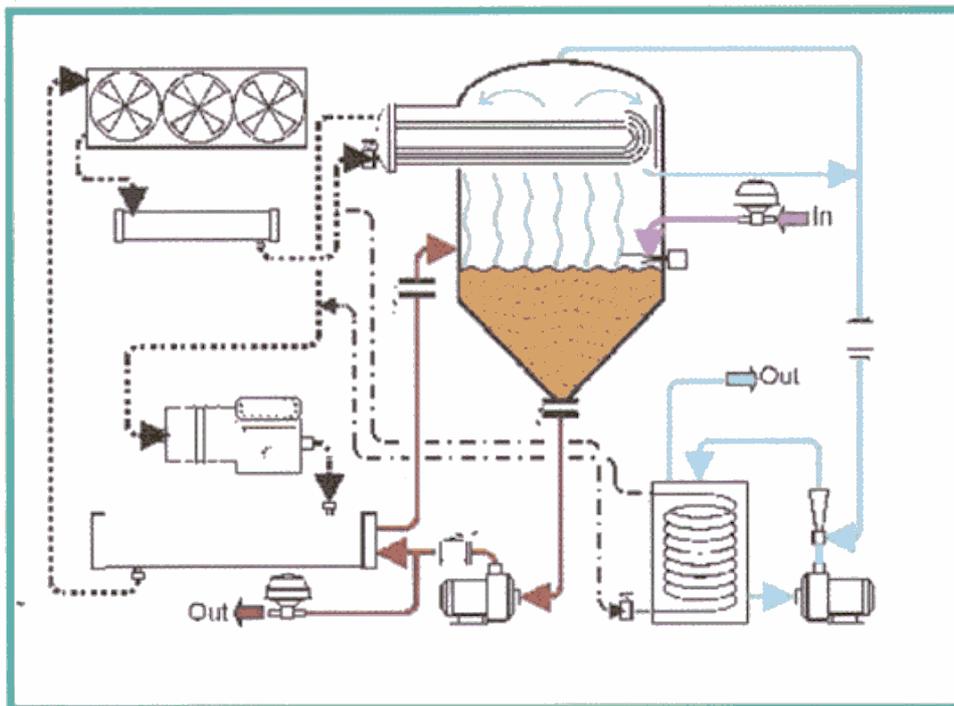


ACCADEMIA NAVALE

A. N. 5 - 51

NOZIONI DI IMPIANTI DI BORDO

A cura del: C.V.(GN) Roberto GARGIULO



POLIGRAFICO ACCADEMIA NAVALE
LIVORNO - 2004

INDICE

PARTE 1^: IMPIANTI PER PRODUZIONE DI ACQUA DOLCE

Introduzione	Pag.	1
CAP.1 - IMPIANTI AD OSMOSI INVERSA		2
1.1 Principio di funzionamento"		2
1.2 Impiego dei dissalatori ad osmosi inversa a bordo		5
1.3 Efficienza e prestazioni delle membrane		10
1.4 Confronto fra i diversi moduli "		11
1.5 Caratteristiche dell'acqua prodotta		13
1.6 Schemi di impianti ad osmosi inversa		13
1.7 Impianti realizzati		17
CAP.2 -IMPIANTI DI DISTILLAZIONE MEDIANTE EVAPORAZIONE		
2.1 Generalità		20
2.2 Evaporatori		20
2.2.1 <i>Evaporatore a tubi sommersi</i>		20
2.2.2 <i>Evaporatore ad effetto flash pluristadio</i>		22

PARTE 2^: IMPIANTI ANTINQUINAMENTO

CAP.3 - CONSIDERAZIONI SULL'INQUINAMENTO MARINO		
3.1 Generalita'		25
3.2 Sostanze che consumano ossigeno		26
3.3 Agenti patogeni		27
3.4 Sostanze nutritive della flora acquatica		28
3.5 Composti organici sintetici		29
3.6 Sostanze chimiche inorganiche e minerali		29
3.7 Sedimenti		30
3.8 Radioattivita'		31
3.9 Calore		31
3.10 Olii minerali		31
3.11 Inquinamento da idrocarburi		32
3.11.1 <i>Comportamento in mare degli idrocarburi</i>		32
3.11.2 <i>Effetti fisici e biologici</i>		35
3.12 Inquinamento del mare		36
3.13 Tecniche di prevenzione per le navi cisterna		37
3.14 Impianti impiegati sulle navi militari		38
CAP.4 - TRATTAMENTO ACQUE OLEOSE E RELATIVI IMPIANTI		

