruciare in modo rapido ed omogeneo senza creare depositi carboniosi o di altra natura che, depositandosi sulle pale, deformino il canale di passaggio dei gas, erodano le palette o ne minino la resistenza strutturale. Per questo motivo le Marine NATO utilizzano un gasolio leggero, denominato F-76, il che ha penalizzato, per questioni di omogeneità, anche apparati motori che, come quello a vapore o quello diesel, potrebbero utilizzare combustibili più pesanti ma anche più economici.

Inoltre il grande limite della T.A.G. è, come si è detto, il consumo specifico, che tende ad aumentare drammaticamente al diminuire della potenza erogata e che, in ogni caso, è sostanzialmente superiore a quello degli altri impianti fino ad ora visti.

I rapporti peso/potenza e volume/potenza della T.A.G. è sicuramente quello più favorevole in senso assoluto, permettendo l'installazione di potenze considerevoli in spazi estremamente limitati, improponibili per gli altri impianti; inoltre essa richiede un tempo minimo per essere avviata e posta sotto carico, valutabile in pochi minuti il che permette una flessibilità operativa enorme e che, in alcuni casi, può divenire fondamentale.

La T.A.G. è molto sensibile alle condizioni esterne ed, in particolare, alla temperatura dell'aria, notevolmente più sensibile del diesel e dell'impianto a vapore; inoltre è sensibile anche alla purezza dell'aria in aspirazione ed ai depositi salini che si possono venire a formare nelle condotte, mentre invece è praticamente insensibile al passaggio su bassi fondi od acque fluviali.

Come la turbina a vapore, la T.A.G., produce il massimo della coppia a giri zero, da cui non esiste, almeno in teoria, un valore minimo di rotazione *della turbina di bassa pressione*: questo rende la macchina capace sia di operare rimorchi senza andare in sovraccarico che di avere una rapidissima risposta, ovvero la capacità di passare da un carico inferiore ad uno anche molto superiore in un tempo molto inferiore di quello degli altri apparati.

Analogamente alla T.A.V., la turbina a gas è una macchina irreversibile da cui la marcia indietro non è ottenibile direttamente dalla macchina stessa: poiché la T.A.G. si è evoluta mentre veniva perfezionato il sistema delle eliche a passo orientabile, la soluzione naturale è stata

l'adozione di tale sistema per la marcia indietro; a differenza dell'impianto a vapore che generalmente utilizza una piccola turbina per l'inversione del moto, la T.A.G. esprime la stessa potenza in entrambi i sensi, da cui la manovra con questo tipo di macchine è molto veloce ed estremamente precisa.

La T.A.G. è, infine, una macchina sostanzialmente facile da condurre, il cui limite rappresentato dal non poter essere condotta in manuale è ampiamente compensato dall'affidabilità fino ad ora dimostrata, dalla necessità di poco o nullo personale; inoltre è sostanzialmente meno pericolosa di un impianto a vapore, più facile da tenere sotto controllo anche di un motore diesel, ed in grado di assorbire le variazioni di carico in modo molto elastico e pronto.

Dimensioni dell'apparato	Estremamente contenute anche per le macchine più grandi e potenti
Peso dell'apparato	Estremamente contenuto anche per le macchine più grandi e potenti
Prontezza della risposta	Elevata: può esprimere la massima coppia a giri zero (come l'impianto a vapore)
Tempo di approntamento	Basso; da disapprontato a pronto a muovere in 10 minuti
Costo di acquisizione	Elevato; richiede elementi di altissima tecnologia e sistemi di controllo sofisticati come hardware e software. Estremamente elevato per i nuovi modelli.
Costo di utilizzo Consumo specifico Tipo di combustibile	Elevato; consumo molto consistente di combustibili e lubrificanti Elevato; consumo consistente, molto elevato ai bassi carichi. Gasolio di qualità molto elevata, trattato e depurato anche a bordo.
Costo di gestione Quantità e qualità di personale	Elevato; nell'insieme richiede manutenzioni abbastanza frequenti e molto onerose (sostituzioni di parti, anche molto costose) Richiede poco personale ma di elevata qualità (soprattutto per la parte automazione)
Costo di manutenzione Vita totale	Elevato; richiede manutenzioni abbastanza frequenti e pp.dd.rr. di costo molto elevato Media; dopo 40.000 ore è più conveniente sostituirlo.
Affidabilità	Molto elevata
Vulnerabilità	Media; gli apparati sono di dimensioni contenute, ma dipende molto dalla alimentazione elettrica.
Funzionamento degradato	Praticamente nullo; essa è conducibile solo dal sistema di controllo
Impatto operativo	Medio; è l'apparato più silenzioso, con signature IR piuttosto limitate

LE FUTURE EVOLUZIONI

L'imporsi del turbogas come apparato motore propulsivo delle unità navali, soprattutto militari, ha innescato una forte ricerca tecnologica che ha come scopo quello di ampliare la scelta del potenziale cliente ed offrire prodotti sempre più vicini alle esigenze della propulsione navale: lentamente ma inesorabilmente le TAG per la propulsione navale iniziano a staccarsi da quelle per usi aeronautici e mentre in precedenza erano ottenute da queste direttamente, ora iniziano ad essere direttamente progettate e realizzate per tale scopo.

Facendo riferimento alla figura (12) si nota come nella realizzazione aeronautica classica si opera con diluizioni estremamente elevate, possibili perché l'utilizzatore è un ugello: nel caso navale l'utilizzatore è la turbina di bassa pressione e quindi parte del turbofan deve essere eliminato perché inutile; questo comporta che la turbina marinizzata, nascendo per un funzionamento notevolmente diverso, paghi sempre, in qualche aspetto, questa sua genesi da macchine ottimizzate per altri scopi, normalmente la penalizzazione maggiore si ha sulla potenza e sul consumo.

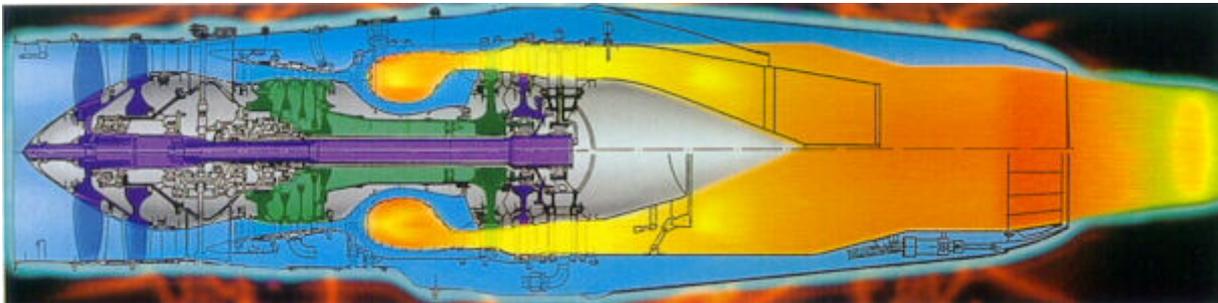


Figura 12 : Schema turbofan russo RD-1700

Il costo delle ricerche per le tecnologie necessarie a sviluppare nuovi prodotti è tale che il campo navale è dominato da pochi grandi produttori che hanno completamente sbaragliato la concorrenza dei gruppi minori: questi grandi gruppi hanno sostanzialmente focalizzato la propria attenzione sui seguenti parametri:

- dimensioni e pesi sempre più contenuti
- potenze sempre maggiori
- consumi sempre più limitati
- affidabilità sempre maggiore

Forte della propria lunga tradizione di progettazione, costruzione e commercializzazione, la GE ha iniziato a sviluppare turbogas alternativi derivanti dagli stessi motori aeronautici che hanno portato alla realizzazione della LM 2500, sicuramente la più fortunata tra le macchine prodotte dalla GE, adottata dalla quasi totalità delle marine militari occidentali. Nella figura (13) si nota la derivazione del turbogas LM 2500 dal motore aeronautico TF 39 / CF 6 - 6; dallo stesso motore la GE ha ricavato il turbogas LM 2500+, che con i suoi 40.500 Hp e rendimento termodinamico del 39% (contro i 33.600 Hp e rendimento del 38% della LM 2500), ottenute con dimensioni sostanzialmente identiche, si



Figura 13: Derivazione aeronautica famiglia LM 2500

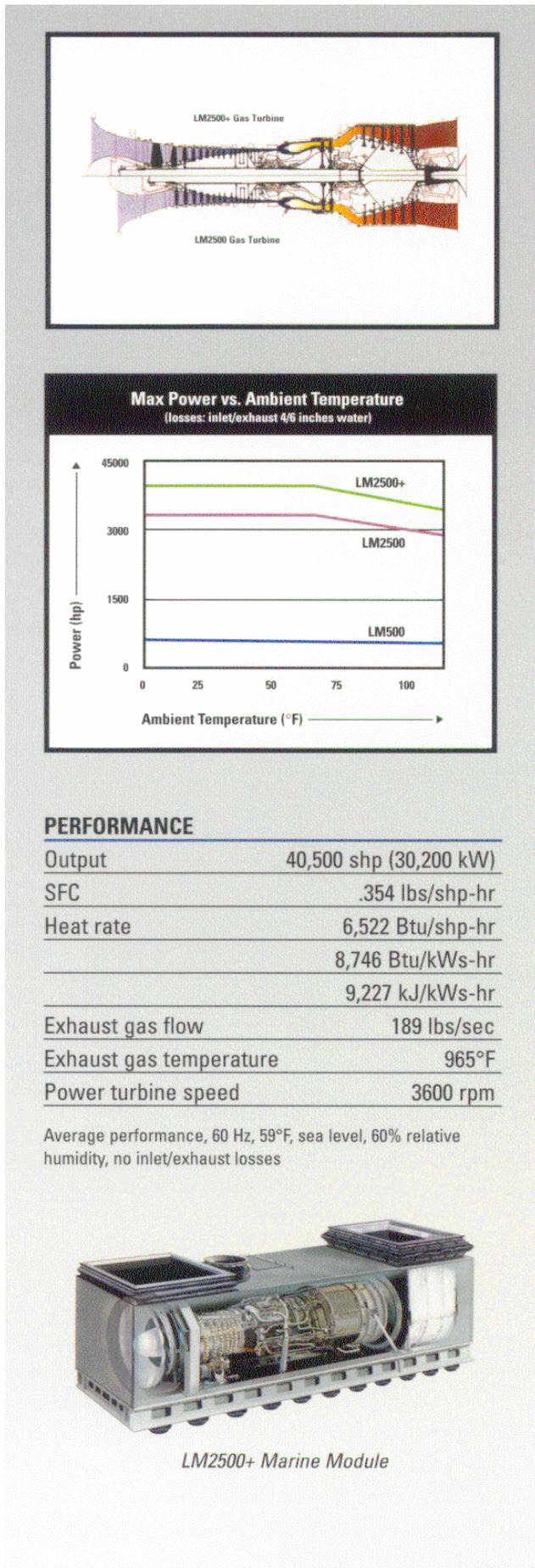


Figura 15: Caratteristiche LM 2500+

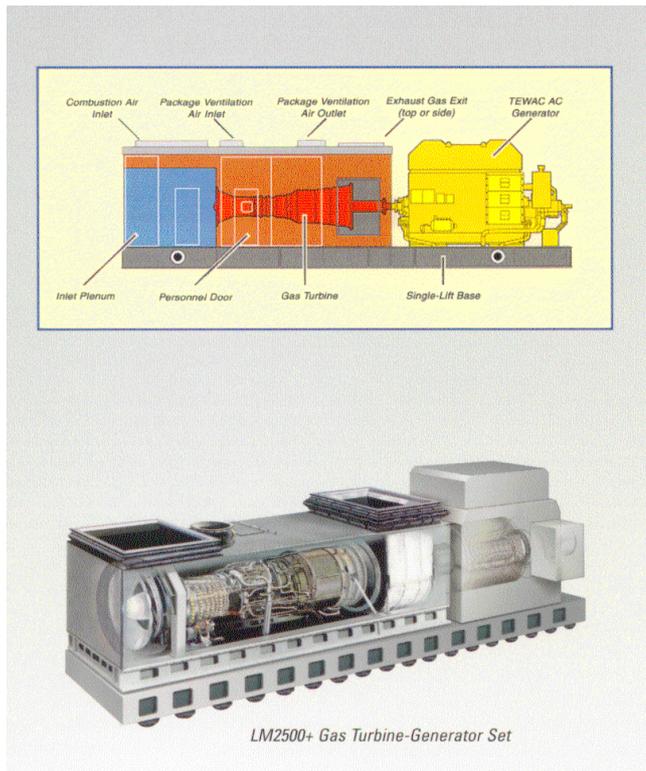


Figura 14: Set generatore LM 2500+

propone di ripetere l'enorme successo commerciale avuto dalla LM 2500.

Nella figura (15) sono riportate alcune curve caratteristiche delle macchine, in particolare la dipendenza dalla temperatura d'aspirazione (notare come le macchine perdano potenza quando questa supera i 70°F ovvero 21°C) e si noti come la temperatura di scarico sia ancora considerevolmente alta (518°C).

La GE considera il proprio punto di forza la grande potenza specifica su peso e volume della macchina, la sua grande affidabilità dovuta alla derivazione da un modello precedente testato e provato per un numero estremamente grande di ore di moto.

Rimane sempre lo spinoso problema dei consumi specifici che tendono ad aumentare in modo considerevole con la variazione in diminuzione del numero di giri della macchina: la soluzione proposta dalla GE è quella della propulsione TAG-elettrica, con un gruppo generatore, come evidenziato nella figura (14): tale sistema permetterebbe di sommare il carico propulsivo con quello elettrico ed avere in funzione un numero di macchine tali da lavorare sempre molto vicine al carico di progetto, facendole lavorare quindi nella zona di minore consumo specifico.

Il problema del contenimento dei consumi è però

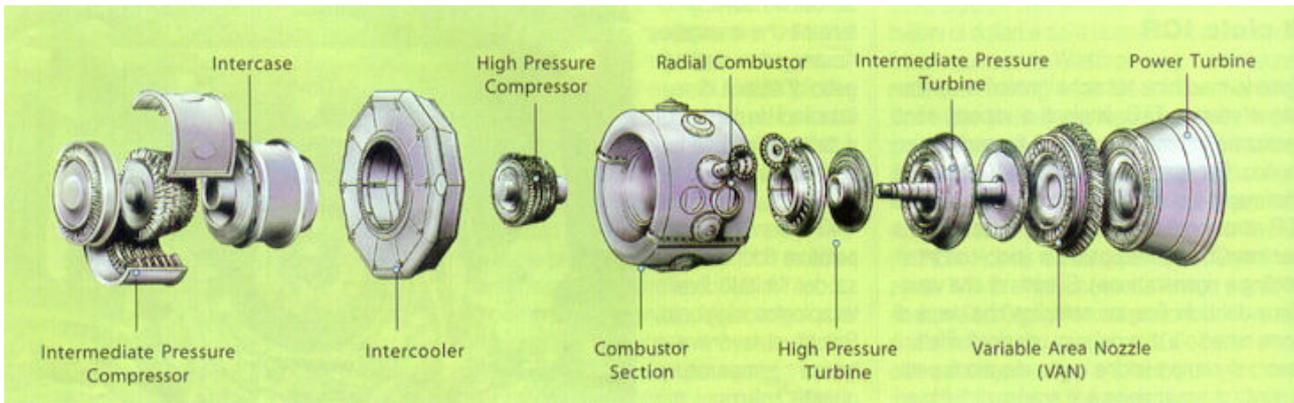


Figura 16: Esploso TAG RR WR-21

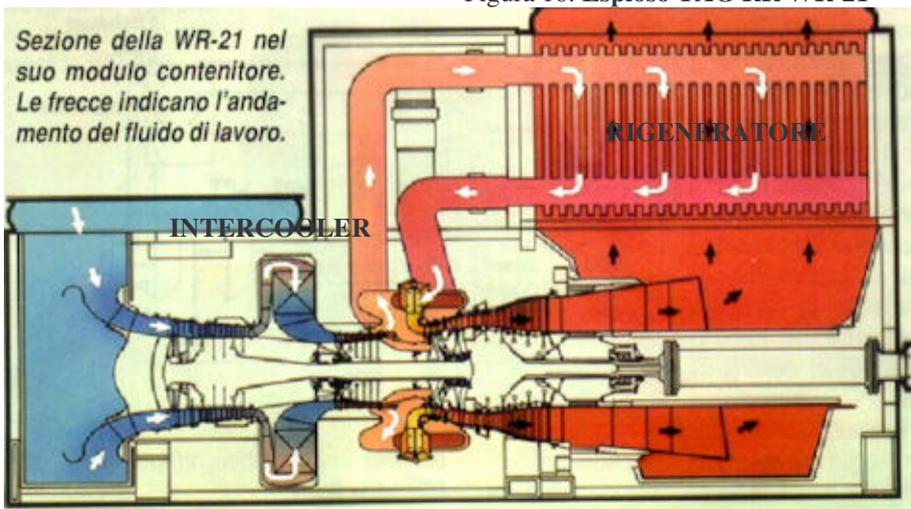


Figura 17: Sezione TAG RR WR-21

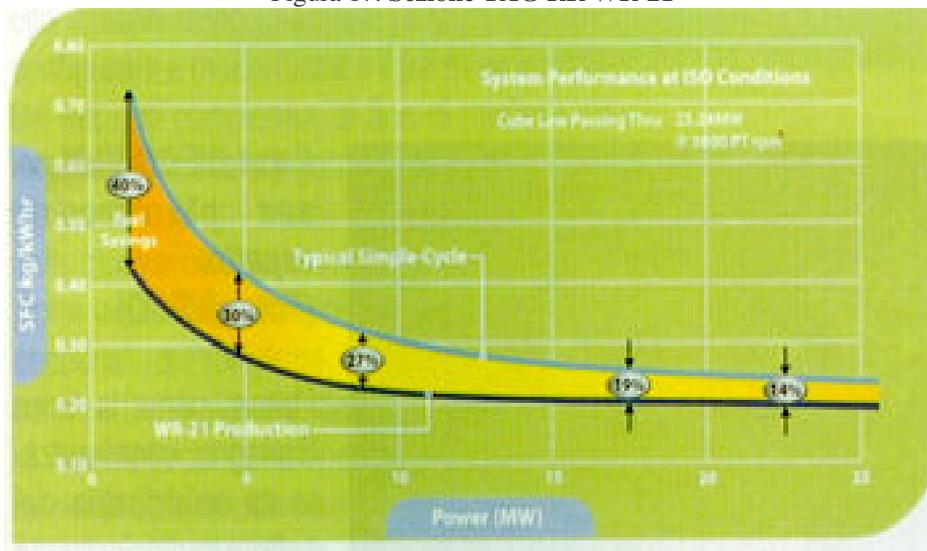


Figura 18: Curva consumi TAG RR WR-21

scarico) questo scambiatore di calore viene detto rigeneratore; il risultato è una consistente riduzione dei consumi specifici, come riportato nella figura (18): da un risparmio di circa il 14% in condizioni di pieno carico (a circa 30 MW, ovvero confrontandola con la TAG LM 2500 che, per il grande successo commerciale è la macchina di riferimento) si arriva ad un abbattimento dei consumi specifici del 30-40% per ratei di potenza inferiori al 25%: come si può immaginare, queste performance rendono la RR WR-21 una macchina senza pari nel campo della propulsione navale e costituirebbe una svolta epocale nel campo della propulsione navale.

un problema molto sentito nella progettazione delle TAG, tanto sentito che ha spinto una grande società produttrice, la Rolls Royce, a sviluppare un progetto il cui punto focale, è appunto, il contenimento dei consumi. La Rolls Royce ha sviluppato il turbogas WR-21, i cui elementi qualificanti sono l'intercooler ed il rigeneratore, indicati nella figura (17); l'intercooler è posto tra i due compressori di bassa ed alta pressione, ed il suo scopo è quello di raffreddare l'aria compressa dal primo dei due; dopo il secondo stadio di compressione l'aria passa attraverso il rigeneratore ove riceve calore da parte dei gas combusti in uscita: in pratica la rigenerazione equivale ad una prima camera di combustione ove il riscaldamento è ottenuto a costo zero (ovvero viene recuperata parte dell'energia che andrebbe perduta allo

Attualmente i dati rivelati dalla Rolls Royce sono estremamente incoraggianti dal punto di vista del contenimento dei consumi, interessanti dal punto di vista dei pesi e degli ingombri, un po' meno dal punto di vista dell'affidabilità strutturale; tali dati, però, dai quali sono stati tratti queste poche righe, sono largamente incompleti soprattutto per la presenza del segreto militare: infatti La Rolls Royce ha ricevuto ingenti fondi dallo stato britannico per lo studio della WR-21, per cui i risultati non vengono condivisi.

Sostanzialmente la WR-21 nasce come una evoluzione della LM 2500: la macchina dovrebbe avere ingombri e pesi comparabili, potenze all'incirca molto simili e consumi molto più contenuti; allo stato attuale la WR-21 è una macchina considerevolmente più complessa della LM 2500: si consideri la figura (16) in cui si notano i due compressor (intermediate pressioni e high pressioni) e le tre turbine (high pressioni, intermediate pressioni e power turbine); la macchina è maggiormente complessa e quindi sostanzialmente meno affidabile, anche per la sua natura prototipica.

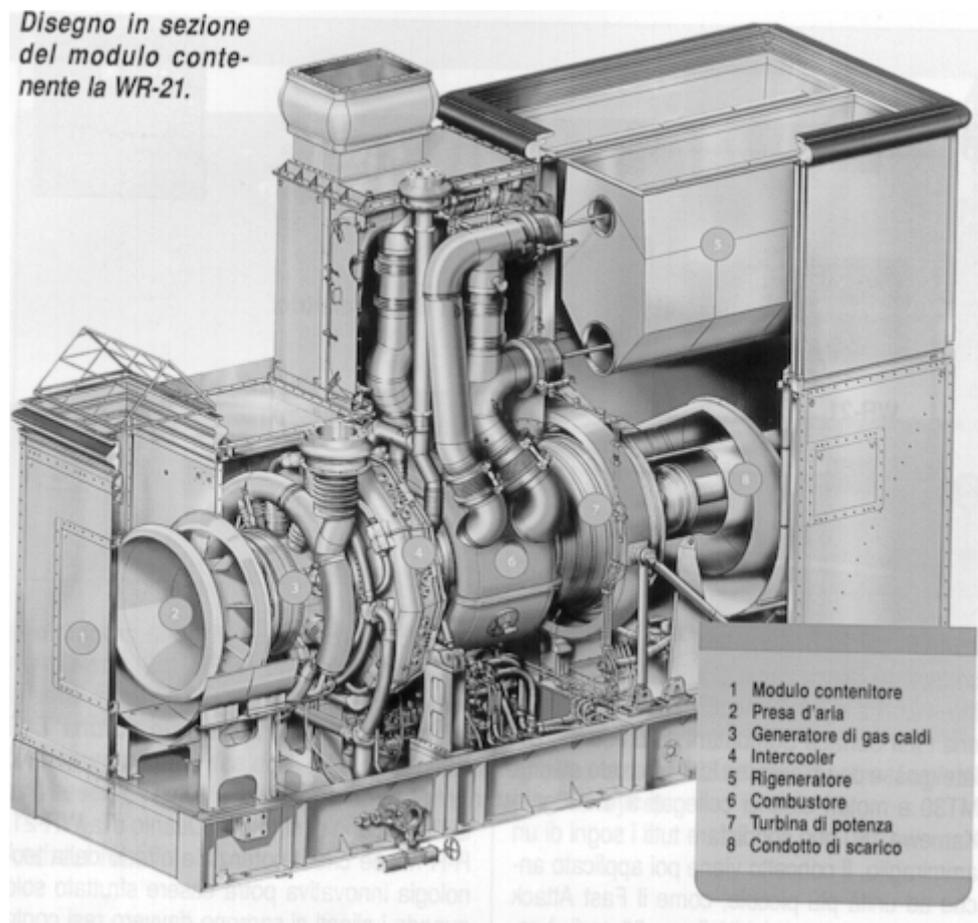


Figura 19: Disegno del modulo WR-21

8. RIDUTTORI, LINEE D'ASSI E GIUNTI

Gli apparati motori visti fino ad ora producono potenza con peculiari caratteristiche tra le quali è fondamentale la velocità di rotazione; nella sottostante tavola vengono riportati esempi di valori di velocità di rotazione di vari apparati, tenendo ben presente che tali valori sono indicativi della categoria e non possono essere associati a nessun tipo di motore in particolare.