4.1	Metodi di separazione dell'olio dall'acqua	39
4.2	Impianto FRAM OP 10 (Unita' Classe "Maestrale")	42
4.3	Impianto FRAM CPS-5B MK-II (Unita' Classe "Minerva")	45

CAP.5 - TRATTAMENTO ACQUE BIOLOGICHE E RELATIVI IMPIANTI

5.1	Impianti di depurazione chimica dei liquami di bordo	49
5.2	Impianto ARTECO (Unita' Classe "Lerici")	50
5.3	Impianto BIODISK FVN (Unita' Classe "San Giorgio")	52
5.4	Impianto ATLAS AWWU (Unita' Classe "Maestrale")	55
5.5	Impianto HAMMAN (Unita' Classe "Lupo")	60

PARTE 3^: CONDIZIONAMENTO E CELLE VIVERI

CAP.6 - IL CONDIZIONAMENTO DELL'ARIA

6.1	Generalita'	64
6.2	Lo scopo del condizionamento a bordo	64
6.3	L'aria atmosferica e l'uomo	65
6.3.1	<i>La macchina "UOMO" e la sua autoregolazione termica</i>	65
6.3.2	<i>Il benessere e la temperatura effettiva</i>	68
6.4	Il rinnovo dell'aria	70

CAP.7 - CICLI FRIGORIFERI

7.1	Generalita'	72
7.2	Ciclo frigorifero a compressione	74
7.2.1	<i>Evaporazione</i>	75
7.2.2	<i>Compressione</i>	76
7.2.3	<i>Condensazione</i>	77
7.2.4	<i>L'effetto frigorifero</i>	78
7.2.5	<i>Equivalente termico del lavoro di compressione</i>	79
7.2.6	<i>Calore da smaltire</i>	79
7.2.7	<i>Effetto utile del ciclo frigorifero</i>	79
7.3	Il ciclo frigorifero ad assorbimento	79
7.3.1	<i>Ciclo frigorifero ad assorbimento ammoniacca-acqua</i>	80
7.3.2	<i>Ciclo frigorifero ad assorbimento a bromuro di litio</i>	83
7.4	Caratteristiche dei fluidi refrigeranti	84
7.4.1	<i>Proprieta' termodinamiche</i>	85
7.4.2	<i>Proprieta' fisiche</i>	85
7.5	I refrigeranti piu' comuni	85

CAP.8 - I COMPONENTI DI UN IMPIANTO FRIGORIFERO

8.1	Introduzione	88
8.2	Il compressore	89
8.2.1	<i>Compressori alternativi</i>	89
8.2.2	<i>Controllo della capacita' frigorifera nei compressori alternativi</i>	93
8.2.3	<i>Compressori a vite</i>	97
8.2.4	<i>Compressori rotativi</i>	98
8.2.5	<i>Compressori centrifughi</i>	100
8.3	Il condensatore	103
8.3.1	<i>Condensatori raffreddati ad acqua</i>	103
8.3.2	<i>Condensatori raffreddati ad aria</i>	105
8.3.3	<i>Condensatore evaporativo</i>	106
8.4	L'evaporatore	107
8.4.1	<i>Gli evaporatori ad espansione diretta</i>	107
8.4.2	<i>Gli evaporatori di tipo allagato</i>	108
8.5	I dispositivi di regolazione del fluido refrigerante	109
8.5.1	<i>Valvola di espansione manuale</i>	110
8.5.2	<i>Valvola a galleggiante - lato bassa pressione</i>	110
8.5.3	<i>Valvola a galleggiante - lato alta pressione</i>	111
8.5.4	<i>Valvola di espansione automatica</i>	111
8.5.5	<i>La valvola termostatica</i>	112
8.5.6	<i>La valvola barostatica</i>	114
CAP.9 - IMPIANTI PER IL TRATTAMENTO E DISTRIBUZIONE DELL'ARIA		
9.1	Impianti di trattamento dell'aria	116
9.1.1	<i>Generalità</i>	116
9.1.2	<i>Il condizionatore dell'aria</i>	117
9.1.3	<i>I mobiletti integratori</i>	118
9.2	Impianti di distribuzione dell'aria	118
9.2.1	<i>Generalità</i>	118
9.2.2	<i>Impianto ad espansione diretta</i>	118
9.2.3	<i>Impianti centralizzati</i>	120
9.2.3.1	<i>Impianto centralizzato a condotto unico</i>	121
9.2.3.2	<i>Impianto centralizzato con post-riscaldamento</i>	122
9.2.3.3	<i>Impianto centralizzato a doppio condotto</i>	123
CAP.10 - CELLE VIVERI		
10.1	Generalita'	124
10.2	Descrizione funzionale dell'impianto	125

PARTE 4^ - IMPIANTI DI GOVERNO NAVE E DI STABILIZZAZIONE

CAP.11 - I SISTEMI DI CONTROLLO IDRAULICI	
11.1 Generalita'	128
11.2 Sistemi controllati mediante pompa	129
11.3 I sistemi controllati mediante servovalvole	130
CAP. 12 – POMPE E MOTORI PER SISTEMI IDRAULICI	
12.1 Introduzione	132
12.2 Pompa idraulica a stantuffi assiali	132
12.2.1 <i>Descrizione</i>	132
12.2.2 <i>Principio di funzionamento</i>	133
12.3 Servomotore idraulico	134
CAP.13 - IMPIANTI IDRAULICI CONTROLLATI MEDIANTE POMPE	
13.1 Timonerie	138
13.1.1 <i>Generalita'</i>	138
13.1.2 <i>Agghiaccio a torchi</i>	138
13.1.3 <i>Agghiacci a palmole</i>	140
13.1.4 <i>Servomotore idraulico</i>	141
13.1.5 <i>Telecomandi</i>	144
13.1.6 <i>I syncro</i>	145
13.1.7 <i>Asservimenti</i>	146
13.2 Pinne stabilizzatrici	149
13.2.1 <i>Generalita'</i>	149
13.2.2 <i>Cenni storici</i>	149
13.2.3 <i>Circuito idraulico</i>	150
13.2.4 <i>Esempi di impianti a pinne fisse in uso nella M.M.</i>	153
CAP.14 - STABILIZZAZIONE AL ROLLIO MEDIANTE PINNE ATTIVE	
14.1 Studio elementare del rollio delle navi	155
14.1.1 <i>Rollio della nave in mezzo calmo</i>	155
14.1.2 <i>Rollio della nave in mezzo ondosso</i>	159
14.2 Lo studio analitico del rollio stabilizzato	164
14.2.1 <i>Significato dei termini che compaiono nell'equazione del Vossier</i>	164
14.2.2 <i>Effetti dei parametri α, α ed α sulla stabilizzazione</i>	167
14.2.3 <i>Momento raddrizzante delle pinne – Falsi angoli di attacco</i>	168
14.2.4 <i>La limitazione dell'ordine alle pinne</i>	171
14.3 Conclusioni	172
14.3 Impianto di controllo Sperry-Gyrofinn	173
CAP. 15 - CASSE ANTIROLLIO	

15.1 Generalita'	177
15.2 Impianto per Unita' idrografica Magnaghi	179
15.3 Impianto per Unita' LDP (nave San Giorgio-San Marco)	184

PARTE 1^: IMPIANTI PER PRODUZIONE DI ACQUA DOLCE

-Introduzione

Su ogni Unità è prevista l'installazione di almeno un impianto per la produzione di acqua dolce mediante dissalazione dell'acqua di mare per le esigenze dell'apparato di propulsione e del personale imbarcato.

I più diffusi tipi di impianto impiegati a bordo delle recenti Unità, possono essere suddivisi in due categorie principali:

- dissalatori

- distillatori

I dissalatori provvedono ad abbassare il contenuto totale di sali disciolti nell'acqua di mare in modo da consentire l'impiego dell'acqua così prodotta come acqua di lavanda ed eventualmente come acqua potabile dopo opportuno trattamento ed infine come acqua di riserva per le esigenze dell'apparato motore.

Date le caratteristiche dell'acqua prodotta mediante impianti di dissalazione questa non è idonea come acqua di alimento per caldaie navali di propulsione od ausiliarie per cui questi impianti sono prevalentemente impiegati su Unità con apparati motori endotermici (Diesel, TAG ecc.).