TIPO DI APPARATO MOTORE	NUMERO DI GIRI
<i>Apparato a vapore (turbina di alta pressione)</i>	6000 r.p.m.
<i>Apparato a vapore (turbina di bassa pressione)</i>	4000 r.p.m.
<i>Motori diesel veloci</i>	da 1200 a 1800 r.p.m.
<i>Motori diesel "medium speed"</i>	da 400 a 800 r.p.m.
<i>Motori diesel lenti (2 tempi)</i>	< di 200 r.p.m.
<i>Turbine a gas</i>	da 3600 a 4000 r.p.m. (asse uscita di potenza)
<i>Motori elettrici sincroni a controllo di frequenza</i>	< di 300 r.p.m.
<i>Motori elettrici in corrente continua</i>	< di 300 r.p.m.

L'elica navale opera generalmente fino ai 400 r.p.m., ed in particolare si nota come maggiori sono le sue dimensioni e minore è la velocità di rotazione massima: appare chiaro, quindi, che la maggior parte degli illustrati nella tabella precedente non potranno essere direttamente accoppiati all'asse ma necessiteranno di un sistema che trasmetta la potenza richiesta con caratteristiche tali da poter essere sfruttata dall'elica stessa altrimenti, in caso contrario, si avrà il già citato fenomeno della cavitazione con conseguente crollo del rendimento dell'elica e possibili danni all'impianto stesso.

Si può notare come le costruzioni mercantili, generalmente di dimensioni superiori a quelle militari medie, utilizzino delle eliche di maggiori dimensioni, mentre le navi militari siano dotate di eliche più piccole e più veloci; le eliche delle mercantili vengono definite a bassa velocità di rotazione, quelle militari ad alta rotazione.

Questa diversità è sostanzialmente dovuta alle dimensioni molto diverse delle due categorie: sostanzialmente le dimensioni dell'elica sono limitate dalle dimensioni della volta di poppa ovvero dalla larghezza e dall'immersione e maggiori sono queste, maggiore può essere il diametro dell'elica. Chiaramente le navi militari tendono ad essere di dimensioni più contenute rispetto a quelle mercantili e quindi, per necessità, adottano eliche di piccolo diametro ed alta velocità di rotazione.

In ogni caso, qualunque sia l'apparato motore prescelto, è necessario procedere al buon accoppiamento tra l'apparato motore e l'elica allo scopo di impiegare *con il massimo rendimento*¹ la potenza prodotta dall'apparato stesso: tale operazione viene generalmente eseguita tramite il *riduttore di giri* (o, semplicemente, *riduttore*).

Riferendoci alla precedente tabella, ci si può rendere conto come l'accoppiamento diretto motore-elica sia possibile nel caso dei motori diesel lenti due tempi ed in quello dei motori elettrici, sia in quelli sincroni a controllo di frequenza che in quelli a corrente continua: tali soluzioni, che hanno il considerevole vantaggio di evitare la complicazione del riduttore, sono già estesamente utilizzate in marina mercantile (motori diesel lenti), nella propulsione dei sommergibili (motori in continua) ed è oggetto di una costante evoluzione e di una sempre maggiore applicazione nelle unità di superficie dell'uno o dell'altro tipo (motori sincroni con controllo di frequenza); negli altri casi l'uso del riduttore è inevitabile.

¹ Per massimo rendimento dell'elica si intende il rapporto tra la potenza che l'elica esprime sotto forma di spinta e quella che riceve dall'asse.

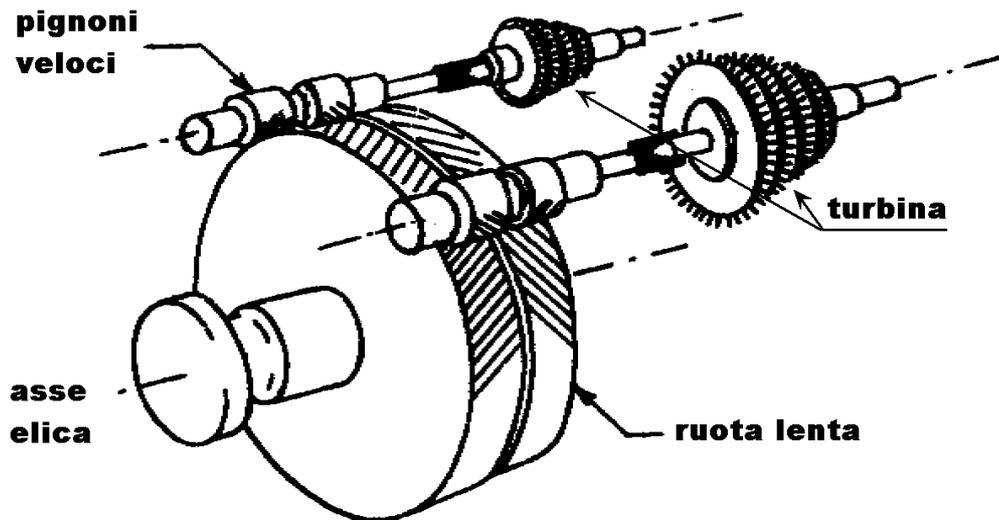


Figura 1: Gruppo riduttore

Il riduttore è sostanzialmente un accoppiamento di ruote dentate, ove quella relativa all'asse nel quale viene introdotta la potenza motrice viene definito *pignone* mentre quella relativa all'asse condotto viene detta *ruota*; nella figura (1) è rappresentato un *riduttore a singola o semplice riduzione* (ovvero formato da un solo accoppiamento pignone-ruota) con i due ingressi per le turbine di alta e bassa pressione di un impianto a vapore.

Si definisce *rapporto di riduzione* τ il rapporto fra i diametri della ruota e del pignone ovvero:

$$\tau = D_R / D_P = N_P / N_R$$

notare che il rapporto di riduzione è anche eguale al rapporto tra il numero di giri del pignone e quello della ruota: la ruota ha diametro maggiore e gira a velocità di rotazione inferiore.

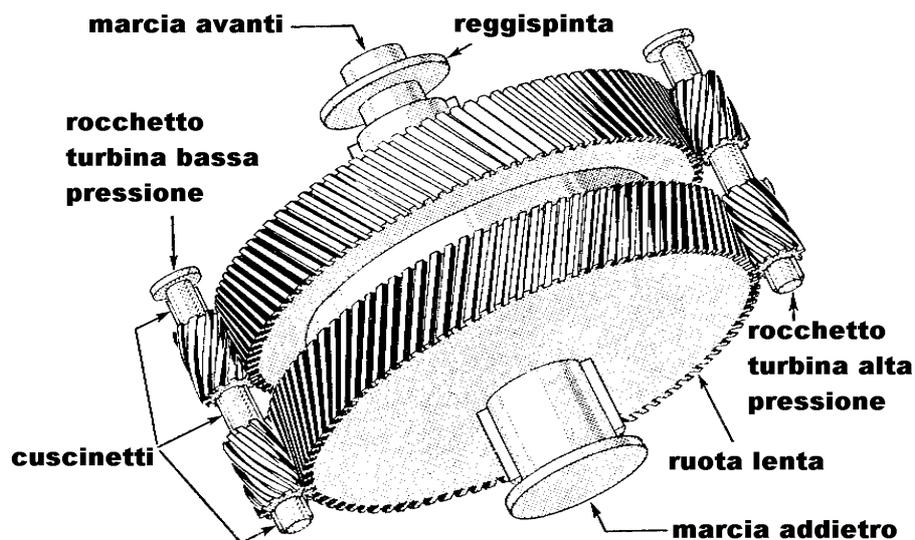


Figura 2: Riduzione semplice

La realizzazione tecnica del riduttore è estremamente complessa: in primo luogo il rapporto tra i diametri non è solo vincolato dal rapporto di riduzione ma anche dalle dimensioni del dente e quindi

dalla potenza che deve essere trasmessa; inoltre il rapporto di riduzione non può essere eccessivamente grande per non comportare delle dimensioni della ruota eccessive: se supponiamo di voler accoppiare una turbina di alta pressione da 6000 r.p.m. massimi ad una elica navale il cui regime di rotazione massimo è 300 r.p.m., allora si ha che $\tau = 20$; supponendo di avere un diametro del pignone di 0,7 m, la ruota verrebbe ad avere un diametro di 14 m, il che la renderebbe non solo difficile da alloggiare a bordo ma anche impossibile da costruire.

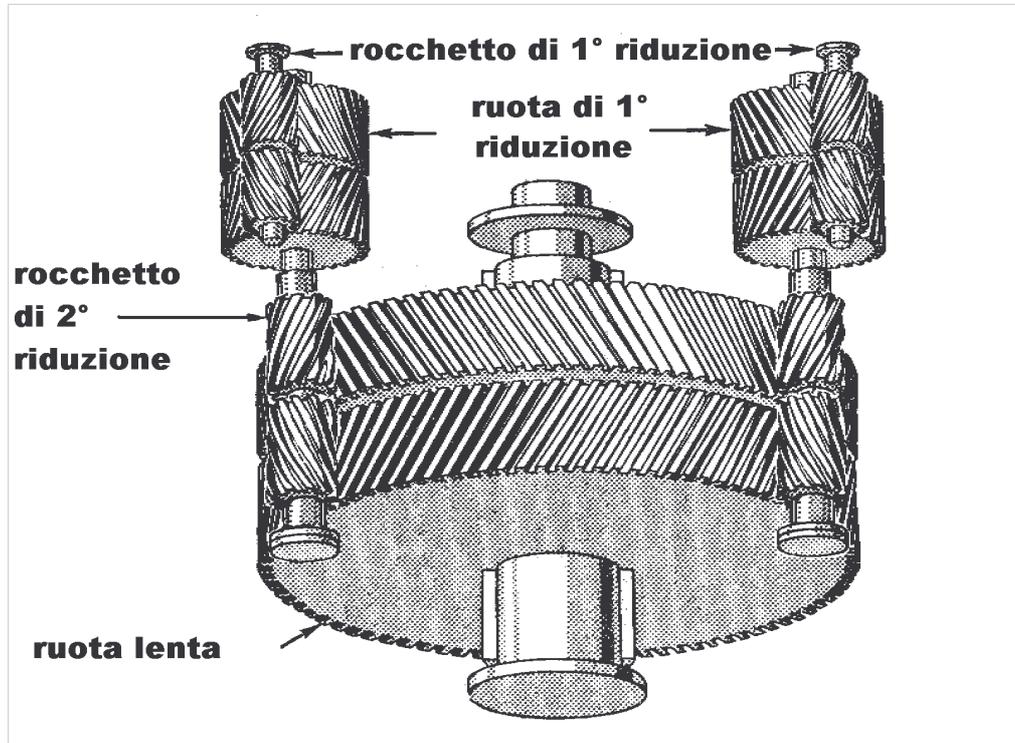


Figura 3: Doppia riduzione

Per ovviare a tale inconveniente si opera in modo da suddividere il rapporto di riduzione su più accoppiamenti: il rapporto di riduzione totale sarà il prodotto dei due rapporti di riduzione parziali; nel caso in esempio, se si decide di operare con due accoppiamenti $\tau_1 = 4$ e $\tau_2 = 5$ il rapporto di riduzione sarà $\tau = 5 \cdot 4 = 20$; tale scelta permette di contenere le dimensioni delle ruote di 1^a e 2^a riduzione: considerato sempre 0,7 m il diametro di entrambi i pignoni, la 1^a ruota avrà diametro 2,8 m e la 2^a 3,5 m, rendendo accettabile l'ingombro e possibile la costruzione.

Possiamo comprendere come maggiore sia il rapporto di riduzione totale maggiore sia la complicazione ed il costo del riduttore: un apparato motore diesel semiveloce, come ad esempio quello utilizzato sulle L.D.P. necessiterà di un riduttore con rapporto di riduzione limitato (da 1,5 a 2,5) realizzabile con un singolo accoppiamento; un apparato basato invece su diesel veloci, come ad esempio quello delle corvette classe Minerva, sarà sempre composto da una sola riduzione, ma con rapporto più elevato (da 4 a 6): anche l'ingombro sarà maggiore rispetto al precedente come pure il costo.

Si deve osservare che oltre al rapporto di riduzione è importante la valutazione della potenza convertita: generalmente i motori diesel impiegati in Marina Militare hanno una potenza massima esprimibile dai 4.000 agli 8.000 CV.

Nel caso in cui si desiderino utilizzare impianti basati su T.A.G. (come nel caso delle Maestrale, dei De La Penne, del Garibaldi) non solo il rapporto di riduzione sarà più elevato (tra 10 ed 12) ma anche la potenza convertita sarà assolutamente maggiore: 25.000 CV; di conseguenza non solo il riduttore sarà di maggiori dimensioni perché sarà necessariamente costituito da due riduzioni distinte, ma anche perché il dente dovrà essere in grado di resistere allo sforzo imposto dalla

trasmissione della potenza e quindi anche le dimensioni assiali delle ruote dovranno essere calcolate di conseguenza.

Infine il riduttore può essere dotato di più ingressi per la potenza prodotta: nel caso di un gruppo turboriduttore a vapore essa viene prelevata da due turbine, quella di alta e quella di bassa pressione, con regimi di rotazione diversi: nel caso della turbina di alta pressione generalmente il regime massimo è circa 6.000 r.p.m. comporterà rapporti di riduzione elevatissimi (da 18 a 22) che non solo imporranno grandi dimensioni delle ruote come diametro, ma anche come ingombro assiale, dovendo trasmettere potenze estremamente elevate (circa 37.500 CV per l'incrociatore Vittorio Veneto); l'incrociatore Garibaldi, nave basata su due impianti, ciascuno formato da due TAG da 20.000 CV, è dotata di un riduttore a doppia riduzione, due ingressi e dimensioni anche maggiori, dovendo trasmettere un totale di 40.000 CV.

Si è detto che la potenza viene trasmessa integralmente attraverso il riduttore: questo non è propriamente esatto, sebbene generalmente la macchina abbia un rendimento altissimo, dell'ordine del 98 o 99%; nella realtà una parte della potenza si perde nell'attrito dei cuscinetti che sostengono gli assi delle ruote e nel contatto fra i denti delle ruote stesse e tale potenza viene convertita in calore che deve essere asportato allo scopo di evitare pericolosi aumenti di temperatura

Per tale motivo i riduttori sono sempre dotati di un circuito di lubrificazione e raffreddamento, ove l'olio non solo entra nei cuscinetti ma viene anche spruzzato tra le ruote allo scopo di refrigerare i denti delle stesse; tale circuito è azionato da una pompa detta generalmente "pompa di lubrificazione del riduttore" che prima di inviare olio al riduttore stesso lo forza a passare attraverso un *refrigerante*, generalmente ad acqua di mare, ove l'olio stesso cede all'esterno il calore assorbito durante il passaggio tra i vari organi del riduttore.

L'importanza del raffreddamento dei vari organi non deve essere sottovalutata, da cui è importante che la temperatura dell'olio in uscita dal refrigerante sia sempre ad un livello tale da assicurare una corretta refrigerazione, generalmente tra i 30° - 40°C e che non si superino certi valori massimi all'interno del riduttore, che, per i cuscinetti, è di circa 80°C, temperatura alla quale il materiale del quale sono costituiti, detto *metallo bianco* (una lega di stagno, piombo, zinco ed antimonio dalle particolari caratteristiche antifrizione e dal tipico colore grigio tenue), inizia a perdere le proprie caratteristiche; per tale motivo ogni cuscinetto del riduttore è dotato di un proprio sistema di rilievo della temperatura in grado di rilevarne anomali aumenti dovuti, ad esempio, od ad un insufficiente flusso di olio od all'occasionale ostruzione di uno spruzzatore.

La potenza generata e successivamente trasformata dal riduttore deve essere portata all'elica e questo avviene mediante *l'asse*; normalmente l'asse ha sezione circolare cava e viene dimensionato allo scopo di essere in grado di trasmettere la coppia e di resistere alla spinta generata dall'elica stessa; poiché è di dimensioni consistenti, proporzionali alla potenza trasmessa, il suo proprio peso provocherebbe delle flessioni considerevoli, non sopportabili dalla struttura stessa ed è per questo motivo che è sostenuto in più punti da appositi *cuscinetti della linea d'assi*, realizzati in metallo bianco, lubrificati e refrigerati ad olio; anche nel caso del cuscinetto, una parte della potenza, anche se estremamente limitata, viene dissipata a causa dell'attrito di rotolamento tra l'asse ed il metallo bianco. Naturalmente tale potenza dissipata è funzione di quella trasmessa, da cui le necessità di raffreddamento dei cuscinetti varieranno a seconda della massima potenza trasmissibile dell'apparato considerato: per le corvette classe Minerva, la cui massima potenza trasmessa è di 12000 CV, il raffreddamento è per dissipazione nell'aria del locale, per cui il supporto del cuscinetto, nel quale si raccoglie l'olio, è dotato di alette di raffreddamento, mentre su caccia ed incrociatori, la cui potenza è generalmente superiore ai 15000 CV, all'interno del supporto vi è una serpentina refrigerante alimentata ad acqua di mare.

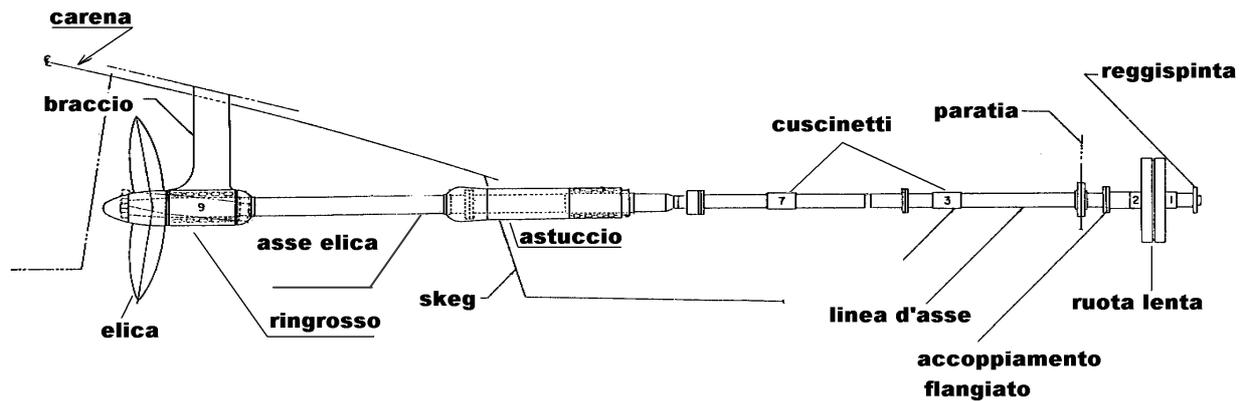


Figura 4: Linea d'assi

Anche i cuscinetti sono dotati di apposito sistema di rilevazione termometrico, inoltre il livello dell'olio deve essere sempre controllato, non solamente prima della partenza ma anche durante il moto; inoltre, sulle navi in cui la refrigerazione è ad acqua di mare, è necessario controllare che non vi sia contaminazione tra l'olio e quest'ultima: per tale motivo il cuscinetto è dotato, sulla sommità, di un vetrino spia attraverso il quale si controlla che non si formino schiume anomale, segnale inequivocabile di emulsione². Il supporto del cuscinetto è inoltre dotato di un *rubinetto di spurgo* dal quale può essere prelevato un campione di olio per controllare che non vi siano contaminazioni. Si desidera sottolineare come la funzionalità dei cuscinetti sia fondamentale per la propulsione: il grippaggio di un cuscinetto comporta fatalmente l'indisponibilità dell'asse e quindi, come minimo, il dimezzamento delle capacità propulsive dell'unità; per tale motivo viene eseguita ogni ora una *ronda ai cuscinetti* nella quale ne viene controllato fisicamente lo stato di funzionamento, l'assenza di perdite dalle tenute, l'assenza di schiumosità anomala, la bontà dello scambio termico tra l'ingresso e l'uscita del refrigerante (se presente); nei casi dubbi si preleva un campione dell'olio dal già citato rubinetto di spurgo. Incidenti accaduti nel passato hanno comportato che, almeno sulle navi meno recenti, il rubinetto di spurgo ed il tappo del tubo utilizzato per il rifornimento dell'olio siano dotati di apposito lucchetto, onde evitare che una dimenticanza possa compromettere un elemento così importante della propulsione.

L'asse attraversa lo scafo passando attraverso delle strutture dette *ringrossi* o *botticelli*; la parte interna di tali strutture, nella quale scorre l'asse, viene detta *astuccio*; l'astuccio è in comunicazione con il mare, da cui i sostegni dell'asse posti nell'astuccio sono lubrificati e refrigerati dall'acqua di mare a libera circolazione: generalmente nell'astuccio vi è uno scarico dal collettore incendio o dal collettore refrigerazione macchinari, che garantisce un minimo di circolazione di acqua, soprattutto quando la nave è ferma: lo scopo di tale sistema, detto *lavaggio astucci* è sostanzialmente quello di impedire la formazione di vegetazione all'interno dello stesso. La parte prodiera dell'astuccio è chiusa da una *paratia stagna*³ nella quale è praticato il passaggio per l'asse: poiché l'astuccio è a libera circolazione di acqua mare il passaggio dell'asse è stagno, cioè dotato di una idonea tenuta che impedisca all'acqua di entrare all'interno ma, contestualmente, non impedisca all'asse di ruotare.

Tale tenuta viene detta *pressatreccce principale* ed è costituito da una struttura a forma di corona circolare al cui interno sono posti dei segmenti di materiale vegetale o sintetico detti *baderne*: una volta inserite le baderne, un apposito ingranaggio, formato da ruote dentate, permette di stringere la cassa e forzare le baderne contro l'asse in modo da impedire l'ingresso dell'acqua; un apposito condotto permette l'ingresso di acqua di mare, allo scopo di mantenere umide le baderne, per far sì che l'attrito da queste esercitato sull'asse, e che ne garantisce la tenuta, non la riscaldi fino al punto di surriscaldarla (o, come si suole dire, di *bruciarla*): tale sistema viene detto *refrigerazione baderne*.

² Ovvero miscela di acqua ed olio

³ Questa paratia prende il nome, appunto, di *paratia del pressatreccce*

Il sistema di tenuta a baderne è un elemento particolarmente importante poiché, in caso di malfunzionamento, l'acqua presente nell'astuccio invaderebbe il compartimento stagno che contiene l'ultima sezione interna dell'asse (e che è detto, generalmente, *tunnel d'asse*) rappresentando una via d'acqua paragonabile ad una falla. Anche il pressatrecce viene scrupolosamente controllato durante il moto e, se necessario, si provvede ad aumentare ulteriormente la pressione sulle baderne avvitando l'anello di forzamento, sempre con estrema cautela: tale operazione è conosciuta come *riprendere il pressatrecce*.