I distillatori producono acqua dolce mediante l'evaporazione dell'acqua di mare e successiva condensazione del vapore.

Qualunque sia la fonte di calore sfruttata tutti gli impianti installati a bordo si basano sul principio dell'evaporazione a bassa pressione dell'acqua di mare; ciò significa che all'interno della camera di evaporazione viene mantenuta una pressione sensibilmente più bassa di quella atmosferica, col risultato che l'ebollizione avviene a temperature notevolmente inferiori ai 100°C.

Questo comporta grandi vantaggi; si consideri infatti che, poichè solo un terzo dell'acqua di alimento evapora, si disperde meno calore sia con la salamoia che attraverso l'acqua di circolazione.

Inoltre se l'acqua di mare evaporasse a temperature elevate, formerebbe depositi molto duri e difficili da rimuovere che ostacolerebbero notevolmente la trasmissione del calore attraverso le pareti dei tubi dello scambiatore.

Questi impianti, che producono in pratica acqua distillata, sono particolarmente adatti per la produzione di acqua di alimento di caldaie e trovano quindi largo impiego su unità con propulsione a vapore .

Poichè l'evaporazione avviene a temperature basse, tali impianti non danno alcuna garanzia sull'assenza di batteri e sostanze organiche nell'acqua prodotta.

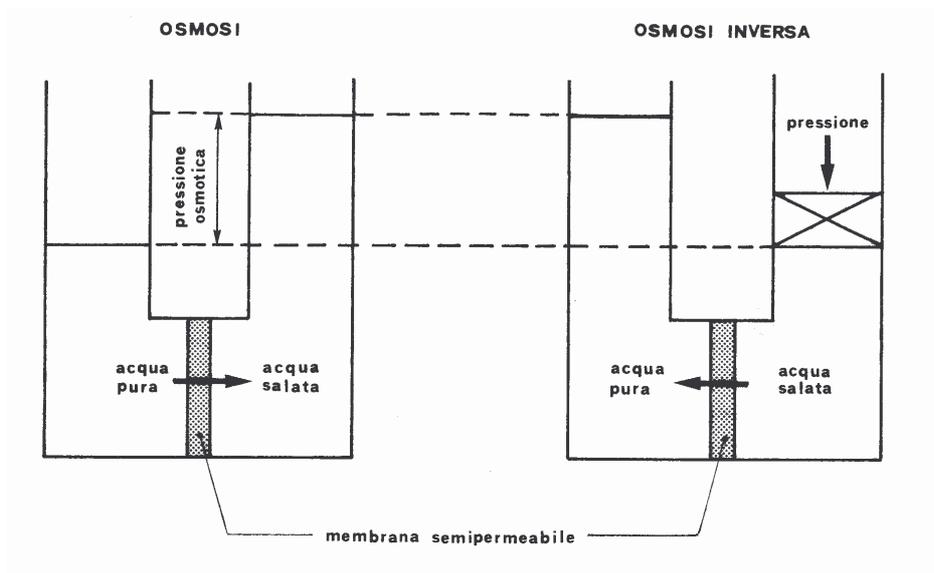
Per questo motivo è vietato evaporare in porto ed è poco consigliabile farlo in acque costiere soprattutto se la produzione viene inviata ai depositi dell'acqua di lavanda.

CAP.1 - IMPIANTI AD OSMOSI INVERSA

1.1 - Principio di funzionamento

Se due soluzioni acquose, ad esempio di glucosio a concentrazioni diverse, vengono poste alla stessa temperatura nei due rami di un recipiente ad "U" e separate da una speciale membrana che consente solo il passaggio del solvente, si ha la diffusione del solvente dalla soluzione più diluita a quella più concentrata, con formazione di un dislivello tra le superfici delle due soluzioni che aumenta fino ad un certo valore che poi si mantiene costante nel tempo.

Se una delle due soluzioni viene sostituita con solvente puro il fenomeno si svolge in modo analogo; la migrazione avviene dal solvente puro alla soluzione diluendo quest'ultima, come mostrato nella figura seguente.



Descritto qualitativamente il fenomeno osmotico, è importante esaminare in dettaglio la natura della sopraccitata "speciale membrana" indicata col nome di "**membrana semi-permeabile**", che consente il passaggio del solo solvente e che permette il fenomeno osmotico.

Premettiamo che una membrana semi-permeabile che consenta il passaggio del solvente ed escluda rigorosamente il passaggio di ogni genere di soluto è soltanto teorica; in pratica si ha sempre un piccolo passaggio di soluto se questo è di basso peso molecolare, cioè di piccole dimensioni.

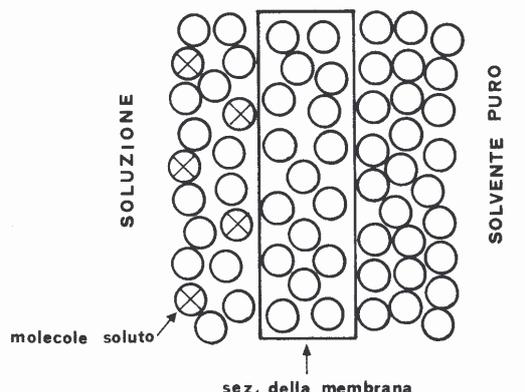
Solo per soluti di elevato peso molecolare è lecito ammettere una rigorosa permeabilità selettiva delle membrane.

Il meccanismo con cui la membrana semi-permeabile realizza questa sua proprietà non è del tutto chiaro, sono state quindi proposte varie teorie.

Una di queste è basata sulla "**solubilità selettiva**" della membrana, cioè sulla ammissione che soltanto il solvente, e non il soluto, sia solubile nella membrana.

La membrana, satura di solvente, è in contatto da una parte con la soluzione e dall'altra col solvente puro e scambia, per agitazione termica, le molecole di solvente in essa presenti con quelle

del solvente contenuto da una parte e con quelle del solvente puro dall'altra, come mostrato in figura.



Dalla parte della soluzione le molecole di solvente passano in maggior numero dalla membrana alla soluzione che nel senso inverso; questo perché le molecole di soluto in contatto con la membrana rappresentano zone proibite per il passaggio di molecole di solvente dalla soluzione alla membrana, ma non impediscono il passaggio inverso dalla membrana alla soluzione.

Pertanto la superficie della membrana che affaccia nella soluzione tende ad impoverirsi di molecole di solvente, queste vengono rifornite dall'interno della membrana mantenuta satura di solvente tramite l'altra superficie che affaccia verso il solvente puro.

Il meccanismo appena descritto di "solubilità selettiva", che può essere ammesso per certi tipi di membrane naturali (animali e vegetali) o artificiali (cellulosidiche), non può essere accettato per spiegare le proprietà osmotiche presentate da certe particolari membrane vetrose o di metallo o di certe sostanze chimiche come ad esempio il ferrocianuro rameico per le quali non è fisicamente ammissibile una saturazione dovuta a molecole di acqua.

Per questi ultimi casi dobbiamo considerare un modello a "*setaccio molecolare*" cioè ammettere che nel materiale esistano dei fori attraverso i quali possano passare molecole di una certa dimensione (solvente) ma non di dimensioni maggiori (soluto).

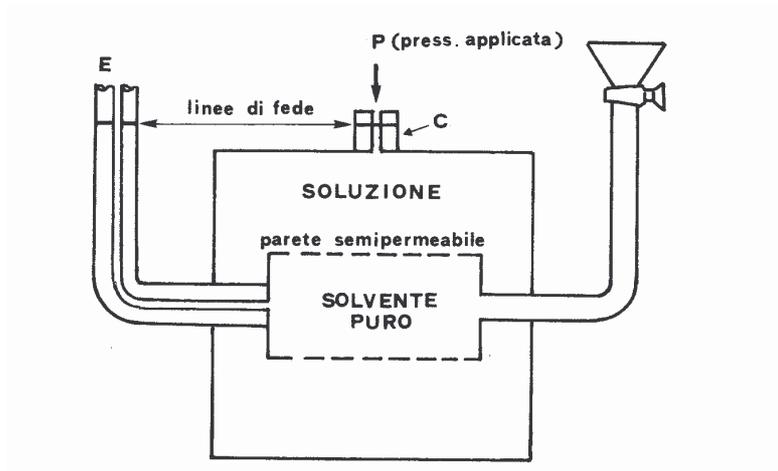
"Solubilità selettiva" e "setaccio molecolare" non sono del resto modelli contrastanti.