In circostanze eccezionali può accadere che il pressatrecce non riesca più a fare tenuta, ad esempio a causa della bruciatura delle baderne o per una imprevedibile rottura interna: contro tale evenienza le navi sono dotate di un sistema detto *pneumostop* o *tenuta pneumatica*; tale sistema è fondamentalmente composto da una camera d'aria che normalmente è alloggiata in una scassa ricavata nell'astuccio e che quindi non ha nessun contatto con l'asse, mentre in caso di emergenza viene gonfiata con aria compressa in modo da aderire all'asse stesso ed arrestare la via d'acqua. E' necessario però chiarire che tale sistema è esclusivamente di emergenza e può essere azionato esclusivamente con asse fermo; in linea puramente teorica esso dovrebbe permettere l'apertura del pressatrecce e la sostituzione delle baderne, sebbene nella pratica tale operazione sia stata raramente eseguita con nave galleggiante; uno schema della tenuta si ha nella figura (5).

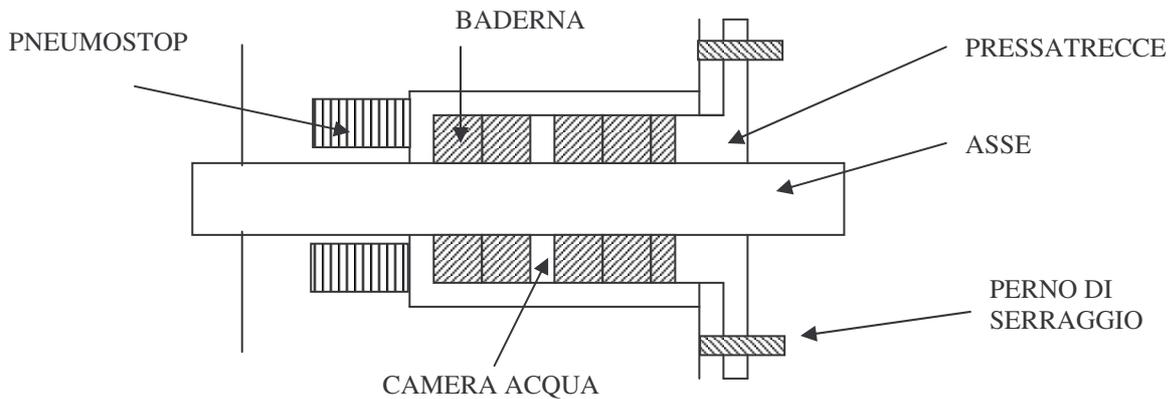


Figura 5: Schema tenuta a baderne con pneumostop

Spesso, a causa delle forme di poppa particolarmente rastremate, la posizione dell'elica è piuttosto distante dal punto in cui l'asse esce dall'astuccio, per cui la flessione che ne risulterebbe, dovuta sia al peso proprio che a quello dell'elica, verrebbe ad essere eccessiva:

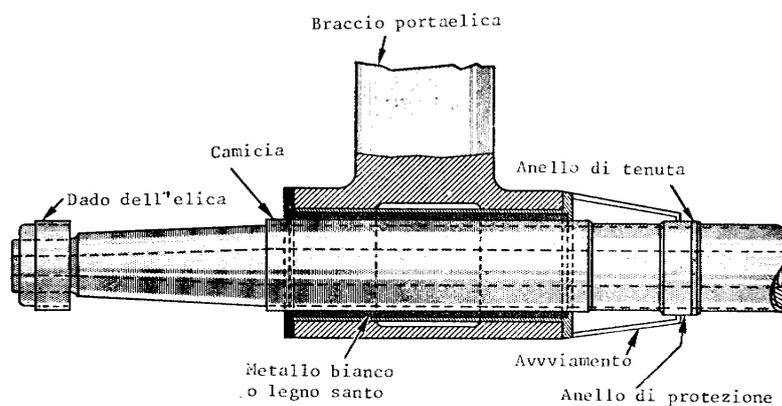


Figura 6: Braccio porta-elica

su molte navi vi è una struttura di sostegno posta immediatamente a proravia dell'elica detta *braccio* o *braccio portaelica*, raffigurata nella figura (6) e composta da una struttura ad asse orizzontale detta *ringrosso del braccio* collegata allo scafo da uno o due sostegni a profilo alare (per minimizzare la resistenza al moto); all'interno del ringrosso è alloggiato il sostegno dell'asse (una boccola di metallo bianco), refrigerato ad acqua di mare a libera circolazione; analogamente a quanto detto per l'astuccio, attraverso i sostegni è realizzato uno sbocco del collettore incendio, finalizzato ad impedire la formazione di vegetazione soprattutto durante i lunghi periodi di sosta: tale sistema è detto *lavaggio bracci*.

L'effetto della rotazione dell'elica è sostanzialmente la formazione di un gradiente di pressione a monte ed a valle dell'elica: tale pressione differenziale, agendo sulle pale dell'elica stessa, provoca una spinta assiale che si esercita sull'elica e che tende a spingerla verso prora⁴. Tale spinta provoca una compressione dell'asse che si trasmette alla nave attraverso una struttura di apposita progettazione detta *cuscinetto reggispinta* (o, più semplicemente, *reggispinta*) posto a valle del riduttore e solidamente vincolato alle struttura della nave: è importante notare come l'effetto propulsivo sia applicato proprio al reggispinta stesso ed è il punto nel quale la spinta generata dall'elica si trasmette alle strutture dello scafo. Il sistema è composto da tre *piatti*, due ruotanti, ovvero collegati all'asse, ed uno fisso, sul quale sono collegati dei *pattini*, ovvero degli elementi provvisti di metallo bianco sui quali scorre uno dei due piatti mobili: durante la marcia avanti l'asse viene spinto verso prora ed il piatto poppiero viene ad appoggiarsi sui pattini poppiери e quindi trasmette la spinta al piatto fisso del reggispinta, mentre in caso di marcia indietro l'asse viene traslato verso poppa ed il pattino prodiero viene forzato sui pattini prodieri, analogamente trasmettendo la spinta inversa al piatto fisso del reggispinta, come si può notare dallo schema della figura (8).

Poiché le pressioni che si esercitano sono estremamente elevate ed inoltre vi è la rotazione dell'asse, i cuscinetti reggispinta sono normalmente di grandi dimensioni e sebbene siano alloggiati all'interno del gruppo riduttore sono facilmente riconoscibili; inoltre vengono raffreddati ad olio prelevato dal circuito di lubrificazione del riduttore.



Figura 7: Cuscinetto reggispinta (piatto e pattini)

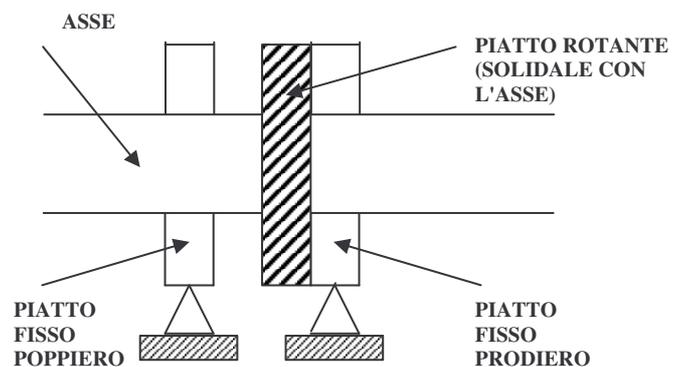


Figura 8: Schema reggispinta (moto in avanti)

Sia i cuscinetti portanti che quello reggispinta oltre ai cuscinetti del riduttore sono elementi fondamentali per il buon esercizio della propulsione, e sono dotati di un sistema di rilevamento temperatura a distanza, ovvero la temperatura del singolo cuscinetto, sia del riduttore, sia dell'asse che del reggispinta, viene letta da un sistema automatico di controllo che segnala immediatamente all'operatore il verificarsi di una delle due seguenti situazioni:

⁴ Si confronti con il cap. 4 pag. 18, 19 e 20

- elevata temperatura dell'elemento: generalmente la soglia di allarme è posta tra i 75° e gli 80°C, limite al quale il metallo bianco tende a perdere le proprie qualità
- improvviso aumento della temperatura, ovvero un aumento della temperatura che, seppure non superando i limiti di allarme, avviene in un tempo relativamente breve; generalmente tale livello è posto a 10°C/min

Problemi possono insorgere quando circostanze particolari comportano l'utilizzo dell'apparato in modo diverso da quello sul quale è stato basato il progetto, oppure in circostanze eccezionali dovute a situazioni contingenti o fortuite; orientativamente è necessario prestare grande attenzione nelle seguenti situazioni:

- dopo lavorazioni che abbiano riguardato ruote o cuscinetti del riduttore
- dopo lavorazioni che abbiano riguardato il reggispinta
- dopo lavorazioni che abbiano più generalmente comportato variazioni dell'assetto dei sostegni della linea d'asse, sia cuscinetti che tegole dell'astuccio o del braccio
- nel caso in cui si abbia una pressione di lubrificazione nel circuito principale inferiore alla norma
- nel caso di transito in acque particolarmente calde o nel caso di soste in porto i periodi di fioritura di vegetazione od ancora sul transito di bassi fondi
- nel caso in cui si sappia di avere la carena particolarmente sporca
- durante le operazioni di rimorchio (come nave trainante)
- durante le andature con un solo asse, sia per l'asse trascinante che per quello trascinato; nel caso di asse bloccato solo per l'asse trascinante

In tali circostanze è imperativo che, all'evidenziarsi di una situazione di allarme, sia immediatamente ridotta la potenza espressa, prima ancora di accertarsi se la segnalazione sia rappresentativa di un fatto reale o di un malfunzionamento del sistema di controllo: si desidera ricordare che un aumento repentino della temperatura può, in pochi minuti, provocare la distruzione del cuscinetto ed il grippaggio dell'asse provocando un danno che compromette sempre l'efficienza del sistema di propulsione che generalmente è di difficoltoso ripristino ed estremamente oneroso in termini finanziari.

In circostanze eccezionali può essere necessario impedire la rotazione di un asse, come per esempio nel caso di un danno ad un cuscinetto, al reggispinta od al riduttore: per tale necessità le navi sono dotate di un *freno della linea d'assi*, generalmente costituito da due ceppi posti su due ganasce che possono essere strette ricorrendo ad un apposito sistema di perni. E' necessario ricordare che il freno può essere stretto solo ad asse fermo e che l'effettuazione della manovra richiede un tempo generalmente prolungato (sull'ordine dell'ora per le navi più grandi). L'attrezzo necessario per la chiusura dei ceppi è la chiave detta *chiave del freno*, di grandi dimensioni che deve essere conservata in prossimità del freno stesso.

Il collegamento tra il motore ed il riduttore avviene mediante un sistema di accoppiamento detto *giunto* che serve ad unire l'asse del motore con quello di ingresso della potenza nel riduttore; il giunto, che deve avere delle dimensioni tali da permettere la trasmissione della potenza prodotta dal motore può essere *fisso* o *disinseribile*.

Storicamente i giunti nascono fissi, e tali sono rimasti ad esempio sulle navi a vapore: le turbine di alta e di bassa pressione sono collegate agli ingressi di potenza nel riduttore attraverso collegamenti basati su profili scanalati, che possono essere disaccoppiati solo in casi eccezionali, come nel caso di grandi manutenzioni, e tale operazione non è né semplice né rapida.

L'utilizzo di impianti diesel che, come noto hanno una coppia limitata alle andature di minimo, hanno comportato lo studio di giunti disaccoppiabili, ovvero che permettono di avviare il motore senza che questo sia collegato all'asse, in modo da poter effettuare un corretto riscaldamento della macchina, e solo successivamente effettuare tale collegamento e quindi erogare la potenza richiesta; inoltre quando il sistema delle eliche a passo orientabile non era ancora diffuso come oggi, tale sistema di giunti permetteva, oltre all'avviamento della macchina,

anche la possibilità di mantenere la condizione di macchina ferme senza dover spegnere il motore stesso, cosa che invece può essere ottenuta senza difficoltà sia con la turbina a vapore ed, entro certi limiti, anche con la T.A.G.

I giunti sono stati anche utilizzati nei collegamenti necessari per la marcia addietro con i motori non reversibili.

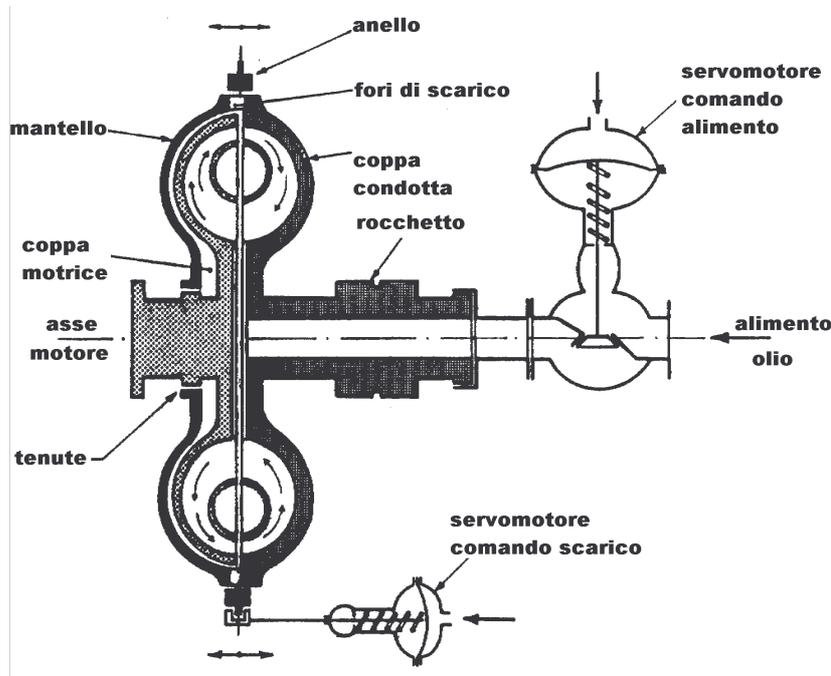


Figura 9: Giunto Vulcan

La figura (9) rappresenta un giunto *vulcan*, i quali sono stati i primi tipi di giunti disaccoppiabili utilizzati, sostanzialmente composti da due semicalotte sferiche, dotate di idonea palettatura, che formano un vano sferico ma prive di qualunque collegamento meccanico: quando il giunto è in posizione di accoppiato il vano è pieno di olio e le palette della semicalotta collegata al motore provocano la rotazione dell'olio il quale ruotando colpisce le palette della semicalotta collegata al riduttore e provoca la trasmissione del moto; quando il giunto è vuoto non vi è trasmissione di moto e quindi si ha situazione di motore in moto ma asse fermo.

Il giunto vulcan è stato utilizzato in modo diffuso ma ha come limite la grande dissipazione di potenza dovuta alla rotazione dell'olio ed il problema del tempo necessario per passare da asse in rotazione ad asse fermo e viceversa, tempo che è funzione delle dimensioni del giunto e della portata dei circuiti di immissione e scarico olio.

Attualmente per l'accoppiamento dei motori diesel si preferisce usare i *giunti a frizione*: questo tipo di giunto è formato da una serie di anelli che vengono spinti l'uno contro l'altro da delle camere d'aria e trasmettono il moto tramite questo forzamento assiale; in caso di necessità le camere d'aria vengono sgonfiate e delle apposite molle provvedono a disaccoppiare gli anelli. Il sistema dei giunti a frizione viene utilizzato soprattutto dove le potenze da trasmettere sono relativamente limitate (inferiori a 10.000 CV); in Marina Militare tali giunti a frizione sono conosciuti come giunti Wichita o Re, dal nome dei rispettivi costruttori: il principio di funzionamento è quello descritto ed anche le differenze costruttive sono minime.

Nella figura (10) è riportata la sezione di un giunto Wichita: l'albero motore viene inserito nell'apposito innesto (1) e sorregge una corona di dischi mobili (2) posti in modo alternato con

altri elementi analoghi (3) dotati di scanalature che si accoppiano con un canotto ricavato nell'asse condotto (11).⁵

Attraverso un apposito condotto (8) aria in pressione viene inviata alla camera d'aria di forzamento (6) che gonfiandosi spinge il disco di spinta (5) verso il motore; i dischi mobili assialmente ma vincolati all'albero motore (2) traslano verso il motore a loro volta comprimendo tra loro i dischi solidali all'asse (3): questi ultimi sono dotati di *ferodi*(10) che provocano una rapida presa tra i dischi stessi e quindi la trasmissione del moto; appositi condotti (9) permettono il passaggio di aria a bassa pressione con funzioni di refrigerazione.

Nel momento in cui l'aria compressa nella camera d'aria di forzamento (6) viene a mancare, delle apposite molle (7), dette di rilascio, spingono in senso posto i dischi (2) liberando gli elementi (3) dal serraggio e quindi la trasmissione del moto si arresta.

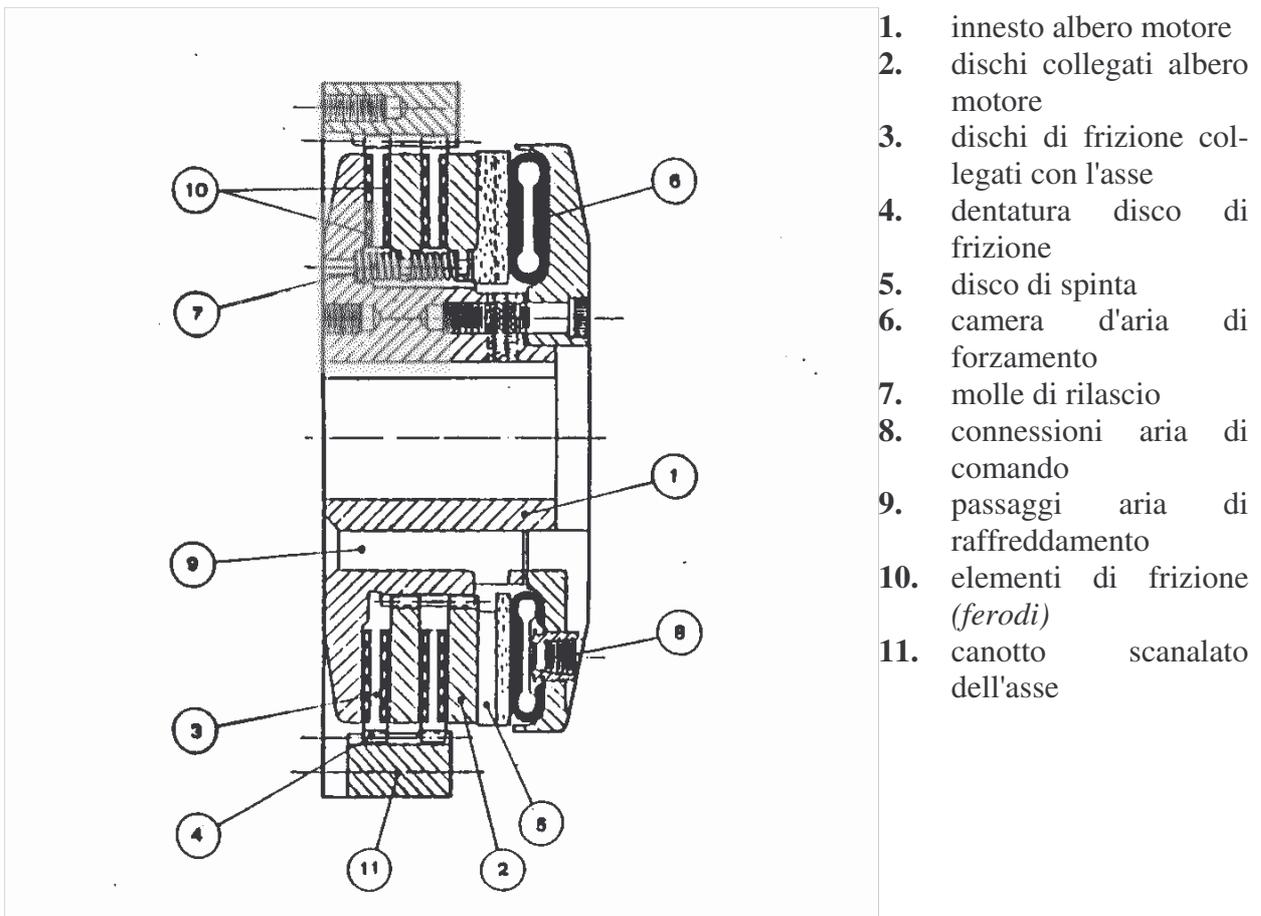


Figura 10: Sezione di giunto Wichita

I giunti a frizione vengono controllati tramite elettrovalvole: attraverso l'apertura della valvola di inserzione viene gonfiata la camera d'aria, viceversa essa si scarica nel momento in cui si apre la valvola di disinserzione.

Da notare che la trasmissione a frizione ha lo svantaggio di poter trasmettere potenze contenute ma, di contro, non necessita di sequenze particolari per l'ingranamento, non essendo necessario che gli assi abbiano posizioni particolari prestabilite.

Per le turbine a gas, invece, si preferiscono utilizzare i giunti tipo SSS o *Synchro Self Shifting*⁶ a loro volta basati su profili scanalati, particolarmente indicati, per tale motivo, per la trasmissione di elevate potenze; i giunti autosincronizzanti sono strutturati in modo da

⁵ Con *canotto* si intende il vano realizzato all'interno di un asse.

⁶ Ovvero *autosincronizzante*

permettere l'accoppiamento anche con assi in movimento: infatti i profili scanalati possono ingranare esclusivamente quando asse conducente ed asse condotto si trovano in precise posizioni, in modo tale che le reciproche posizioni dei profili coincidano, a differenza dei giunti a frizione.

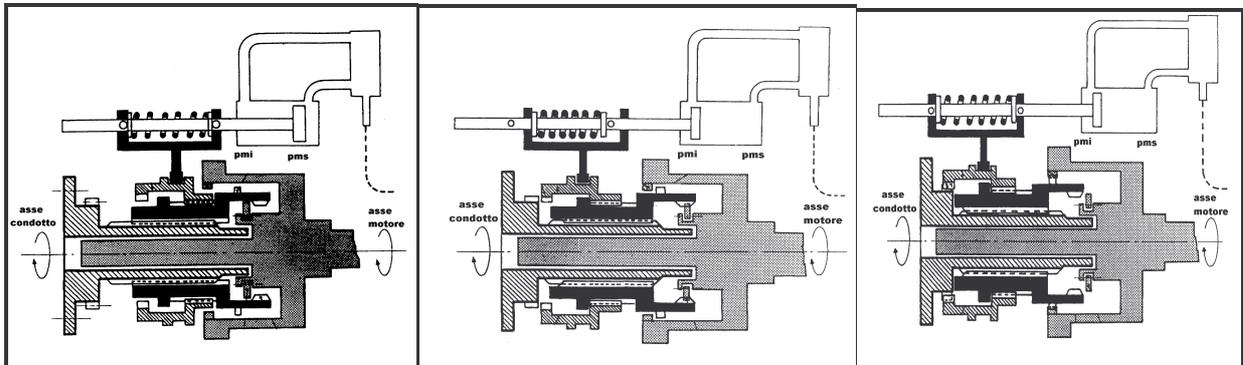


Figura 11: Giunto SSS (disinnestato - predisposto all'inserimento - innestato)

Tale giunto è formato da due parti: una prima parte dotata di un sistema a castagne che permette un primo posizionamento dell'asse condotto: se l'asse conducente è più lento dell'asse condotto le castagne permettono il moto relativo, in modo tale che il primo ruota all'interno del secondo liberamente; quando l'asse conducente tende a ruotare più velocemente dell'asse condotto, quest'ultimo si vincola al primo e le reciproche posizioni rimangono fissate. A questo punto un pistone idraulico spinge il profilo scanalato nella posizione di ingranato ed i due assi sono saldamente vincolati ed in grado di trasmettere qualunque potenza.