Il valore del dislivello mostrato in figura rappresenta la misura della pressione osmotica, infatti, la pressione idrostatica della soluzione a concentrazione maggiore equilibra la pressione osmotica esercitata dal solvente che tende a passare in tale soluzione diluendola.

Per la determinazione della pressione osmotica della soluzione di partenza non possiamo però usare la misura di tale dislivello in quanto, ad equilibrio raggiunto, la soluzione ha una concentrazione diversa da quella iniziale.

Pertanto per misurare la pressione osmotica di una soluzione è necessario usare un metodo che consenta tale misura senza passaggio di solvente; nella pratica viene misurata la pressione che deve essere imposta dall'esterno per impedire il passaggio di solvente, in grado cioè di equilibrare esattamente la pressione osmotica della soluzione in esame.

Nella figura seguente è schematizzato un apparato per tale tipo di misura.



Una pressione "P" esterna, variabile con continuità e misurabile con precisione, è applicata al capillare C in modo da mantenere costante il livello del solvente nel capillare E; viene così impedito il passaggio di solvente alla soluzione.

Per un certo tempo dall'inizio della misura la pressione P deve essere continuamente aumentata per mantenere costanti i livelli in E e C.

Si raggiunge infine un valore di P costante nel tempo, che rappresenta la misura della pressione osmotica "p" della soluzione.

Da considerazioni termodinamiche si ricava l'espressione che mette in relazione la pressione osmotica " π ", la concentrazione "c" e la temperatura T della soluzione:

$$\pi = cRT$$

dove la concentrazione molare "c" della soluzione è data dal rapporto tra il numero di moli del soluto "n" e il volume "V" della soluzione in cui esse sono contenute:

$$c = n/V$$

Sostituendo tale relazione nell'espressione precedente si ha:

$$\pi V = nRT$$

relazione formalmente identica all'equazione di stato di un gas perfetto:

$$pV = nRT$$

dove "n" è in questo caso il numero delle moli gassose.

Da questa identità formale tra le due espressioni discende l'affermazione di Hoff: *"la pressione osmotica di una soluzione diluita è numericamente uguale alla pressione gassosa che avrebbe il soluto se fosse allo stato gassoso ed occupasse lo stesso volume della soluzione, alla stessa temperatura"*.

1.2 - Impiego dei dissalatori ad osmosi inversa a bordo

La dissalazione ad osmosi inversa è un processo tecnologico relativamente recente per la produzione di acqua potabile partendo da acqua di mare.

Inizialmente impiegata sia in campo industriale che civile per il trattamento delle acque di scarico, per la potabilizzazione di acque superficiali o salmastre, negli anni più recenti è stata impiegata con successo per la dissalazione di acqua marina dapprima in installazioni terrestri e oggi anche a bordo delle navi mercantili.

Nel campo navale militare, finchè le navi sono state propulse per la grande maggioranza con apparati a vapore, non è stato preso in considerazione l'uso di tali impianti poichè l'acqua distillata, necessaria in grandi quantità per l'apparato motore e per i servizi di lavanda ed acqua potabile, veniva ottenuta a costi contenuti utilizzando il vapore prodotto dalle caldaie come "combustibile" per gli evaporatori.

Con l'avvento delle navi dotate di apparato di propulsione endotermico (Diesel e/o Gas), per le quali è venuta meno la necessità di produrre acqua distillata con elevate caratteristiche, è stata presa in esame la possibilità di impiegare dei dissalatori ad osmosi inversa che sono più semplici e convenienti degli evaporatori finora tradizionalmente usati.

I vantaggi che i dissalatori ad osmosi inversa presentano nei confronti dei distillatori convenzionali sono principalmente:

- possibilità di produrre direttamente acqua potabile, più adatta agli usi alimentari e di lavanda rispetto all'acqua distillata.
- l'autonomia funzionale
- il modesto impiego di energia
- possibilità di utilizzare impianti estremamente semplici come condotta e manutenzione.

Per ottenere acqua potabile sono normalmente sufficienti gli impianti più semplici ovvero quelli ad unico stadio di dissalazione.

Circa l'autonomia funzionale è importante notare che i dissalatori non dipendono per il loro funzionamento da altre apparecchiature, come avviene ad esempio nel caso di distillatori tipo "flash" imbarcati sulle moderne fregate.

Questi ultimi utilizzano infatti vapore a bassa pressione fornito da calderine spesso poco affidabili e comunque estremamente onerose in quanto a manutenzione.

L'energia richiesta dai dissalatori ad unico stadio varia tra 10 e 15 KWh per metro cubo di acqua dolce prodotta, contro i 375 KWh richiesti da un moderno distillatore tipo "flash" a quattro stadi.

Questo perché il processo di dissalazione nell'osmosi inversa avviene a temperatura ambiente e l'energia richiesta è principalmente quella per il pompaggio dell'acqua alla pressione di esercizio (60-70 bar).

Tra gli impianti di dissalazione ad osmosi inversa quelli impiegati in campo navale presentano un funzionamento ed una condotta molto semplici; essi sono poi praticamente insensibili allo stato del mare, contrariamente ai distillatori tradizionali.

Il termine osmosi inversa deriva dal fatto che il processo di dissalazione è ottenuto invertendo il processo di osmosi visto precedentemente.

Se le due soluzioni acquose aventi differenti concentrazioni di sale sono separate da una membrana semi-permeabile, l'acqua tende a passare spontaneamente dalla soluzione più diluita alla soluzione più concentrata provocandone la diluizione.

La differenza di pressione all'equilibrio, manifestata da un innalzamento della colonna di liquido, è chiamata pressione osmotica.

Quando la soluzione diluita è acqua pura e la soluzione concentrata è acqua di mare, la pressione osmotica è di circa 25 bar.

Il processo può essere invertito applicando alla soluzione concentrata, nel nostro caso acqua di mare, una pressione maggiore di quella osmotica.

In tal caso l'acqua passerà attraverso la membrana dalla soluzione concentrata a quella diluita.

Il sale presente nell'acqua di mare sarà espulso dalla membrana e ricacciato verso la soluzione concentrata.

Questo processo è chiamato "osmosi inversa".

Maggiore è la differenza tra la pressione applicata e quella osmotica e maggiore sarà la velocità con cui l'acqua attraversa la membrana.

In pratica per ottenere un flusso accettabile di acqua occorre una pressione compresa tra 50 e 65 bar.

Teoricamente una membrana semi-permeabile perfetta dovrebbe respingere tutto il sale e permettere il passaggio solo di acqua pura.

A causa delle inevitabili imperfezioni di fabbricazione della membrana ciò non è ottenibile negli attuali sistemi.

L'elemento base del processo di osmosi inversa è dunque la sottile membrana semi-permeabile attraverso la quale l'acqua può passare cedendo il sale.

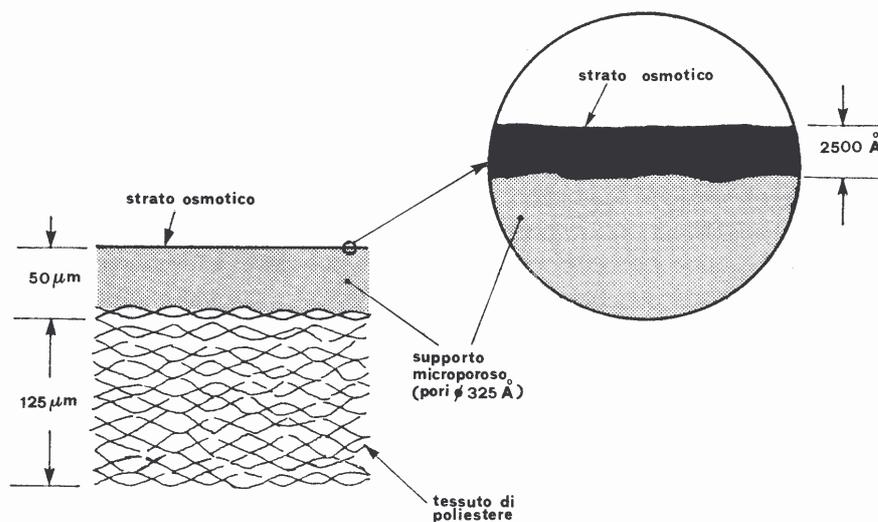
Le membrane semi-permeabili che vengono usate si distinguono per il materiale di cui sono costituite.

I materiali normalmente usati sono gli acetati di cellulosa ed i poliammidi.