La figura (11) mostra le tre posizioni principali del giunto:

1. disinnestato: il manicotto di sincronizzazione (in nero) è in posizione arretrata, il profilo (in grigio) è disinserito.
2. predisposto all'inserimento: il manicotto di sincronizzazione ingrana con le castagne sull'asse conducente; le castagne *slittano* fino a quando l'asse della turbina è più lento dell'asse condotto; il profilo è avanzato ma disinserito.
3. innestato: il manicotto di sincronizzazione trasla in avanti ulteriormente e si collega rigidamente all'asse conducente, tutti i profili traslano ed ingranano.

La procedura precedentemente descritta viene eseguita in modo automatico dal sistema di comando e controllo dell'apparato motore con, od eventualmente senza, il consenso dell'operatore.

Giunti a frizione ed SSS sono estesamente impiegati in Marina Militare sulle navi CODOG, ove il diesel viene usato per le basse andature e collegato tramite giunto a frizione, mentre la T.A.G. è utilizzata per le alte andature e connessa tramite il giunto SSS.

Caso unico in M.M. è il *giunto inversore Tosi*, realizzato esclusivamente per Nave Garibaldi dalla Franco Tosi e che rappresenta, sostanzialmente, una evoluzione del giunto Vulcan; il principio di funzionamento è lo stesso, ovvero consistente nelle due semicalotte sferiche che, una volta riempite di olio, permettono la trasmissione del moto; l'inversione viene ottenuta tramite l'inserimento di una corona di palette dalla forma adeguata, il cui compito è quello di invertire il moto dell'olio che quindi arriva sulla semicalotta condotta con moto inverso rispetto a quella conducente; inoltre vi è la possibilità di inserire solo una parte delle palette necessarie all'inversione del moto, ottenendo in pratica l'annullamento dell'effetto del giunto, ovvero l'olio non è in grado di far ruotare la parte condotta né in un senso né nell'altro; il giunto invertitore viene utilizzato esclusivamente durante le manovre (può trasmettere potenze limitate) ed il suo controllo è affidato al sistema di comando e controllo dell'apparato motore.

Il giunto Tosi si è dimostrato una macchina valida nonostante l'unicità della realizzazione gli abbia conferito un carattere prototipico: la scelta di adottare tale sistema è stata condizionata dal

fatto che la tecnologia delle eliche a passo variabile non era stata giudicata, ai tempi della progettazione, sufficientemente matura per garantire l'affidabilità di un'elica di tali dimensioni e per giunta con cinque pale.

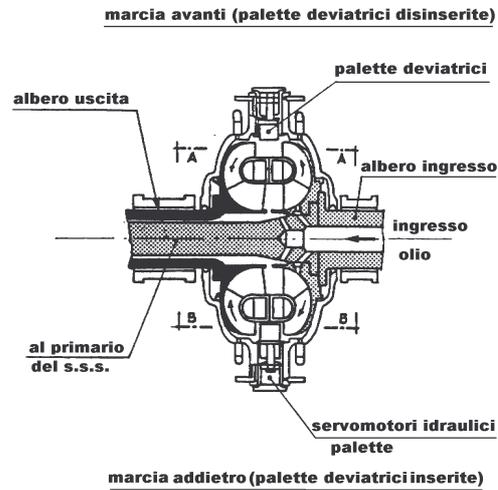


Figura 12: Giunto invertitore Vulcan - FrancoTosi

Di contro la vita del giunto (rappresentato nella figura (12)) è stata caratterizzata da un certo numero di problemi proprio dovuti alla mancanza di esperienza dovuta proprio al carattere prototipico dello stesso, problemi culminati, alla fine degli anni novanta, con la loro sostituzione per problemi strutturali alle palette invertitrici, presumibilmente dovuti ad una errata progettazione a fatica, errore, si desidera sottolineare, sostanzialmente dovuto alla mancanza di dati relativi ai modi e tempi di utilizzo.

Allo stato attuale non si ritiene che il giunto Tosi possa avere ulteriori applicazioni, soprattutto grazie al fatto che la tecnologia delle eliche a passo orientabile è completamente matura e permette l'utilizzo di qualunque potenza.

9. APPARATI MOTORI COMBINATI

Nei precedenti capitoli si sono illustrati vari tipi di apparati motori semplici e si è notato come ognuna delle tre principali tipologie (esotermico a vapore, endotermico diesel e turbogas) abbia sia possibilità vantaggiose che limiti piuttosto stringenti, per cui non sempre la scelta di un particolare tipo di apparato permette di coniugare al meglio vantaggi e svantaggi; per questa ragione sono nati ed hanno trovato larga applicazione gli impianti combinati, ovvero degli apparati motori che possono produrre la potenza necessaria tramite più impianti di diversa natura, in modo che ognuno di questi venga utilizzato solo per quei regimi che permettono di massimizzare i vantaggi.

Sebbene gli impianti combinati siano stati massicciamente adottati su navi di grande dislocamento, sia militari che civili, soprattutto a partire dagli anni '70, nondimeno la prima forma nella quale si è proposta la combinazione di apparati diversi è stata quella degli impianti diesel-elettrici, utilizzati principalmente per i sommergibili, ma anche per alcune navi di superficie.

Il vincolo del dover operare sott'acqua ha chiaramente comportato che il sommergibile, fin dalla sua comparsa, non potesse impiegare nessun tipo di apparato motore convenzionale per la propulsione, o per lo meno fino a quando si trova immerso: è necessario ricorrere a un tipo diverso di energia, energia che è stata immediatamente individuata nell'elettricità che poteva essere immagazzinata in accumulatori ed utilizzata durante i periodi in immersione, svincolandosi così dal problema della combustione e, quindi, della necessità dell'aria.¹

Il sommergibile, dotato di accumulatori, utilizza un motore elettrico per azionare l'asse dell'elica: poiché è necessario variare il numero di giri per poter controllare la velocità del battello, il motore elettrico del sommergibile nasce in corrente continua in modo tale da poter variare la velocità di rotazione variando la corrente che ve lo percorre; altri sistemi che utilizzano motori in corrente continua sono, ad esempio, il sistema Ward-Leonard che arma il Vespucci.

E' necessario chiarire che sia i generatori elettrici che il motore del sommergibile sono macchine a corrente continua, e sono dette *dinamo* i generatori e *motore in continua* il motore di propulsione: la facilità di regolazione della velocità, punto di forza di questo sistema è pagata con la maggiore complicazione, il maggiore peso e spazio occupato e la minore affidabilità rispetto alle macchine in alternata; i motori in continua hanno, infatti, il problema dei *contatti striscianti*, ovvero di quegli elementi tramite i quali la corrente di eccitazione viene portata sul rotore sia della dinamo che del motore elettrico: questi elementi, ovvero le *spazzole* ed i *collettori ad anelli*, sono particolarmente delicati e di breve vita a causa dello strisciamento meccanico e delle inevitabili scariche elettriche (dette *scintillio*) dovute al consumo irregolare e necessitano di frequenti ed onerose sostituzioni.

Nei sommergibili attualmente in servizio in Marina Militare (ad eccezione del Todaro), due od eventualmente tre motori diesel azionano una dinamo, naturalmente quando possibile, che alimenta il gruppo accumulatori dal quale viene alimentato a sua volta il motore elettrico principale, motore in continua; il motore elettrico è un motore a doppio indotto e i due indotti possono operare in serie od in parallelo tale soluzione permette di variare la velocità di rotazione dell'asse e quindi quella del battello; anche le batterie sono distinte in due sottosezioni che possono lavorare in serie od in parallelo: così, variando il modo di lavorare sia degli indotti che delle batterie, è possibile variare in modo discontinuo la velocità dell'asse dell'elica mentre la variazione all'interno di ogni "scalino" corrispondente alle combinazioni serie-parallelo delle batterie e degli indotti è affidata a gruppi di resistori che vengono inseriti sia automaticamente che, in caso di necessità, manualmente; la grande limitazione dei sommergibili è costituita dalla durata delle batterie, e quindi della massima autonomia in immersione, che a sua volta è fortemente dipendente dalla potenza utilizzata: se supponiamo che l'energia elettrica sia rappresentabile come una certa quantità di acqua contenuta in

¹ Già nel suo "Ventimila leghe sotto i mari" J. Verne suppone che il sommergibile del protagonista sia propulso elettricamente e che tale sistema gli permetta una autonomia in immersione praticamente infinita; ricordiamo che tale romanzo è stato scritto nel 1870; diciamo che tale mezzo è più un sottomarino che un sommergibile.

un serbatoio, appare chiaro che maggiore è il flusso in uscita, ovvero la potenza richiesta, minore sarà il tempo di svuotamento del serbatoio, ovvero la durata delle batterie.

Inoltre le batterie sono componenti delicati, dalla vita ben stabilita (espressa in *cicli carica-scarica*), potenzialmente pericolosi (durante alcune fasi si liberano gas tossici ed esplosivi) che devono essere oggetto sempre di grande precauzione; inoltre sono molto costosi.



Figura 1: Schema propulsione sommersibile convenzionale

Privi della limitazione tipica dei sommergibili, gli impianti combinati navali nascono con lo scopo di poter utilizzare apparati dalle caratteristiche diverse ognuno nel campo di applicazione in cui i vantaggi sono massimizzati rispetto agli svantaggi: il caso più tipico è quello del motore diesel e della T.A.G.; la T.A.G. è caratterizzata da una elevata potenza specifica, sia in termini di volumi che in termini di pesi, da un'ottima risposta alla variazione di carico, ma di contro è estremamente dispendiosa in termini di consumo quando si trova a lavorare lontano dalle condizioni di progetto che, normalmente sono circa il 90% del carico massimo².

Il motore diesel ha potenza specifica molto meno elevata della T.A.G., quindi a parità di ingombri e pesi produce delle potenze notevolmente inferiori, ed anche in termini di risposta alla variazione di carico è sicuramente meno brillante; di contro il diesel ha una curva di consumo sostanzialmente piatta, ovvero non vi è una variazione di consumo ai vari carichi così accentuata come nel caso della turbina, inoltre le andature ai bassi carichi sono molto meno logoranti per il diesel che per la T.A.G. La logica conseguenza è la costruzione che permetta di accoppiare i due apparati sullo stesso asse, in modo da utilizzare il diesel per le andature che richiedono potenza inferiore a quella massima del diesel e la T.A.G. per le rimanenti: tale soluzione permette di raggiungere una bilanciata soluzione tra i costi di gestione delle macchine, in termini di consumo e logorio, senza dover rinunciare all'installazione delle elevate potenze necessarie alle velocità di punta.

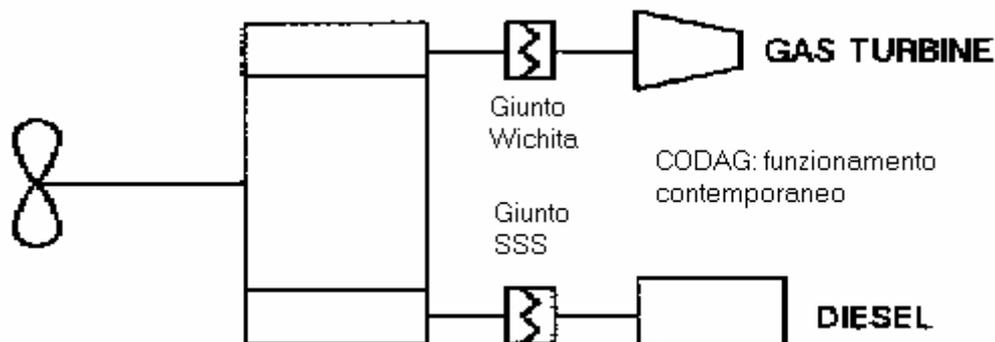


Figura 2: Impianto CODAG

Il primo impianto combinato realizzato dalla M.M.I. è stato quello CODAG (COmbined Diesel And Gas) per le fregate Alpino e Carabiniere, illustrato nella figura (2); la soluzione adottata

² Riferirsi, a titolo di esempio, alle curve della figura 18, cap. 7, pag 84

era quella della propulsione diesel mediante due motori sullo stesso asse con l'inserzione della turbina nel momento in cui erano richieste velocità e quindi potenze superiori: la turbina si aggiunge alla normale propulsione su diesel, con funzioni di *booster*; tale soluzione, nella quale il peso della propulsione ricadeva comunque normalmente sui motori diesel, ha implicato un forte sviluppo tecnologico, sia nel campo dei riduttori che in quello dei giunti, che poi si è favorevolmente impiegato nelle successive evoluzioni.

Di contro il sistema era complesso (due diesel ed una TAG comportano un riduttore con tre ingressi di potenza ed una uscita) di difficile progettazione (il turbogas ha una velocità di rotazione considerevolmente più elevata dei diesel) e non sempre affidabile (basti pensare alla necessità di due giunti a frizione ed uno tipo SSS) ma la massima potenza producibile dalle TAG disponibili in quel momento (inizi anni '60) non permetteva soluzioni alternative: la turbina utilizzata era la RR Proteus 1275 della figura (10), cap. 7, pag. 78.

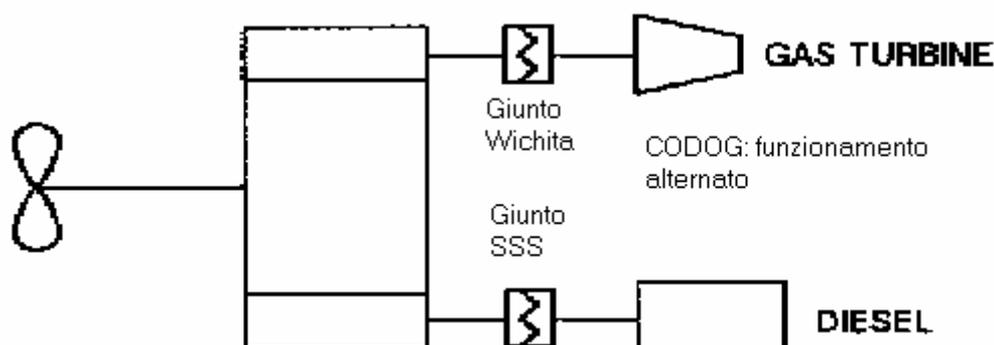


Figura 3: Impianto CODOG

La piena maturità degli impianti basati su diesel e turbine è stata raggiunta, in Marina Militare, con il CODOG (COMbined Diesel Or Gas) adottati per le fregate classe Lupo, Maestrale e Soldati ed i cacciatorpediniere classe De La Penne: la disponibilità di una turbina a gas di elevata potenza (nel particolare il turbogas Fiat Avio GE LM 2500), estremamente affidabile e relativamente flessibile nell'impiego, correlata ad una valida tecnologia dei motori diesel (sovralimentati nel caso della classe Lupo e sovralimentati con rapporto di compressione variabile nel caso dei Maestrale e dei De La Penne) ha fatto sì che si optasse per questa soluzione che ha dato valida prova di sé costituendo, fino ad ora, la punta di lancia della flotta.

La differenza con il caso precedente consiste che la turbina si sostituisce alla propulsione diesel invece di affiancarla ed ha permesso di semplificare notevolmente sia i riduttori che i giunti che il meccanismo di sincronizzazione.

Attualmente la Marina Militare ripone una tale fiducia negli apparati CODOG da considerarlo l'impianto combinato standard: i CODOG è il termine di paragone per gli apparati motori e le caratteristiche di questi devono essere confrontate con quelle, appunto, del CODOG.

Soprattutto per le grandi Unità, ove la potenza necessaria per le andature di crociera è sufficientemente elevata da permettere l'impiego della T.A.G. vicino al punto di progetto, si è preferito optare per il sistema *tutto gas* o COGAG (COMbined Gas And Gas): in tale sistema due turbine possono funzionare singolarmente sullo stesso asse per permettere il raggiungimento della velocità di crociera, mentre nel caso di richiesta di velocità superiori viene aggiunta la seconda turbina.

Tale sistema ha dato prova di grande affidabilità e flessibilità, flessibilità molto maggiore del sistema alternativo, ovvero il COGOG (COMbined Gas Or Gas), che prevede sempre l'utilizzo sullo stesso asse di due turbine, ma dalla diversa potenza massima: quella di potenza inferiore (la "più piccola") per le andature fino alla velocità di crociera, quella "più grande" per le andature superiori

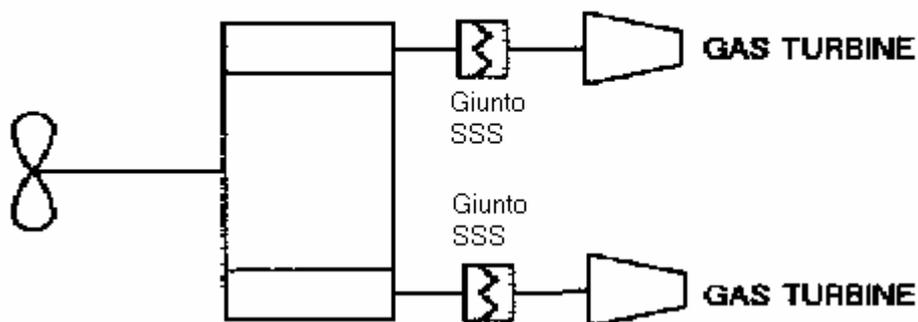


Figura 4: **Impianto COGAG**

Sebbene da un punto di vista generale tale impianto permetta di "adattare" la taglia delle turbine alle effettive richieste di potenza previste della carena a velocità di crociera, nondimeno diventa estremamente rigido nel caso di malfunzionamento di una delle due macchine, impedendo non solo il raggiungimento delle velocità di tutta forza, ma, nel caso di problema alla turbina di potenza inferiore, l'utilizzo dell'altra in condizioni proibitive sia in termini di consumo che di logorio. Inoltre la presenza di due macchine diverse comporta la necessità di mantenere una doppia scorta di ricambi, necessità che viene pagata in termini di pesi e di ingombri

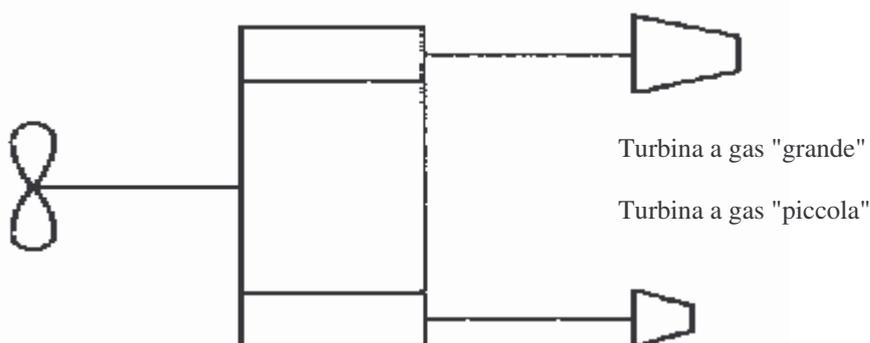


Figura 5: **Impianto COGOG**

In modo analogo non ha avuto particolare fortuna il sistema CODOD (COMBINED Diesel OR Diesel), anch'esso basato su due diesel di diversa potenza, con quello di potenza inferiore utilizzato fino alle andature da crociera e quello di potenza superiore per le andature fino alla tutta forza: anche in questo caso la scarsa flessibilità del sistema unita alla necessità di una doppia serie di dotazioni di rispetto ne ha sconsigliato l'adozione³; presso alcune marine straniere ha avuto una certa fortuna il sistema CODAD (COMBINED Diesel AND Diesel) che prevede l'utilizzo di due motori identici sullo stesso asse, singolarmente per le andature fino a quella di crociera od insieme per quelle superiori: come nel caso del COGAG, la flessibilità dovuta all'utilizzo di macchine identiche, ha determinato il successo di tale tipo di impianto, anche se, considerando l'enorme differenza fra le massime potenze esprimibili, tale sistema è stato soprattutto utilizzato su navi di dimensioni ridotte.

Si ha, infine, la famiglia degli impianti combinati prototipici, ovvero quelli che non hanno comune applicazione: ad esempio la famiglia degli impianti COGAS/COGOS e CODAS/CODOS

³ Si consideri, tra l'altro, quanto detto sulla potenza necessaria alle varie andature e sulle conseguenti valutazioni delle curve di potenza, nel particolare quanti illustrato in figura (16), cap. 4, pag. 28.

(COmbined Gas And Steam/COmbined Gas Or Steam e COmbined Diesel And Steam/COmbined Diesel Or Steam), famiglia che ha una forte somiglianza con gli *apparati motori misti*.

La figura (6) rappresenta un impianto COGAS: i gas combusti in uscita dalla turbina di potenza sono inviati ad uno *scambiatore di calore* (in pratica una caldaia a recupero) e cedono calore ad acqua che si converte in vapore che viene utilizzato entro una apposita turbina.

Per quanto tale sistema possa apparire macchinoso (e per certi versi lo è, essendo molto ingombrante e molto pesante) non si deve dimenticare che la temperatura dei gas in uscita dalla TAG è molto elevata (riferendoci alla figura (15), cap. 7, pag. 83 abbiamo 965 °F ovvero 518°C), energia che andrebbe perduta ed il cui recupero rappresenta, quindi, un guadagno netto.

Da notare, inoltre, che tale sistema ha forti analogie con l'idea di base della turbina RR WR-21, ovvero la rigenerazione, il recupero del calore dei gas combusti.

Questo tipo di impianti non è utilizzato nelle Marine Militari a causa dei maggiori ingombri, pesi, costi di acquisizione e conduzione, ma è molto apprezzato invece nelle centrali termoelettriche dove assume il nome di *impianto di cogenerazione*.

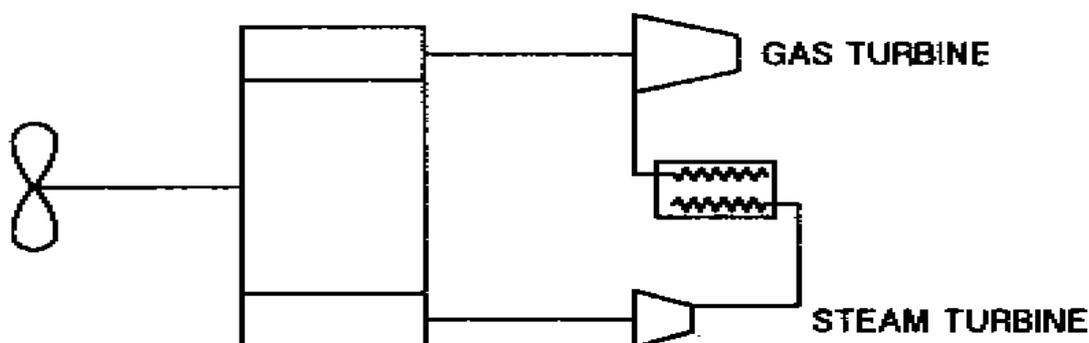


Figura 6: Impianto COGAS

Infine abbiamo il vasto gruppo degli apparati elettrici che rappresentano sicuramente la più vasta promessa per il futuro: l'estrema flessibilità dei motori elettrici, la loro silenziosità, la possibilità di accoppiarli direttamente con l'elica, unite al fatto che la potenza necessaria può essere suddivisa tra più generatori e che la macchina elettrica sincrona può essere sia motore che generatore, ha permesso di ipotizzare una vasta gamma di apparati dalle caratteristiche estremamente vantaggiose, che sono sommariamente riportati nella seguente tabella:

TIPO DI APPARATO	ELEMENTI COMPONENTI	FUNZIONAMENTO
CODLOG - COGLOG	Motori elettrici e diesel/turbogas sullo stesso asse; diesel o turbogas generatori	I generatori alimentano i motori elettrici od alternativamente vengono inseriti i diesel/turbogas
CODLAG - COGLAG	Motori/generatori e diesel/turbogas sullo stesso asse; diesel o turbogas generatori	I generatori possono sommare la propria potenza ai diesel o turbogas di propulsione, possono sostituirli o questi ultimi possono essere utilizzati per produrre energia elettrica
TUTTO ELETTRICO	Motori elettrici; diesel o turbogas generatori	I generatori alimentano i motori elettrici

L'esempio forse più interessante è il CODLAG (COmbined Diesel eLectric And Gas), ove sullo stesso possono essere inseriti, alternativamente, un motore elettrico, una T.A.G. od entrambi; i motori elettrici, del tipo reversibile, ovvero che possono funzionare alternativamente come motore o

come generatore, possono essere alimentati da due o più diesel ed il carico propulsivo è una parte del carico elettrico totale necessario all'Unità. Per basse velocità propulsive (nel caso considerato da 0 a 10 kts) i due motori elettrici provvedono alla propulsione e vengono alimentati da uno o due diesel, a seconda delle richieste di velocità, in modo da poter avere il massimo rendimento di generazione. Per velocità comprese fra i 10 ed i 23 kts viene utilizzata una turbina che genera potenza sia per il funzionamento del relativo asse che per produrre potenza elettrica che viene impiegata sia per la propulsione dell'altro asse che per il carico necessario all'Unità: tale soluzione permette di operare con la turbina prossima al punto di progetto, con quindi un consumo specifico più che accettabile; infine nel caso di elevate velocità si utilizzano entrambe le turbine con le macchine elettriche funzionanti come generatori da cui l'intera potenza propulsiva ed elettrica viene generata dalle T.A.G., permettendo di escludere i generatori diesel che, a causa del moto alternativo, sono una considerevole sorgente di rumore irradiato in aria ed acqua. La velocità di punta di 33 kts può essere ottenuta convogliando la potenza generata dal turbogas e quella del motore elettrico sull'asse.

Nell'esempio presentato l'assetto silenzioso, ovvero senza diesel, permette di raggiungere velocità di 28 kts, ma non di scendere sotto i 10 kts: infatti, in tale caso, le turbine verrebbero utilizzate eccessivamente lontano dal punto di progetto e quindi la velocità silenziosa verrebbe pagata con un consumo eccessivo, vanificando lo scopo del sistema.

Il CODLOG è strutturato in modo diverso, soprattutto quando si suppone di voler mantenere l'assetto silenzioso a basse velocità: in tale caso, i due generatori asse e contestualmente motori elettrici non sono calettati direttamente sull'asse e dotati di appositi giunti che permettono il collegamento con il riduttore; i motori primi sono diesel dotati di particolari sistemi di soppressione del rumore, come, ad esempio, la doppia sospensione cardanica; l'assetto silenzioso, ottenibile per le andature fino a 15 kts è ottenuto facendo funzionare i motori elettrici, disaccoppiati dai riduttori ed alimentati da due, tre o quattro diesel generatori; per le andature da 15 kts a 23 kts, viene utilizzata una turbina che produce la potenza necessaria sia per il proprio asse che per alimentare il motore elettrico dell'altro; per velocità superiori (fino a 28 kts) le due turbine producono sia la potenza propulsiva che quella necessaria al fabbisogno elettrico dell'Unità.

Tale tipologia di realizzazione ha il vantaggio di essere costantemente più silenziosa della precedente, dal punto di vista del rumore irradiato in aria ed acqua, ma contestualmente più onerosa come costi iniziali, richiedendo motori diesel dotati di sistemi cardanici di costruzione molto più sofisticata.

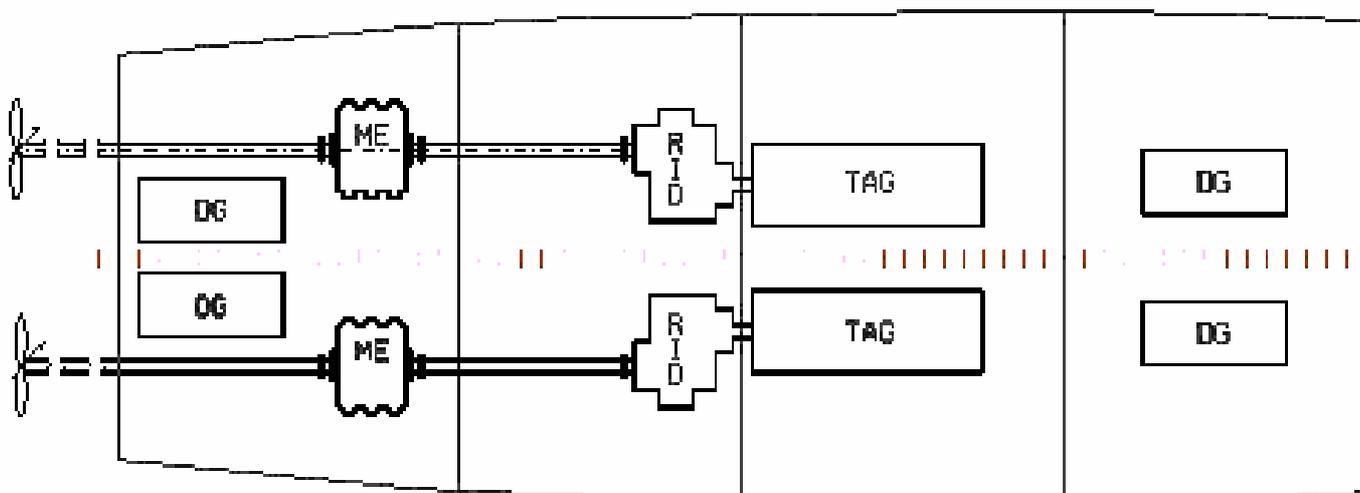


Figura 7: Impianto CODLAG

Si riportano esempi di apparati motori in uso ad unità Marina Militare, tra i quali si possono notare sia gli apparati motori semplici, quelli basati sul solo vapore, solo diesel e sola TAG e quelli combinati.

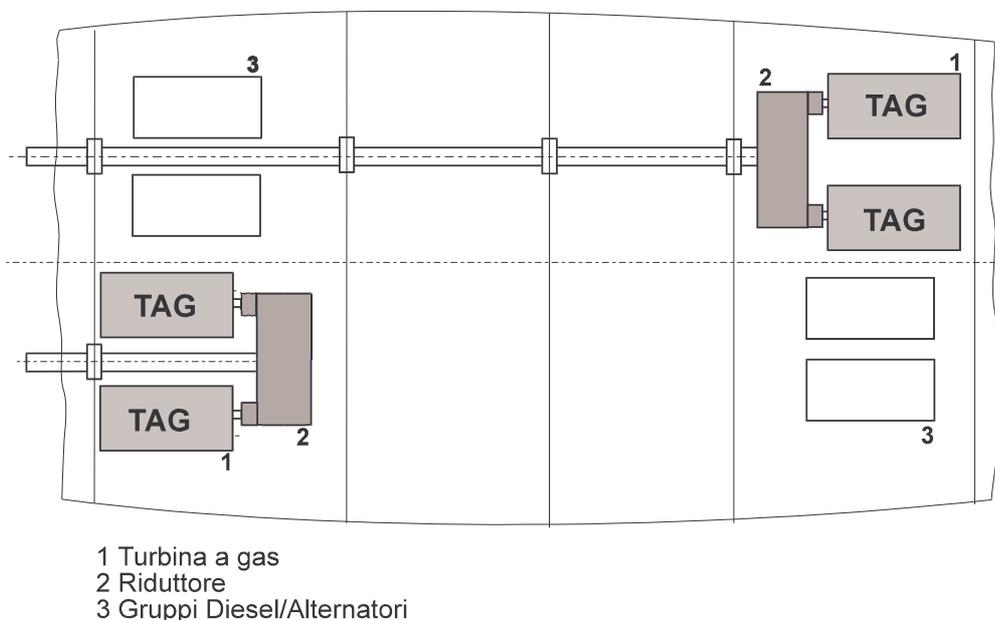
Deve essere notato che gli apparati combinati tendono a contenere i consumi a potenze diverse da quella massima, producendo un risparmio di esercizio che compensa i maggiori oneri rispetto all'apparato semplice:

- maggiore peso
- maggiore ingombro
- maggior costo iniziale
- maggiore investimento tecnologico (infatti un apparato combinato richiede di poter combinare almeno due ingressi distinti di potenza)

Attualmente l'apparato standard Marina Militare è il CODOG che rappresenta la migliore sintesi di costi iniziali contenuti, volumi ed ingombri limitati, buone caratteristiche operative (velocità, autonomia, silenziosità), affidabilità e costi di gestione contenuti; tutti i futuri impianti combinati dovranno essere comparati a questo che rappresenta l'elemento di confronto e di valutazione di tipologie così diverse.

Incrociatore portaeromobili **GARIBALDI**

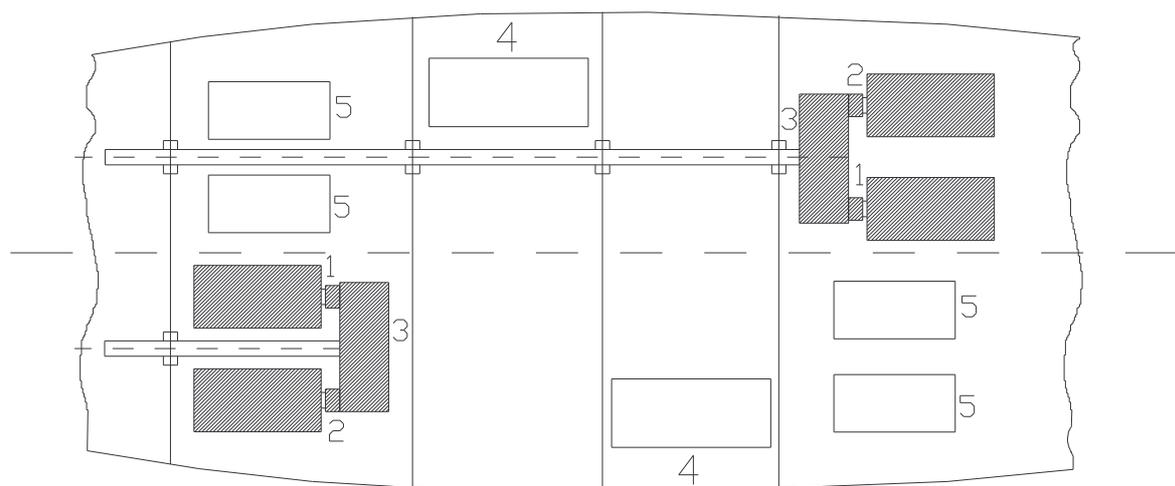
- Dislocamento massimo: **13870 t**
- Apparato di propulsione: **combinato COGAG**
- Potenza massima: **80000 CV**
- Ripartizione potenza/asse: **2 assi; elica a pale fisse e 2 TAG per asse**



- TAG: **Fiat GE LM2500 (20000 CV a 3500 giri/min)**
- Andatura di crociera: realizzata su un solo asse con una TAG o su due assi con una TAG per asse.
- Andatura di tutta forza: realizzata con 2 TAG per asse. Giri max dell'elica: **172 giri/min** con rapporto di riduzione **1:20**
- Accoppiamento a mezzo di giunti autosincronizzanti tipo SSS
- Consumo specifico: 189 g/kW • h
- Inversione del moto: giunto idrocinetico inversore posto tra ciascuna TAG e il riduttore

DDG classe Durand de La Penne

- Dislocamento massimo: **4.400 t**
- Apparato di propulsione: **CODOG**
- Potenza massima: **55.000 CV**
- Ripartizione potenza/asse: **2 assi, eliche a pale orientabili, posizionabili anche a bandiera, 1 TAG ed 1 Diesel per asse**

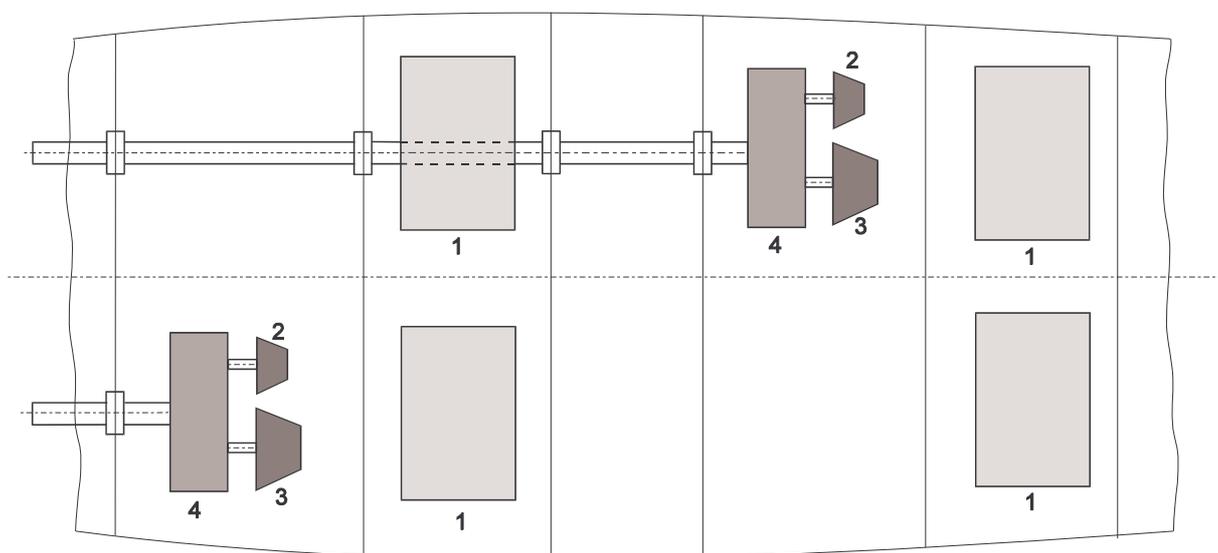


- 1 Turbina a gas
 2 Motore Diesel di propulsione
 3 Riduttore
 4 D/A da 1.500 kW
 5 DD/AA da 750 kW

- Motore Diesel: **GMT BL 230.20 DVM da 6.700 CV**
- TAG: **FIAT G.E. LM2500 da 27.500 CV**
- Andatura massima Diesel: **19 nodi**
- Andatura massima TAG: **30 nodi**
- Accoppiamento TAG - riduttore: **a mezzo di giunti meccanici autosincronizzanti;**
- Accoppiamento Diesel - riduttore: **a mezzo giunti a frizione in bagno d'olio**
- Consumo specifico: **TAG ≈ 190 g/cv · h a 27.500 cv e a 3.600 giri/min**
Diesel ≈ 170 g/cv · h dal 60 al 100 % della potenza di targa

Incrociatore **VITTORIO VENETO**; *Caccia* **ARDITO e AUDACE**

- Dislocamento massimo: Vittorio Veneto 10.200 t, Ardito e Audace 4600 t
- Apparato di propulsione: **Esotermico a vapore**
- Potenza massima: **73000 CV**
- Ripartizione potenza/asse: **2 assi; 1 elica a pale fisse e 1 gruppo turboriduttore per asse**

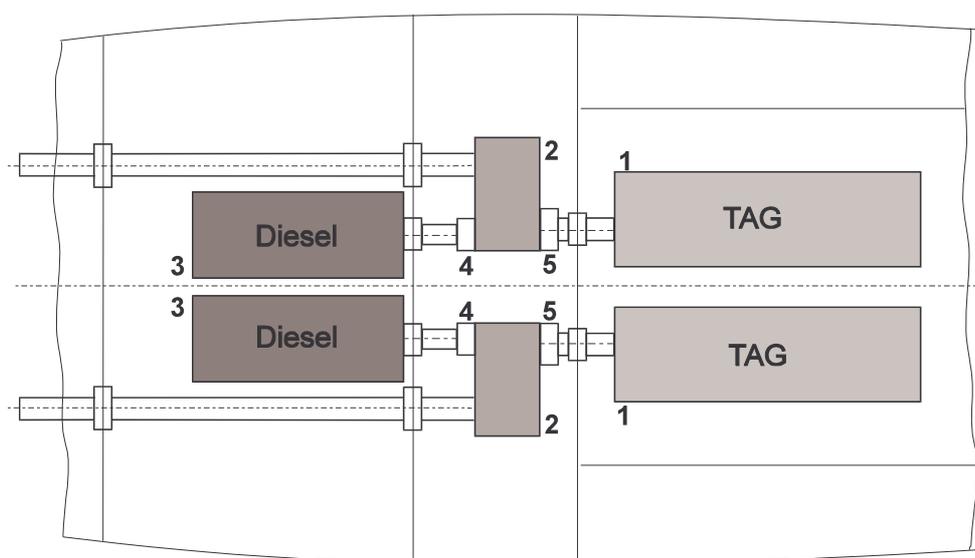


1 Caldaia
2 Turbina AP
3 Turbina BP
4 Riduttore

- Vapore surriscaldato alla pressione di 50 kg/cm² ed alla temperatura di 450°C
- Andatura di crociera: realizzata con l'impiego di una caldaia per asse
- Andatura di tutta forza: realizzata con l'impiego di due caldaie per asse
- Consumo specifico: 280 - 290 g/kW • h
- Rapporto di trasmissione del riduttore di AP: **14÷21**
- Rapporto di trasmissione del riduttore di BP: **12÷17**
- Inversione del moto realizzata mediante turbina di marcia AD costituita da una ruota Curtiss a due salti di velocità inserita sull'asse della turbina di BP

Fregate Classe MAESTRALE

- Dislocamento massimo: **2940 t**
- Apparato di propulsione: **CODOG**
- Potenza massima: TAG **50300 CV**, Diesel **11000 CV**
- Ripartizione potenza/asse: **2 assi; un'elica a pale orientabili, un motore Diesel e una TAG per asse**

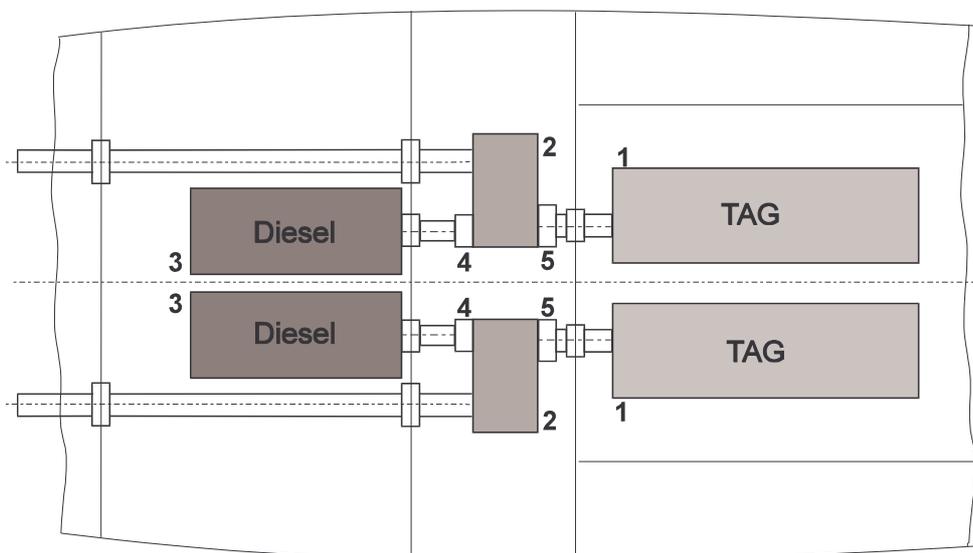


- | | |
|-----------------|---------------------------------|
| 1 Turbina a gas | 4 Giunto WICHITA |
| 2 Riduttore | 5 Giunto autosincronizzante SSS |
| 3 Motore Diesel | |

- Motore Diesel: **GMT B 230-20 DVM (20 cilindri, 5500 CV a 1140 giri/min)**
- TAG: **Fiat GE LM2500 (25000 CV a 3550 giri/min)**
- Andatura di crociera: realizzata con l'impiego dei motori Diesel con giunto Wichita inserito. Regolazione di potenza su combinazione giri-passo con rapporto di riduzione **1:8,7**
- Andatura di tutta forza: realizzata con l'impiego esclusivo delle TAG con giunto SSS inserito e rapporto di riduzione **1: 16,77**
- Consumo specifico: Diesel 152 g/kW · h; TAG 175 g/kW · h
- Inversione del moto: mediante eliche a pale orientabili
- Ruota invertitrice montata sul riduttore di DR con rapporto di riduzione 1:1,014 per permettere la controrotazione degli assi

Fregate Classe LUPO

- Dislocamento massimo: **2570 t**
- Apparato di propulsione: **misto CODOG**
- Potenza massima: TAG **50800 CV**, Diesel **8200 CV**
- Ripartizione potenza/asse: **2 assi; un'elica a pale orientabili, un motore Diesel e una TAG per asse**

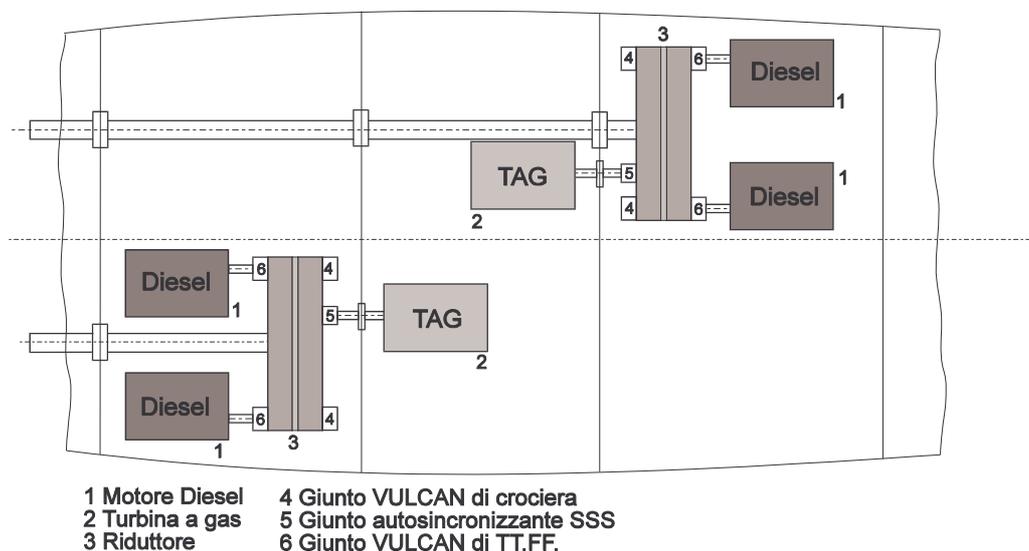


1 Turbina a gas
2 Riduttore
3 Motore Diesel
4 Giunto WICHITA
5 Giunto autosincronizzante SSS

- Motore Diesel: **GMT A 230-20 M (20 cilindri, 4200 CV a 1200 giri/min)**
- TAG: **Fiat GE LM2500 (25000 CV a 3550 giri/min)**
- Andatura di crociera: realizzata con l'impiego dei motori Diesel con giunto Wichita inserito. Regolazione di potenza su combinazione giri-passo con rapporto di riduzione **1:8,2**
- Andatura di tutta forza: realizzata con l'impiego esclusivo delle TAG con giunto SSS inserito e rapporto di riduzione **1: 16,51**
- Consumo specifico: Diesel 174 g/kW • h; TAG 177 g/kW • h
- Inversione del moto: mediante eliche a pale orientabili
- Ruota invertitrice montata sul riduttore di DR con rapporto di riduzione 1:1,014 per permettere la controrotazione degli assi

Fregate Classe **ALPINO**

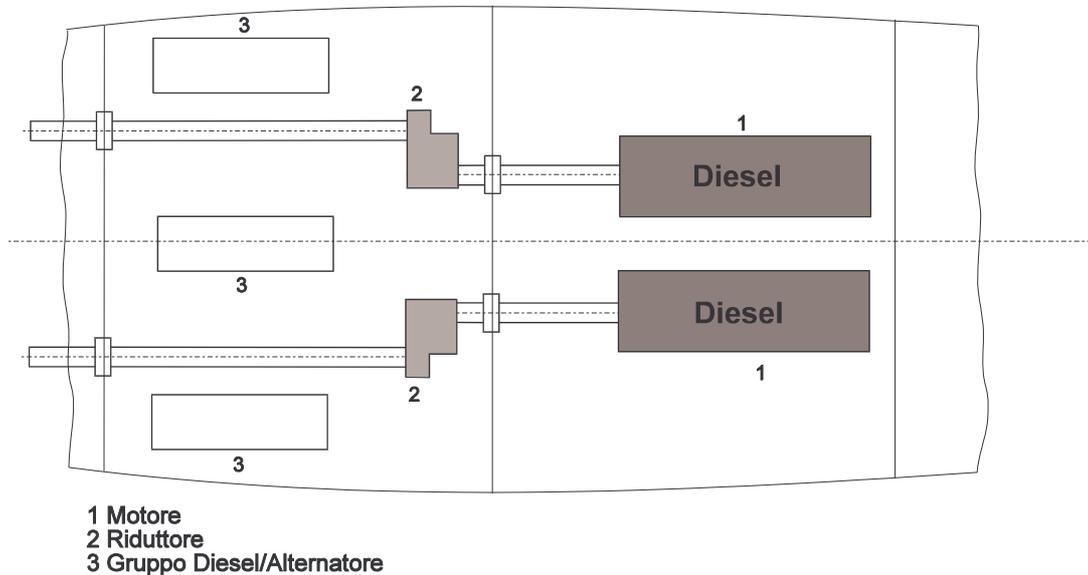
- Dislocamento massimo: **2700 t**
- Apparato di propulsione: **misto CODAG**
- Potenza massima: **31700 CV**
- Ripartizione potenza/asse: **2 assi; un'elica a pale fisse, 2 motori Diesel e una TAG per asse**



- Motore Diesel: **Tosi QTV 320 (12 cilindri, 4200 CV)**
- TAG: **Metrovick G6 (7500 CV)**
- Andatura di crociera: realizzata su uno o due Diesel per asse, inseribili tramite giunti VULCAN di crociera dotati di slip; In questa andatura è raggiunto un massimo di **199 giri/min dell'elica** con un rapporto di riduzione **1:4,4**
- Andatura di tutta forza: realizzata su due Diesel ed una TAG per asse fino a **263,5 giri/min dell'elica** e rapporto di riduzione sul Diesel **1:3,3**
- Consumo specifico: Diesel 152 g/ kW • h; TAG 175 g/kW • h
- Inversione del moto: motori Diesel di tipo reversibile

Corvette Classe MINERVA

- Dislocamento massimo: **1290 t**
- Apparato di propulsione: **Diesel**
- Potenza massima: **11000 CV**
- Ripartizione potenza/asse: **2 assi; un'elica a pale orientabili ed un motore Diesel per asse**



- Motore Diesel: **GMT B 230-20 DVM (5500 CV, campo di funzionamento 720÷1140 giri/min)**
- Consumo specifico: 158 g/kW · h
- Rapporto di riduzione: **1:4,13**
- Inversione del moto: eliche a pale orientabili

10. CIRCUITI AUSILIARI DEGLI APPARATI DI PROPULSIONE

Come si è avuto modo di vedere, gli apparati motori necessitano di un certo numero di circuiti ausiliari il cui scopo è quello di permetterne il funzionamento: generalmente i locali macchina sono attraversati da un gran numero di *linee di tubolature* che trasportano i vari fluidi dai depositi al luogo di impiego ed, eventualmente, ne permettono il reflusso al deposito stesso; i circuiti più importanti sono:

- *circuito gasolio*, che provvede alla movimentazione ed alla conservazione del gasolio
- *circuito lubrificazione*, che provvede alla circolazione ed alla conservazione dell'olio lubrificante
- *circuito refrigerazione*, che provvede alla circolazione acqua mare agli scambiatori termici refrigerazione cuscinetti, olio riduttore ed olio motore
- *aria compressa alta e bassa pressione*, che provvede allo stoccaggio ed alla distribuzione dell'aria compressa ad esempio per l'avviamento motori

Fondamentale per il funzionamento degli apparati motori è il *circuito combustibile* e poiché questo, in Marina Militare è gasolio F-76, viene anche detto *circuito gasolio*; il gasolio viene conservato in casse generalmente ubicate nel doppio fondo, dette *depositi*: i depositi sono collegati a due collettori, quello di *imbarco* e quello di *travaso*.

Il primo permette di rifornire i depositi da una fonte esterna, ed è dotato di più ingressi distinti in due grandi categorie:

- attacchi per imbarco a pressione, ovvero i punti nei quali viene collegata una tubolatura provvisoria nella quale viene pompato gasolio a pressione, generalmente fra i 5 ed i 15 kg/cm^2 ; gli imbarchi a pressione sono utilizzati soprattutto per il rifornimento in mare (sia laterale che prora-poppa) oppure nel caso di collegamento con terminali combustibili dotati di grande capacità di pompaggio
- attacchi per imbarco a gravità, ovvero punti nei quali viene inserita una tubolatura provvisoria dalla quale fluisce gasolio a bassa pressione, generalmente inferiore a 2 kg/cm^2 ; gli imbarchi a gravità sono utilizzati in modo particolare per il rifornimento tramite bettolina o cisterna, quando la capacità di pompaggio è limitata.

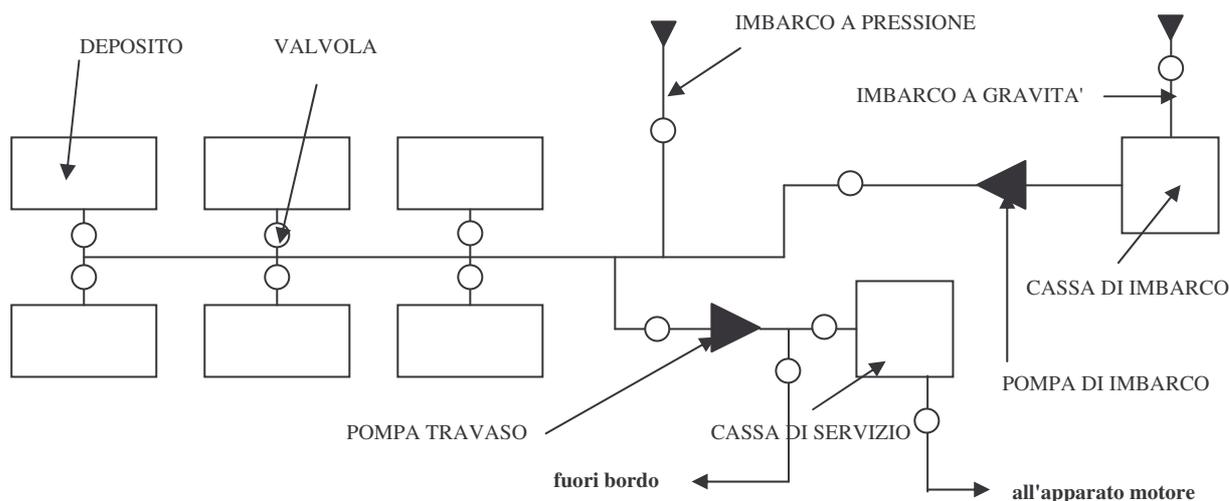


Figura 1: Schema di ramo circuito gasolio

Mentre il circuito di imbarco a pressione raggiunge virtualmente tutti i depositi, quello di imbarco a gravità sbocca esclusivamente in un deposito (od un gruppo di due, massimo quattro depositi), che costituiscono una sorta di stivaggio temporaneo in attesa che il gasolio venga ridistribuito mediante

il circuito di travaso; mentre l'imbarco a pressione ha almeno quattro punti di collegamento, due a prora (dritta e sinistra) e due a centro nave, quello a gravità generalmente ne ha due soli posti a distanza intermedia fra gli altri due.

Come evidenziato nella figura (1) il circuito di imbarco a gravità termina in una cassa detta *cassa di imbarco* (o *casa alta*) e da lì viene travasata nei depositi tramite una apposita pompa di imbarco.

Il circuito di travaso è un circuito estremamente complesso che permette sia di immettere che di aspirare gasolio da qualunque deposito, inoltre permette di rifornire le *casse di servizio*, ed eventualmente di mandare gasolio fuoribordo (ad esempio in una bettolina).

Esso viene utilizzato anche per ridistribuire il gasolio fra i depositi, quando possibile, in modo da eliminare specchi liberi e provvedere ad avere un assetto trasversale e longitudinale diritto; il circuito travaso può essere unico o sdoppiato: è unico nel caso in cui, come sulle navi più piccole, la pompa travaso può aspirare e mandare a tutti i depositi, mentre è sdoppiato quando è costituito da due gruppi di tubolature distinte, ognuna fornita di una sua propria pompa travaso che può aspirare e mandare esclusivamente da uno dei due gruppi, gruppi che vengono tenuti sezionati, ovvero mantenuti separati mediante la chiusura delle apposite valvole di comunicazione; questa soluzione è preferita sulle navi più grandi.

Il circuito travaso permette di rifornire le *casse di servizio* ovvero le casse dalle quali aspirano direttamente gli apparati motori; le casse di servizio hanno un volume sufficiente per garantire il funzionamento dell'apparato motore per ventiquattro ore nel caso in cui non fosse possibile rifornirle, sono separate da altre casse da delle apposite *intercapedini*, allo scopo di non avere inquinamenti con altri liquidi, e per lo stesso motivo sono generalmente poste su *selle* il cui scopo è evitare di porle direttamente a contatto con lo scafo.

Dalle casse di servizio aspira il depuratore gasolio per eliminare acqua e particelle pesanti: infatti l'acqua comporterebbe degli inaccettabili rischi di spegnimento degli apparati motori, mentre le particelle pesanti potrebbero tappare gli orifizi calibrati degli iniettori o di altri sistemi di controllo producendo gravi danni, oltre al sempre presente fenomeno dell'erosione, ovvero al danneggiamento che tali particelle producono sulla tubolatura a causa dell'alta velocità di scorrimento del flusso; il depuratore manda il gasolio depurato all'interno della cassa di servizio stessa, in modo tale che l'intero contenuto della cassa è costantemente oggetto di depurazione.

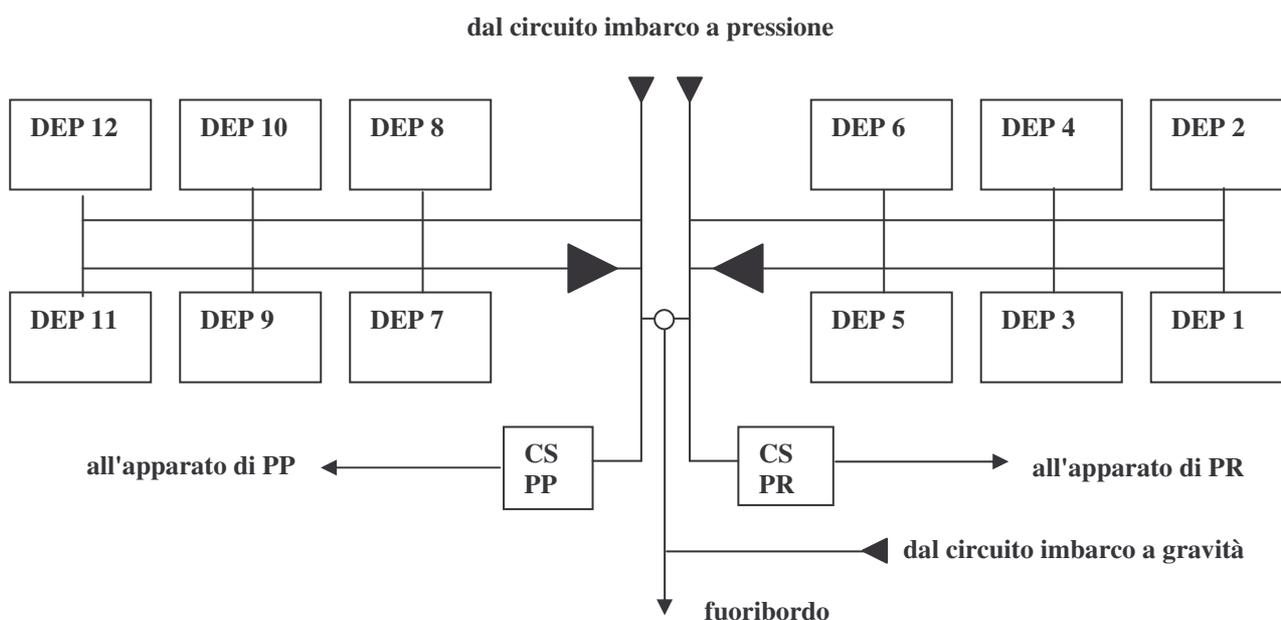


Figura 2: Schema semplificato circuito travaso

La *pompa di servizio* aspira gasolio dalla sopra citata cassa, generalmente attraverso una batteria di filtri: il modo con cui il sistema è realizzato dipende dal tipo di apparato motore, dalla

sua sensibilità agli agenti inquinanti, dalle consuetudini del costruttore; generalmente è presente una batteria di filtri detti "a freddo" ovvero sull'aspirazione della pompa, che dovrebbero proteggerla dall'ingresso di eventuali corpi estranei, mentre sulla mandata ve n'è un'altra detta "a caldo", generalmente dotata di filtrazione meccanica e di filtri a coalescenza, ovvero separatori dell'acqua; nella maggior parte delle realizzazioni i primi filtri posti sull'aspirazione dalla cassa di servizio sono filtri *duplex* ovvero formati da due gruppi filtranti distinti: durante il funzionamento normale uno solo dei due gruppi è attraversato dal gasolio, mentre l'altro è escluso; nel momento in cui viene rilevato l'intasamento del filtro in funzione l'operatore provvede ad escluderlo dal flusso e contestualmente inserisce l'altro.

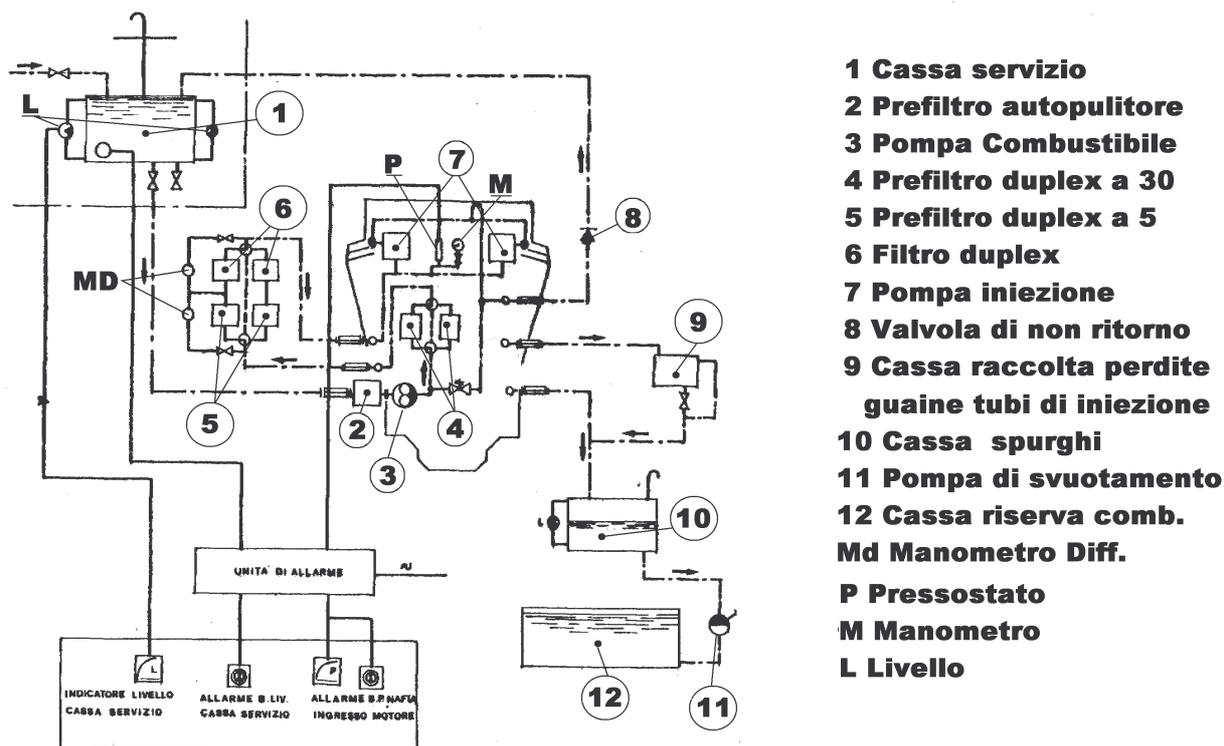


Figura 3: Schema circuito del combustibile per motore Diesel

Le casse di servizio vengono rifornite ad ogni turno di guardia; se la nave ha un circuito travaso sezionabile (come sempre accade quando vi sono due apparati motori distinti ed indipendenti) l'apparato motore di poppa viene rifornito dalla sezione poppiera mentre quello di prora dalla sezione prodiera: tale accorgimento permette di evitare che eventuali problemi relativi all'inquinamento di un deposito possano interessare l'intero apparato motore.

I depositi interessati sono quindi generalmente due: prima di iniziare il travaso ognuno dei depositi deve essere sondato con la *pasta rossa*, una particolare sostanza che, normalmente di color senape, a contatto con l'acqua vira al rosso, segnalando la eventuale presenza e la quantità di acqua presente nel deposito; naturalmente, in caso di inquinamento il deposito deve essere decantato¹ prima di effettuare il rifornimento della cassa di servizio; anche la cassa di servizio deve essere sondata con la pasta rossa, allo scopo di evidenziare la presenza di problemi già presenti ed allo stesso modo deve essere decantata se viene rilevata la presenza di acqua; naturalmente la sonda alla cassa di

¹ Con il termine decantato si intende si intende la rimozione dell'acqua dal fondo del deposito

servizio va fatta prima del travaso, in caso contrario la miscelazione dovuta all'ingresso del gasolio, rimescolando il contenuto, renderebbe inutile l'operazione; durante il travaso il personale deve porre particolare attenzione al verificarsi di anomalie sul circuito di alimentazione degli apparati, come, ad esempio, l'aumento della pressione differenziale nei filtri, segnale che qualche avaria è in atto. Evitare quindi di iniziare il travaso in prossimità o durante una manovra o una navigazione in acque ristrette o particolarmente trafficate (come ad esempio lo stretto di Messina): i travasi devono concludersi necessariamente almeno mezzora e le letture sui filtri devono essere eseguite prima e devono aver dato esiti soddisfacenti: è piuttosto antipatico trovarsi in blocco durante una manovra o in mezzo ad un canale.

Un altro circuito estremamente importante è il circuito di *lubrificazione* che provvede sia alla lubrificazione del riduttore ed eventualmente delle turbine a vapore, se la nave è dotata di tale impianto, sia al trasferimento dell'olio dai depositi alle casse degli impianti se la nave è motorizzata diesel o T.A.G.

Negli impianti a vapore, nel particolare, la lubrificazione del riduttore è assicurata dallo stesso tipo di olio che lubrifica le turbine principali (olio 2001 per turboriduttori) ed il circuito è unico: l'olio viene aspirato dalla *cassa di servizio* da una apposita pompa detta *pompa di lubrificazione principale* che invia il fluido al refrigerante dell'olio, ove viene raffreddato tramite acqua mare, e quindi ai cuscinetti della turbina, a quelli del riduttore, alle ruote (tramite particolari spruzzatori detti *a zampa di ragno*) ed al cuscinetto reggispinta; l'olio ritorna infine alla cassa di servizio.

La cassa di servizio è dotata di un apposito *livellostato* che avverte quanto il livello dell'olio è insufficiente nel quale caso essa viene rifornita da una apposita *cassa riserva* tramite una pompa ausiliaria, molto spesso pneumatica; dalla cassa di servizio aspira e manda il depuratore dell'olio il cui scopo è separare, per centrifugazione, l'acqua dall'olio.

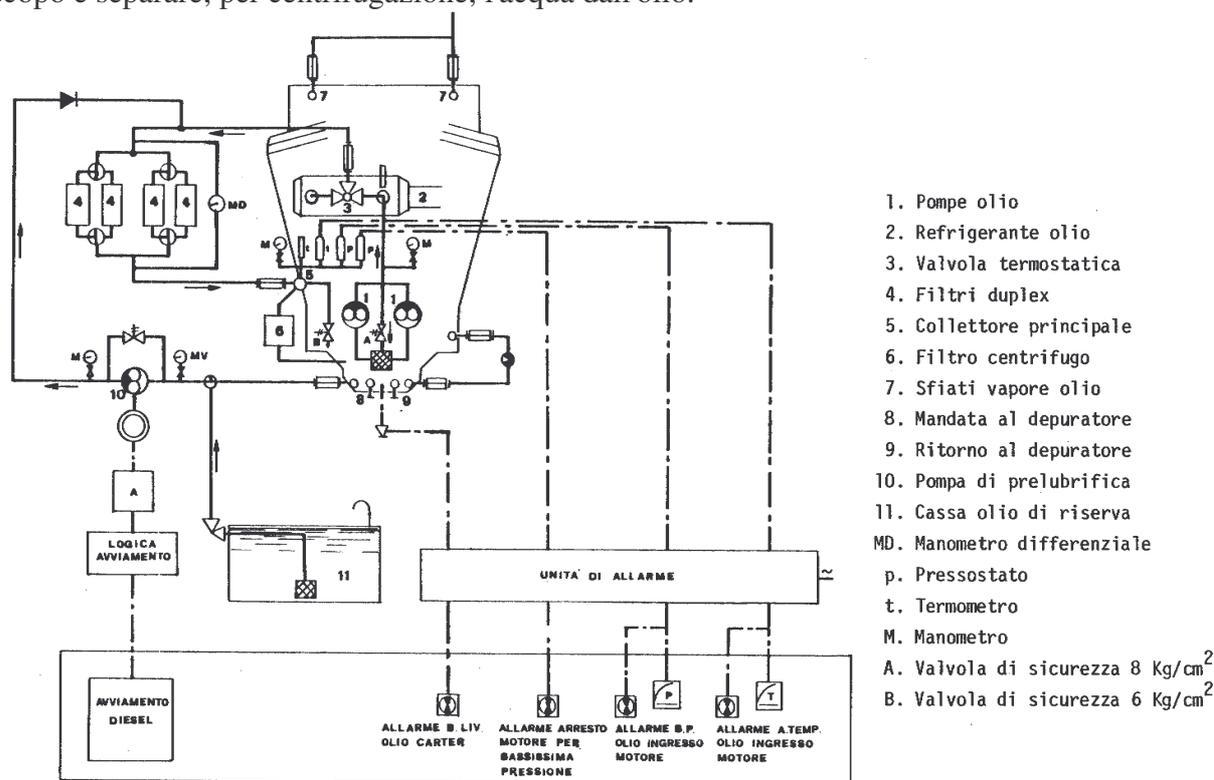


Figura 4: Schema circuito lubrificazione per motore Diesel

Negli impianti diesel e T.A.G. la cassa di servizio è parte integrante della macchina, ad esempio nel caso dei motori diesel l'olio lubrificante è principalmente contenuto nel *carter* ovvero la parte bassa dell'incastellatura del motore, mentre la T.A.G. ha un suo proprio serbatoio; in entrambi i casi il fluido viene aspirato da pompe trascinate, ovvero che prendono il moto dall'asse

motore della macchina: nel caso del diesel dal gruppo degli ingranaggi ausiliari (che serve anche la distribuzione, ovvero le camme delle valvole) nella T.A.G. attraverso un rinvio apposito che comunica il moto alla *scatola ausiliaria* che, appunto, comanda tutti gli ausiliari e permette l'avviamento della macchina stessa, nonché gli eventuali gruppi di filtraggio.

Altri circuiti fondamentali per l'apparato motore sono quelli di *raffreddamento* e possono essere ad acqua mare od acqua dolce; generalmente l'acqua dolce è impiegata nei motori diesel per la refrigerazione delle testate, delle valvole, degli iniettori e costituisce un circuito autonomo, interno alla macchina, azionato da una pompa trascinata e dotato sia di un proprio serbatoio (detto *cassetta di compenso*) che di un refrigerante di scambio con acqua di mare.

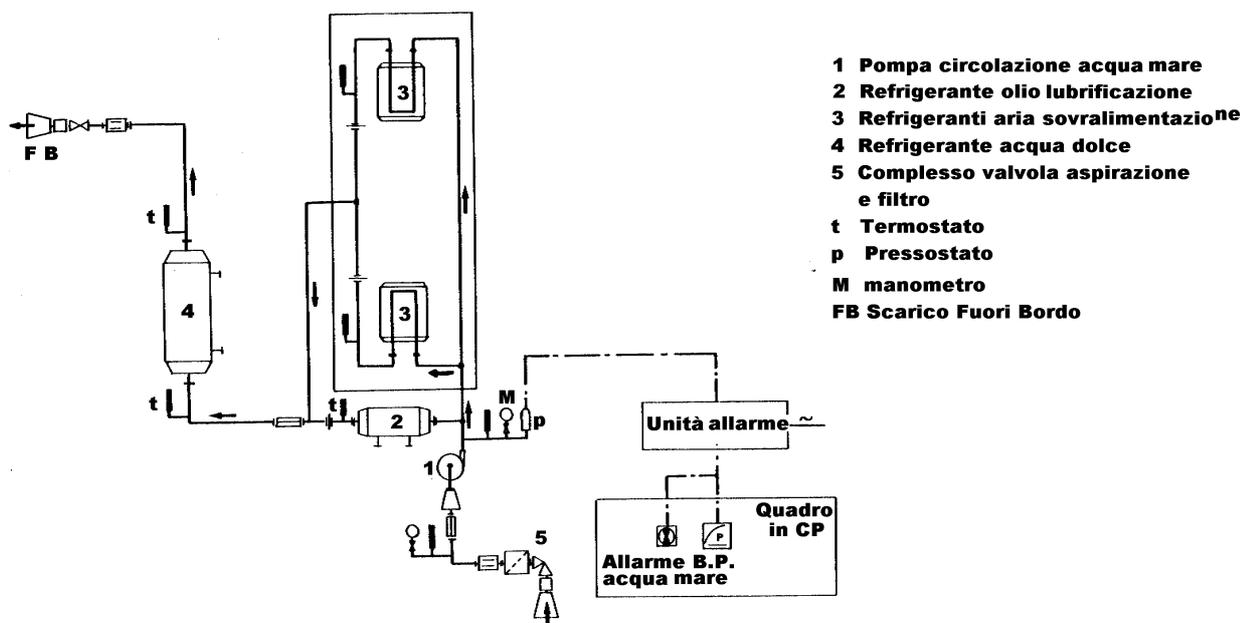


Figura 5: Schema circuito refrigerazione ad acqua di mare per motore Diesel

L'olio lubrificante delle macchine, dei riduttori, del reggispingita e dei cuscinetti della linea d'asse è refrigerato tramite appositi scambiatori di calore ad acqua di mare, che vengono alimentati da un circuito che spesso è detto *refrigerazione macchinari*: l'acqua mare viene aspirata da una pompa elettrica che la invia ad un collettore che alimenta tutti gli scambiatori; l'acqua in uscita viene scaricata a mare. Tale collettore provvede anche alla refrigerazione delle tenute dell'asse, mentre il lavaggio dei bracci e degli astucci è effettuato dall'acqua del collettore incendio, opportunamente ridotta di pressione.

Infine merita di essere menzionato il circuito *aria compressa*, che normalmente è sdoppiato in due parti, quella *alta pressione* e quella *bassa pressione*; il circuito alta pressione serve per l'avviamento dei motori, l'azionamento di grandi valvole o come manovra di emergenza di impianti oleodinamici: esso viene alimentato da appositi compressori e l'aria viene inviata, tramite un refrigerante ad acqua mare, a delle bombole che garantiscono una sufficiente riserva; da lì, tramite l'azionamento di valvole elettriche o pneumatiche, viene inviata agli utenti.

Il circuito bassa pressione fornisce l'aria necessaria all'azionamento dei sistemi di controllo e regolazione, il segnale di comando per l'apertura o chiusura di serrande, per trasduttori od altri elementi. Generalmente il circuito alta pressione è alimentato a 40 bar, quello a bassa pressione a 2,1 bar; quest'ultima normalmente è derivata dalla prima tramite idonee valvole riduttrici di pressione.

Il circuito è corredato da sistemi di filtraggio dell'aria, fondamentalmente deumidificatori e disoleatori: i deumidificatori devono rimuovere l'acqua dall'aria, acqua che potrebbe compromettere il regolare funzionamento del sistema tappando valvole calibrate oppure grippandole, allo stesso

modo l'olio che normalmente proviene dai compressori, interferisce con il buon funzionamento del sistema, e viene eliminato nei disoleatori.

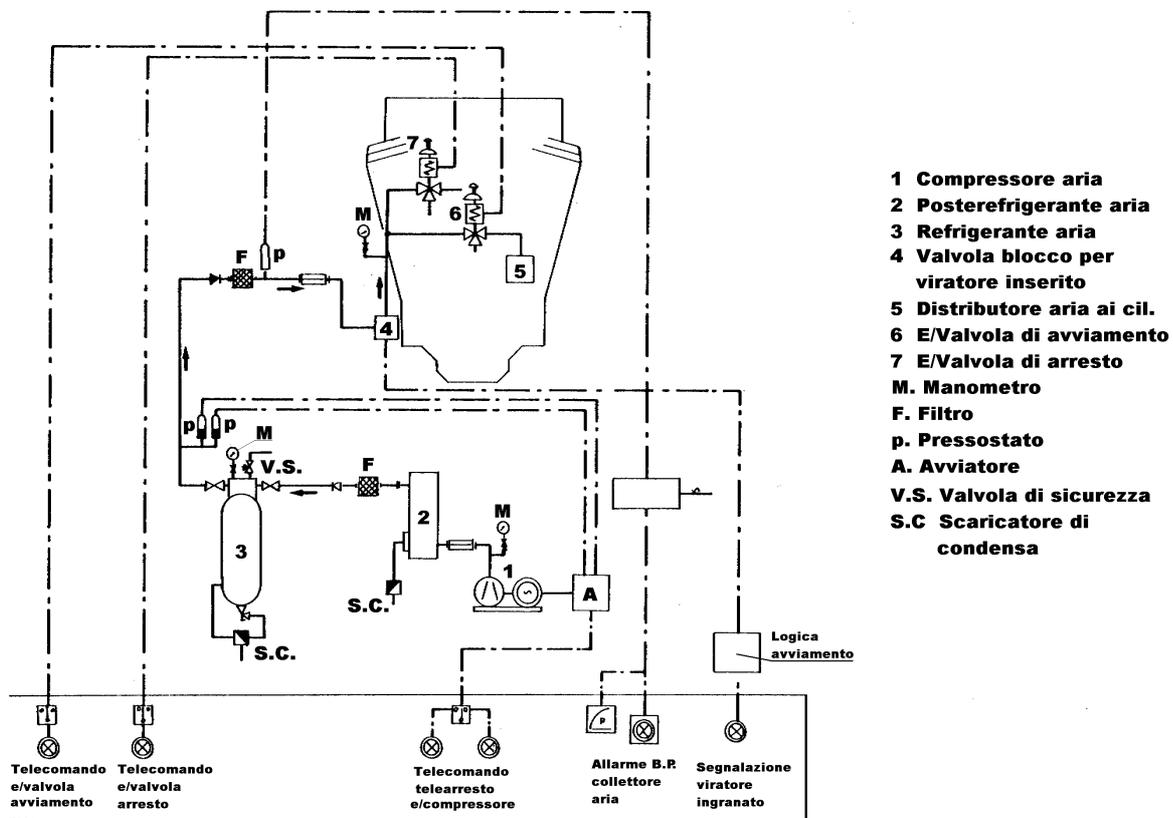


Figura 6: Schema circuito dell'aria compressa per motore Diesel

10. CENNI SUGLI APPARATI MOTORI SPECIALI

L'evoluzione tecnologica avutasi dalla fine del secondo conflitto mondiale ha comportato lo sviluppo di apparati motori e propulsori speciali che, sebbene debbano la loro evoluzione al tentativo di risoluzione di problemi specifici, non di meno hanno avuto una qualche applicazione anche nelle normali realizzazioni sia mercantili che militari.

Si desidera sottolineare, in ogni caso, come gli apparati motori ed i propulsori speciali facciano parte di una sorta di "mercato di nicchia" ovvero la loro applicazione è sostanzialmente condizionata dalle prestazioni richieste al progetto, prestazioni che devono essere necessariamente estreme per giustificare l'impegno finanziario e tecnologico che normalmente è estremamente oneroso.

Tra gli apparati motori speciali possiamo citare gli impianti nucleari e la tecnologia delle celle combustibili, tra i propulsori l'idrogetto ed il *pod-azimuthale*, mentre sia come impianto che come propulsore speciale si può annoverare la propulsione *magnetoidrodinamica*, escludendo altri tipi di impianti che, sebbene esistenti, non hanno ancora raggiunto nemmeno la maturità prototipica.

Tra gli apparati motori speciali gli impianti nucleari sono sicuramente quelli che, per numero e tonnellaggio, occupano la posizione di maggior rilievo, sebbene la loro utilizzazione sia sostanzialmente limitata alle realizzazioni militari e, nel particolare, ai sottomarini ed ad alcune rilevanti realizzazioni come le portaerei e gli incrociatori di scorta a queste ultime; allo stato attuale le realizzazioni mercantili sono ridotte ad alcuni rompighiaccio, dopo lo sfortunato caso della Savannah, dismessa per insostenibilità dei costi, nonostante sia a tutt'oggi detentrici del record di velocità per la traversata atlantica, denominato "Nastro azzurro".

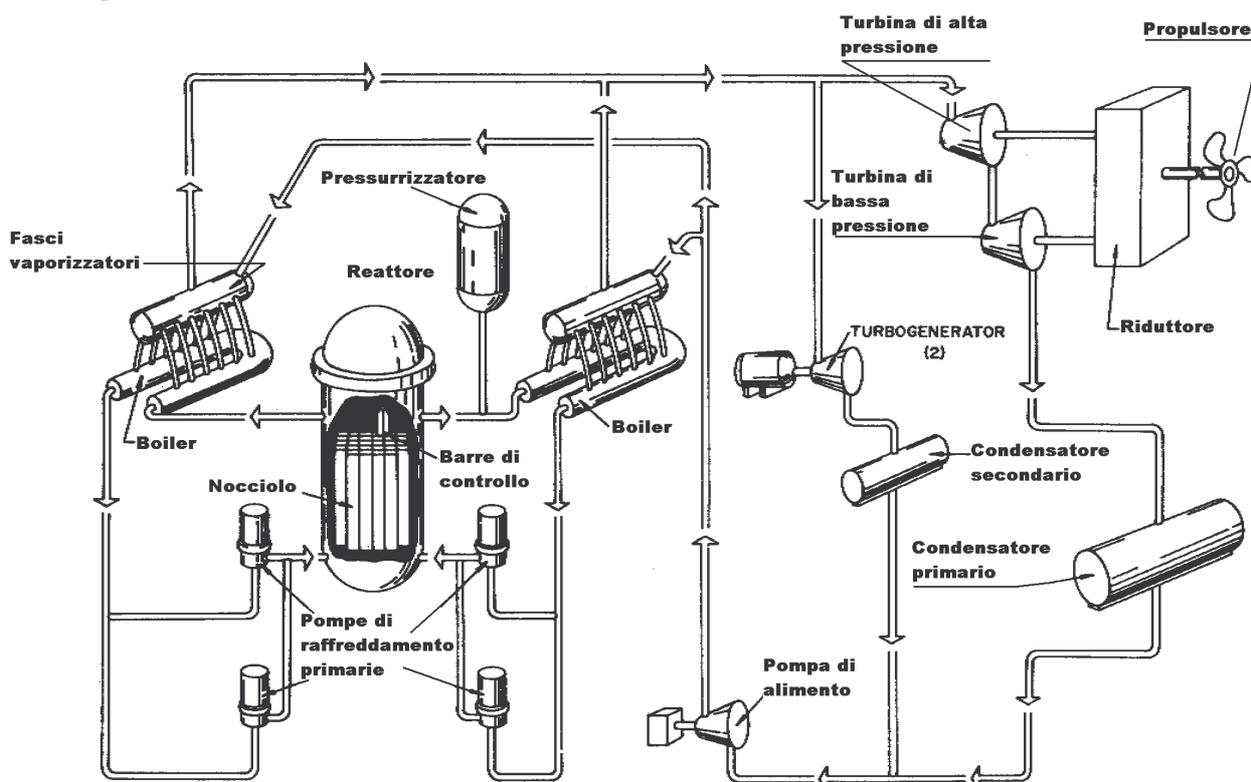


Figura 1: Schema d'impianto di NS Savannah

L'impianto nucleare è sostanzialmente un impianto esotermico e di questo ha tutti vantaggi ed i limiti, con la sola particolarità di avere, al posto della caldaia, un reattore nucleare, nel quale

avviene una reazione *fisica* e non chimica, come nel caso della combustione¹; il calore generato da tale reazione viene ceduto quindi al termovettore (l'acqua, nella totalità degli impianti navali) che successivamente viene impiegato per realizzare gli scopi propulsivi.

La reazione fisica che avviene all'interno del reattore è detta *fissione*, ovvero un nucleo di un certo materiale viene colpito con una particella ad alta energia e si fraziona in almeno tre distinte parti:

- i due *prodotti di fissione* due elementi chimici completamente distinti dal materiale originale, normalmente piuttosto considerevoli in massa
- *particelle ad alta energia* ovvero particelle precedentemente contenute nel nucleo del materiale originario che per effetto della collisione non si legano ai prodotti di fissione e seguono una propria storia
- *emissioni radioattive* ovvero fasci di particelle a bassa energia, come emissioni di α , di β , di γ e di X; da notare che la differenza tra le particelle ad alta energia e le emissioni radioattive è sostanzialmente dovuta alla diversità della massa associata

Anche la fissione, come qualunque reazione fisica, segue il principio della conservazione dell'energia nella sua forma più generale, ovvero considerando che massa ed energia sono correlate dalla famosissima legge formulata da Einstein:

$$E = m \cdot c^2$$

ove E rappresenta per l'appunto l'energia, m la massa e c è una costante, anzi, in senso relativistico, la costante per eccellenza, ovvero la velocità della luce; se si analizza dimensionalmente la relazione, si nota come E abbia le dimensioni di una energia cinetica.

Analizzando la massa totale iniziale, data dalla somma della massa dell'atomo bersaglio e quella della particella collidente e correlandola con quella finale, ovvero la somma dei prodotti di fissione, delle particelle ad alta energia e delle emissioni, si noterebbe che la massa finale è leggermente inferiore a quella iniziale, *ovvero una certa parte in massa è divenuta qualche cosa di diverso, nel particolare energia cinetica.*²

Dobbiamo ora immaginare che l'atomo del materiale originario si trovi vincolato nella propria posizione all'interno del cristallo, che a sua volta è l'elemento di base della *barra combustibile*: mentre le particelle ad alta energia e le emissioni radioattive hanno dimensioni estremamente limitate, e quindi fluiscono attraverso il cristallo con relativa facilità, i prodotti di fissione, dalle dimensioni molto maggiori e dalla grande energia cinetica associata non possono spostarsi all'interno del cristallo con la stessa facilità e quindi collidono immediatamente con gli altri elementi della barra, cedendo gran parte dell'energia cinetica e provocando una forte vibrazione all'interno della struttura stessa: tale vibrazione rappresenta, in termini macroscopici, un aumento di temperatura, come dimostrato da Boltzman, indice di una cessione di energia e quindi di calore.

Si può pensare al reticolo cristallino come ad una rete di un campo da tennis: una zanzara, sebbene voli ad alta velocità, ha dimensioni così contenute da passare agevolmente tra le maglie e quindi non urta la rete, mentre una pallina da tennis, anche a bassa velocità viene da questa trattenuta, fermata e l'energia posseduta dalla palla viene ceduta alla rete e ne produce una vibrazione.

L'elemento che viene fissionato è un particolare isotopo dell'uranio, il 235: infatti non è semplice fissionare un elemento, sebbene sia fisicamente possibile, ma la realizzazione tecnica è piuttosto complessa e tale isotopo è stato scelto per la sua relativamente alta probabilità di essere fissionato con un certo tipo di particella ad alta energia, nel particolare un neutrone a velocità termica;

¹ Si desidera sottolineare come una reazione chimica sia sostanzialmente una combinazione o ricombinazione di atomi all'interno di molecole, nella quale entrano in gioco esclusivamente gli elettroni con i loro potenziali energetici, mentre una reazione fisica coinvolge anche e soprattutto il nucleo degli atomi e quindi le particelle elementari che lo compongono, le quali hanno potenziali energetici molto più elevati

² Nella realtà il calcolo è un po' più complesso e coinvolge l'energia totale, della quale non fa esclusivamente parte la massa: nel calcolo dell'energia totale va considerata l'eguaglianza della quantità di moto e del momento della quantità di moto (*linear momentum* ed *angular momentum*) e la risoluzione di questo sistema, che comprende anche l'equazione di equivalenza relativistica, produce come risultato l'energia generata dalla fissione

quest'ultimo è l'elemento collidente: la possibilità di un atomo di essere fissionato viene definita *cross-section a fissione* ed è dipendente non solo dall'atomo ma anche dal tipo e dall'energia della particella: nel caso analizzato l'U-235 è l'elemento che ha la maggior probabilità di essere fissionato in senso assoluto, purchè la particella sia un neutrone termico.

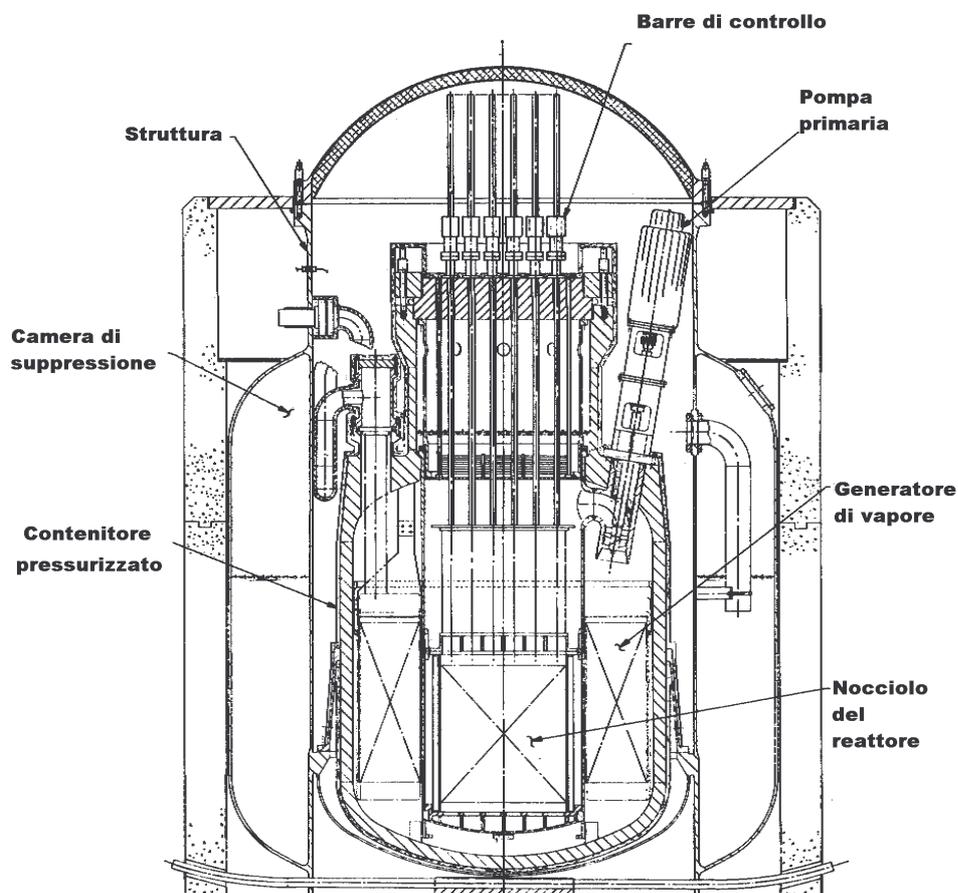


Figura 2: Evoluzione del reattore CNSG III Babcock & Wilcox

Il reattore è sostanzialmente un assemblato di forma cilindrica nel quale sono disposte le barre del combustibile, dell'eventuale moderatore e l'acqua: l'energia sviluppata dalla fissione viene ceduta quindi all'acqua; se nel reattore si raggiunge la completa vaporizzazione allora esso è detto BWR (Boiling Water Reactor), viceversa se l'acqua mantiene sempre la sua forma liquida PWR (Pressurized Water Reactor); nel primo caso il vapore generato viene immediatamente utilizzato nelle turbine principali e nei turboalternatori, nel secondo caso l'acqua viene fatta fluire attraverso un particolare organo, detto *scambiatore primario-secondario*, che permette la cessione di calore ad acqua di un altro circuito, che vaporizza e viene quindi utilizzata nelle macchine.

Storicamente il BWR è il primo reattore sviluppato ed impiegato anche nella tecnologia navale, tende ad essere sostanzialmente più leggero, più reattivo alle variazioni di carico, richiede un combustibile con minor tenore di U-235 e quindi meno costoso ma, di contro, tende ad essere più difficile da condurre e più sensibile alle variazioni di carico, è potenzialmente instabile e può divenire pericoloso (il caso di Chernobyl è emblematico); il PWR, sviluppato successivamente, tende ad essere più pesante ed ingombrante, meno reattivo alle variazioni di carico, richiede un combustibile con maggior tenore di U-235 e quindi più costoso ma è sostanzialmente più semplice

da controllare, meno sensibile alle variazioni di carico, è stabile e difficilmente tende ad andare in fuga (il caso di Three Mile Island è a sua volta emblematico)³.

Il reattore, per il particolare tipo di reazione che utilizza, rende superflua qualunque considerazione di consumo specifico, ma la sua realizzazione e conduzione richiede il ricorso a tecnologie di elevato livello ed a personale specializzato, che, oltre ad essere estremamente onerose, non sono alla portata di qualunque nazione e forza armata; nel caso italiano, nel particolare, la realizzazione della rifornitrice o del sottomarino nucleare, studiati e progettati, avrebbe richiesto uno sforzo finanziario tale da essere insostenibile per l'apparato statale nel periodo degli anni '60 e '70.

La tecnologia delle celle combustibili, adottata dai tedeschi per i loro sommergibili della classe U 212, rappresenta un favorevole compromesso tra il desiderio di svincolarsi dalla limitata autonomia fornita dalle batterie tradizionali e quindi aumentare in modo consistente il periodo di operatività in immersione e la necessità di non ricorrere alla tecnologia nucleare, come si è visto onerosa ed, in ogni caso, non particolarmente popolare tra le opinioni pubbliche.

Le celle a combustibile sono dei sistemi elettrochimici capaci di convertire l'energia chimica di un combustibile (in genere idrogeno) in energia elettrica, senza l'intervento intermedio di un ciclo termico, pertanto sono capaci di rendimenti di conversione più elevati rispetto a quelli delle macchine termiche convenzionali.

Una cella a combustibile funziona in modo analogo ad una batteria, in quanto produce energia elettrica attraverso un processo elettrochimico; tuttavia a differenza di quest'ultima consuma sostanze provenienti dall'esterno e quindi è in grado di funzionare senza interruzioni, finché al sistema viene fornito combustibile (idrogeno) ed ossidante (ossigeno o aria).

Di seguito riportiamo uno schema dove viene illustrato il problema della conversione dell'energia ed in particolare il confronto tra la logica di funzionamento dei sistemi tradizionali e quella dei sistemi fuel cells:

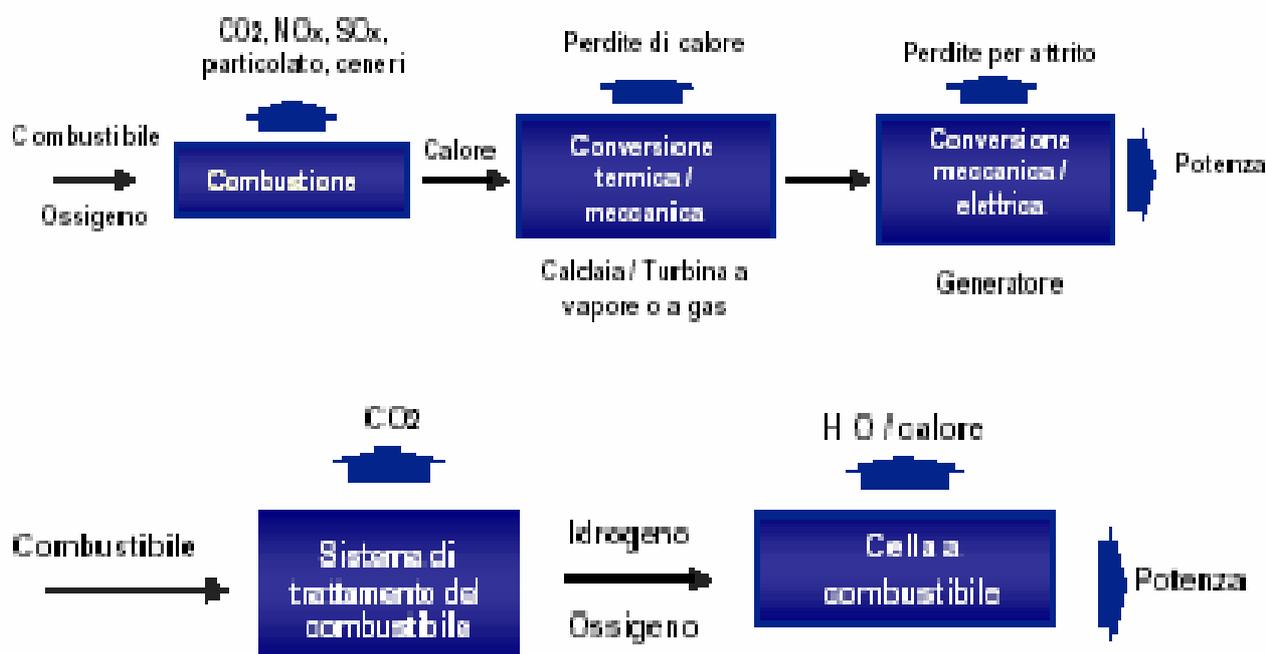


Figura 3: Confronto tra ciclo tradizionale (sopra) e fuel cell (sotto)

³ Sia Chernobyl che Three Mile Island rappresentano i due peggiori incidenti della tecnologia nucleare, ma mentre il primo è stato decisamente catastrofico, il secondo, nonostante la paura quasi isterica che suscitò nella seconda metà degli anni '70, fu sostanzialmente senza conseguenze; il primo reattore era BWR, il secondo PWR.

La cella a combustibile consiste in due elettrodi costituiti di materiale poroso, separati da un elettrolita. Gli elettrodi fungono da siti catalitici per le reazioni di cella che consumano fondamentalmente idrogeno ed ossigeno, con produzione d'acqua e passaggio di corrente elettrica *nel circuito esterno*.

L'elettrolita ha la funzione di condurre gli ioni prodotti da una reazione e consumati dall'altra, chiudendo il circuito elettrico all'interno della cella. La trasformazione elettrochimica è accompagnata da liberazione di calore, che è necessario estrarre per mantenere costante la temperatura. Più celle sono disposte in serie a mezzo di piatti bipolari, a formare il cosiddetto "stack". Esistono diverse tecnologie di cella, con diverse caratteristiche e diverso grado di sviluppo. Normalmente le celle vengono classificate sulla base dell'elettrolita utilizzato (celle alcaline, ad elettrolita polimerico, ad acido fosforico, a carbonati fusi, a ossidi solidi) o alla temperatura di funzionamento (celle a bassa e alta temperatura).

L'elettrolita determina o condiziona fortemente:

- il campo di temperatura operativo
- il tipo di ioni e la direzione in cui diffondono attraverso la cella
- la natura dei materiali di cella
- la composizione dei gas reagenti
- le modalità di smaltimento dei prodotti di reazione
- le caratteristiche di resistenza meccanica e di utilizzo
- la vita della cella.

Sono simili alle batterie e quindi come gli altri elementi voltaici, una cella a combustibile è formata essenzialmente da due elettrodi, catodo ed anodo, e da un elettrolita che permette la migrazione degli ioni.

Diversamente dalle batterie comuni, nella cella a combustibile, la materia attiva è continuamente rinnovata e quindi la corrente elettrica continua può essere erogata indefinitamente se si mantiene l'alimentazione di combustibile e di gas ossidanti.

Il combustibile (idrogeno) e i gas ossidanti (ossigeno dato semplicemente dall'aria) lambiscono rispettivamente l'anodo e il catodo (sulle facce opposte a quelle in contatto con l'elettrolita).

Data la porosità degli elettrodi, vengono in questo modo continuamente alimentate le reazioni d'ossidazione del combustibile e di riduzione dei gas ossidanti.

Come combustibile può essere usato, oltre all'idrogeno, anche il metano od il metanolo; da questi naturalmente l'idrogeno deve essere estratto con un particolare procedimento. Le celle a combustione possono essere pensate come uno strumento che fa l'inverso dei più conosciuti esperimenti dove passando una corrente elettrica attraverso l'acqua si divide in idrogeno e ossigeno. Un aspetto d'importanza fondamentale per le applicazioni delle celle a combustibile, è rappresentato dal fatto che gli effluenti (acqua e gas esausti), che vanno continuamente rimossi dalla cella, non contengono sostanze inquinanti.

La cella ha struttura piatta a tre strati, di cui quello centrale, compreso fra il catodo e l'anodo, costituisce o contiene l'elettrolita. Alcuni tipi di celle funzionano in orizzontale altre in verticale.

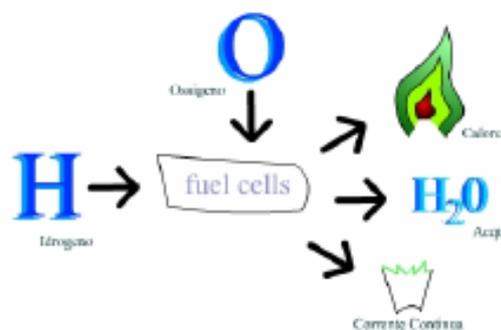


Figura 5: Schema funzionale fuel cell

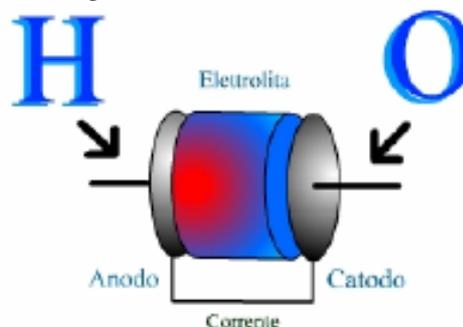


Figura 6: Schema della singola cella

In pratica, le superfici affacciate devono avere un'area sufficiente per ottenere intensità di corrente adeguata alle esigenze applicative. Si può così arrivare, in funzione dell'applicazione e della filiera di celle, a superfici dell'ordine del metro quadrato. Le singole celle (caratterizzate da tensioni comprese da 0,5 volt ad 1 volt, secondo la tecnologia adottata e il carico elettrico ad essa collegato) vengono sovrapposte una all'altra, collegandole in serie in modo da ricavare una tensione complessiva del valore desiderato.

“L'impilamento” di celle che così si ottiene, forma il cosiddetto stack (o “pila”), che rappresenta la base della sezione elettrochimica.

Generalmente un impianto a celle a combustibile è composto, oltre che dal modulo di potenza (contenente la sezione elettrochimica), anche da un convertitore di corrente (*inverter*) e da un trasformatore che convertono la corrente continua generata dalla pila in corrente alternata alla tensione e alla frequenza desiderate.

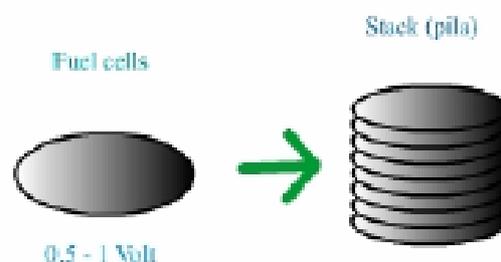


Figura 7: Fuel cell impilate a formare uno stack

Le celle combustibili sono dette *sistema di propulsione indipendente dall'aria* (A.I.P.): tale impianto caratterizza il sistema propulsivo perché consente al sommergibile di condurre missioni in immersione di lunga durata in modo completamente indipendente dall'aria esterna, senza richiedere periodi intermedi di snorkel, necessari per la ricarica delle batterie di propulsione e tipici dei sommergibili convenzionali e tradizionali.

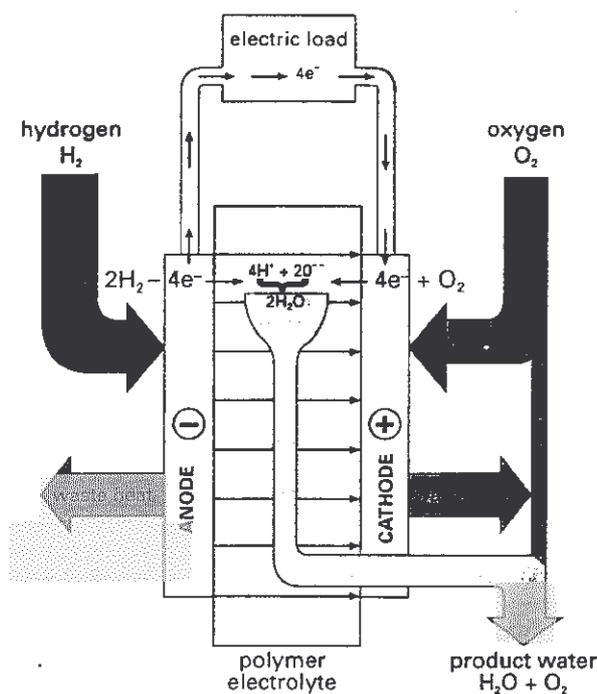


Figura 8: Schema delle reazioni elettrochimiche

Esso è composto dai seguenti componenti principali: moduli di celle combustibili, contenitori di idrogeno e di ossigeno posti all'esterno dello scafo resistente; all'interno delle celle combustibili si svolge la reazione chimica controllata tra combustibile (idrogeno) e comburente (ossigeno), con produzione diretta di energia elettrica ed acqua, secondo il principio inverso a quello della reazione di elettrolisi dell'acqua; la trasformazione avviene con elevato rendimento e silenziosamente.

I problemi principali che sono stati risolti per permettere la realizzazione di tale apparato sono:

- il controllo della reazione di combustione, che avviene grazie alla presenza di un polimero elettrolita che consente di suddividere il flusso di comburente e combustibile in microflussi che possono essere controllati per gruppi e con relativa facilità
- il confinamento dell'idrogeno e dell'ossigeno, elementi particolarmente reattivi e quindi potenzialmente pericolosi dei quali il primo è caricato in contenitori cilindrici, contenenti una lega metallica sotto forma di idruri il cui scopo è quello di dare una certa stabilità all'idrogeno, mentre l'ossigeno è stivato in contenitori criogenici sotto forma liquida.

Sebbene le potenzialità del sistema siano sicuramente inferiori a quelle della tecnologia nucleare in termini di potenza, l'impatto economico è sicuramente inferiore e sostenibile anche da nazioni che non potrebbero affrontare l'onere di una realizzazione nucleare; da non sottovalutare comunque il valore di tale tecnologia che, proprio in virtù del costo contenuto e delle prestazioni, comunque notevolmente superiori a quelle dei battelli convenzionali, potrebbe rappresentare quella evoluzione epocale della guerra subacquea che il sottomarino nucleare non ha potuto essere.

La Marina Militare nutre grandi aspettative su questi battelli di nuova tecnologia, sia per affrontare la sfida tecnologica dei prossimi anni che come impulso di ricerca per successive evoluzioni, senza considerare che la ricaduta tecnologica potrebbe non limitarsi esclusivamente al campo militare.

Tra i propulsori non convenzionali ha avuto notevole sviluppo l'idrogetto che si basa sul principio di conservazione della quantità di moto: in un sistema la quantità di moto si conserva e se quindi una delle sue parti varia la propria velocità anche quella delle rimanenti parti deve variare di conseguenza; l'esempio classico è quello del cannone: se si suppone di avere un cannone di massa M_C ed un proiettile di massa M_P , nell'istante prima dello sparo la velocità di entrambi gli elementi è nulla e quindi $V_1 = 0$, da cui la quantità di moto è nulla; dopo lo sparo la quantità di moto deve conservarsi da cui deve valere la relazione:

$$(M_C + M_P) \cdot V_1 = M_C \cdot V_{2C} + M_P \cdot V_{2P}$$

ove V_{2C} e V_{2P} sono le velocità dopo lo sparo rispettivamente del cannone e del proiettile; poiché il primo termine è nullo (essendo zero il valore di V_1), deve essere nullo anche il secondo termine ovvero:

$$M_C \cdot V_{2C} + M_P \cdot V_{2P} = 0 \quad \rightarrow \quad V_{2C} = - (M_P/M_C) \cdot V_{2P}$$

la velocità del cannone dopo lo sparo sarà opposta a quella del proiettile e legata a quest'ultima come il rapporto fra le rispettive masse, fenomeno che viene conosciuto come *rinculo*.

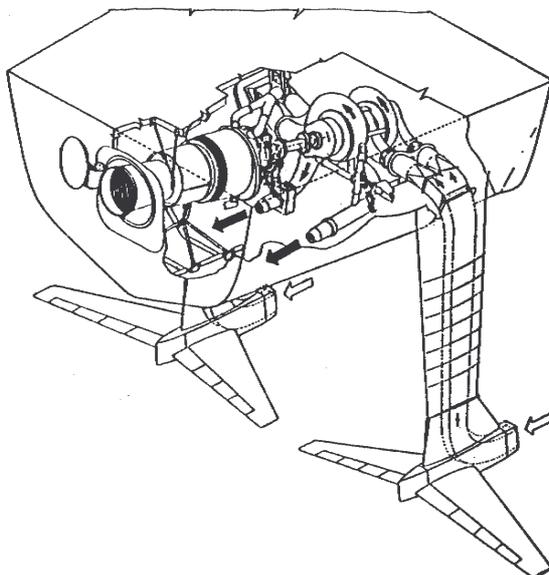


Figura 9: **Idrogetto**

Nel caso analizzato il fenomeno è episodico, ovvero avviene in momenti ben definiti e senza continuità: se si analizza la turbina di Herone, filosofo alessandrino del IV secolo A.C., si può comprendere meglio la meccanica del fenomeno continuo.

La turbina di Herone è sostanzialmente composta da un contenitore a forma sferica, libero di ruotare secondo l'asse verticale, contenente acqua; sul piano diametrico perpendicolare all'asse di rotazione sono posti quattro tubicini piegati tutti nello stesso verso. Il dispositivo viene quindi posto sopra una sorgente di calore, l'acqua si riscalda e si trasforma in vapore, sfuggendo dai tubicini e provocando la rotazione della turbina *per conservazione della quantità di moto*⁴.

L'idrogetto funziona con lo stesso principio: una pompa di grande portata aspira acqua dal mare e ne aumenta la velocità in modo considerevole, scaricandola a poppa e quindi provocando l'avanzamento del mezzo in senso opposto; poiché la massa del mezzo è sostanzialmente costante, ci si può facilmente rendere conto che variando la portata è possibile variare la velocità operativa del mezzo stesso.

L'idrogetto ha il grande vantaggio di essere costruttivamente piuttosto semplice, non richiede riduttori o giunti, essere tendenzialmente molto reattivo alle variazioni di carico ma, di contro, la quantità di massa elaborata nell'unità di tempo è strettamente legata alla massa del mezzo da propellere, da cui la sua utilizzazione è fondamentalmente legata a realizzazioni speciali, come piccole imbarcazioni veloci, aliscafi ed alcune navi traghetto particolari.

Nel caso della Marina Militare la propulsione ad idrogetto ha armato gli aliscafi e a tutt'oggi è utilizzata su alcuni mezzi ausiliari presenti sulle navi; merita osservare che gli aliscafi erano dotati di un doppio sistema propulsivo, basato su una comune elica per la navigazione in dislocamento ed una pompa a grande portata mossa da una T.A.G. per la navigazione in sostentamento idrodinamico.

Il *podazimuthale* è sostanzialmente un sistema propulsivo studiato e realizzato principalmente per le navi mercantili: si tratta di un sistema azionato da un motore elettrico posto a poppa ed alla volta di questa sospeso, libero di ruotare attorno ad un asse verticale. Il motore elettrico è una macchina sincrona alloggiata all'interno di una struttura stagna, di forma tale da minimizzarne la resistenza al moto e la sua capacità di ruotare rende inutile l'utilizzo del timone; inoltre l'efficienza del sistema è massimizzata dalla sua non necessità di riduttori, reggispinta ed assi, nonché dal fatto che l'asse dell'elica è sostanzialmente parallelo alla direzione del flusso.

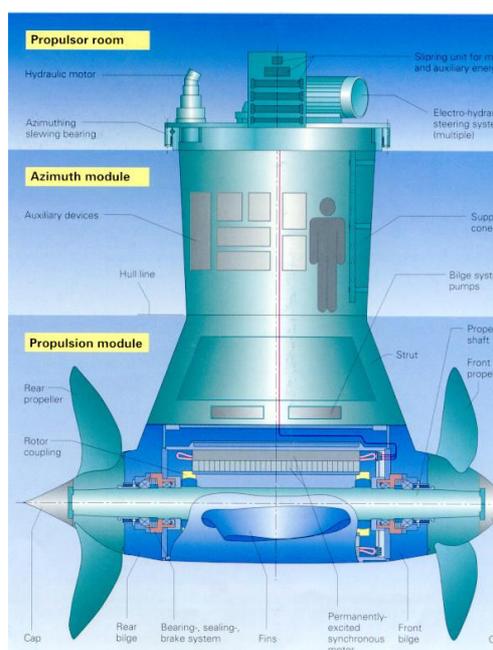


Figura 10: Podazimuthale

⁴ Più precisamente per conservazione del *momento della quantità di moto*

Il grandi svantaggi del pod sono sostanzialmente l'elevato peso concentrato nella zona poppiera, che rende particolarmente complessi sia i problemi di assetto longitudinale che quelli di resistenza strutturale longitudinale della nave, sia il problema del vincolo, che richiede dei dispositivi estremamente robusti sia per il sostegno della struttura che per la sua rotazione. Attualmente la Marina Militare non prevede, per i sopracitati motivi, l'utilizzo di questo sistema, sebbene ne stia studiando le potenzialità, soprattutto in relazione all'applicazione con motori elettrici a flusso trasversale; infatti per le limitate dimensioni delle realizzazioni navali militari (come ad esempio le fregate) il pod azimuthale non appare sostenibile al livello sia di robustezza che di assetto longitudinale.

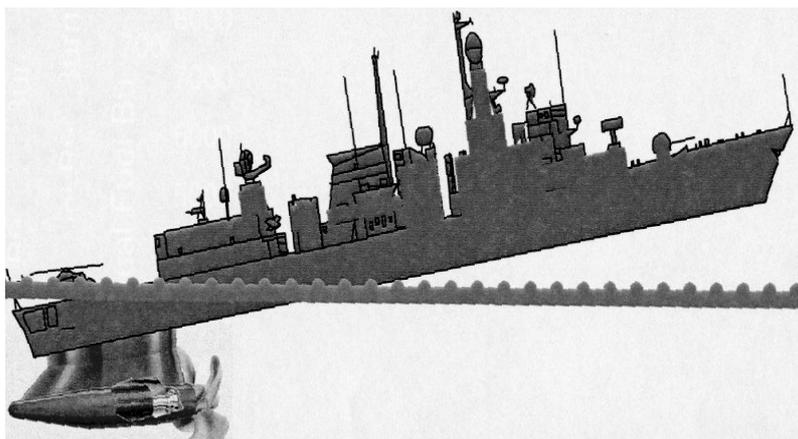


Figura 11: Raffigurazione schematica sui limiti dell'impiego dei pod

La propulsione *magnetoidrodinamica* rappresenta un sistema completamente nuovo sia a livello di apparato di propulsione che di propulsore e, sebbene non sia ancora stata utilizzata per nessuna realizzazione, né commerciale né militare, potrebbe costituire un possibile e rivoluzionario sviluppo futuro.

Il principio di funzionamento è relativamente semplice: poiché la molecola dell'acqua è un dipolo, sebbene di bassa intensità, se tale dipolo viene inserito in un campo magnetico di sufficiente intensità subisce una forte accelerazione; in pratica il principio è quello dell'idrogetto senza la presenza di sistemi meccanici per l'accelerazione del fluido.

I vantaggi sono l'estrema silenziosità dell'apparato⁵, la grande libertà di sistemazione del sistema propulsivo, la fluidità di funzionamento; di contro la generazione di un campo magnetico sufficientemente potente richiede la generazione di un campo elettrico considerevole con i connessi problemi di perdite, soprattutto dovuto alla resistenza dei conduttori.

Fino al momento attuale la realizzazione di tale sistema è stato vanificato appunto dall'impossibilità di realizzare un campo magnetico sufficientemente potente senza l'enorme problema della dissipazione nei conduttori che rende di fatto tecnicamente improponibile tale sistema; grandi speranze in questo senso sono riposte nello sviluppo della tecnologia dei superconduttori, la cui ricerca, sostenuta anche dal fatto che essi sono necessari per realizzare reattori nucleari a fusione, permetterebbe di eliminare completamente il problema.

⁵ Nel suo romanzo "La grande fuga dell'Ottobre Rosso" lo scrittore americano T. Clancy suppone che il sommergibile sovietico (il libro è del 1989) sia dotato, come sistema alternativo di propulsione, di una propulsione magnetoidrodinamica, grazie alla silenziosità della quale riesce a sfuggire ai tentativi di intercettazione degli altri battelli sovietici.