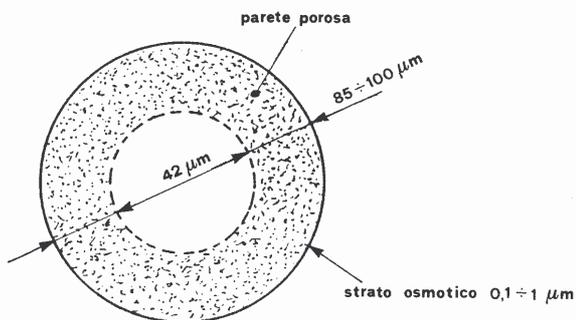
Gli acetati di cellulosa sono soggetti ad attacco e distruzione da parte di microorganismi, sono sensibili alle variazioni di PH e temperatura dell'acqua di mare; hanno invece il vantaggio di tollerare il cloro libero in dosi anche elevate.

Negli impianti navali vengono preferite le membrane a base di poliammidi.

I tipi di membrane disponibili sono principalmente due: quello a fibra cava (hollow fiber) e quello a foglio (thin film) come mostrato nella figura seguente.



Sezione di una membrana a foglio piano



Sezione di una membrana a fibra cava

Le membrane devono essere contenute, al fine di poter svolgere la loro funzione, in recipienti capaci di sopportare la pressione di esercizio.

L'intero complesso costituito dall'elemento a membrana e dal recipiente a pressione viene denominato "modulo".

Un certo numero di moduli sono posti poi in parallelo per produrre la desiderata quantità di acqua dolce.

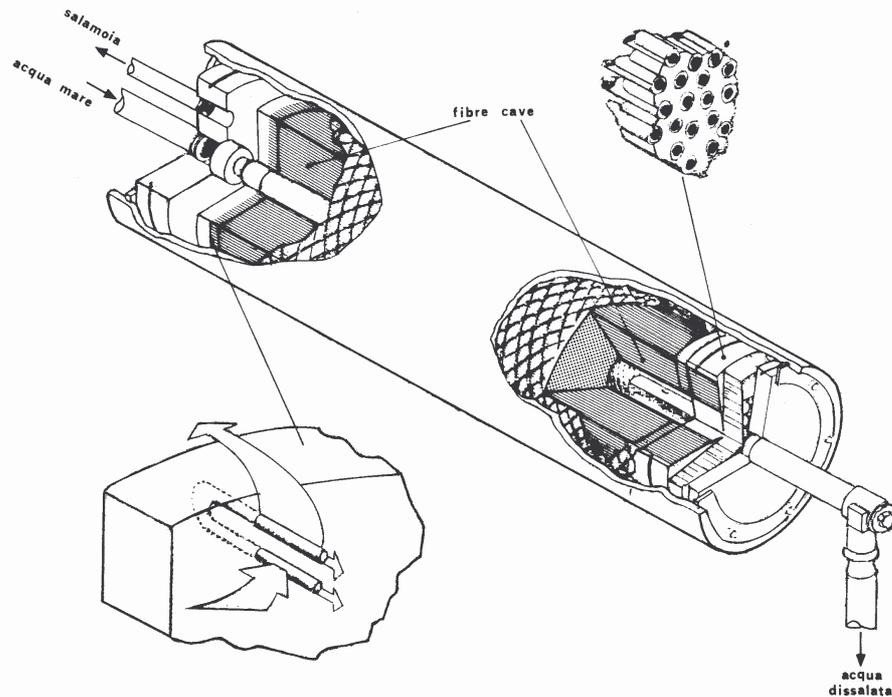
Il modulo può essere realizzato in vari modi utilizzando uno dei due tipi di membrane disponibili.

Ogni modulo presenta un ingresso per l'acqua di alimento e due uscite: una per l'acqua dolce prodotta e una per l'acqua salata concentrata ("brine").

I moduli disponibili sono attualmente di tre tipi:

- moduli con membrane a fibre cave ("Hollow fiber membranes modules")
- moduli con membrane a foglio avvolte a spirale ("Spiral wound membranes modules")
- moduli con membrane a foglio piane ("Plate membranes modules")

Il modulo con membrane a fibra cava è costituito da migliaia di elementi semi-permeabili tubiformi aventi ciascuno le dimensioni di un capello; le fibre sono normalmente piegate ad "U" e gli estremi sono infilati in un foglio tubolare epossidico; il fascio di fibre con il foglio epossidico è poi sistemato dentro un involucro cilindrico a pressione come mostrato nella figura seguente.



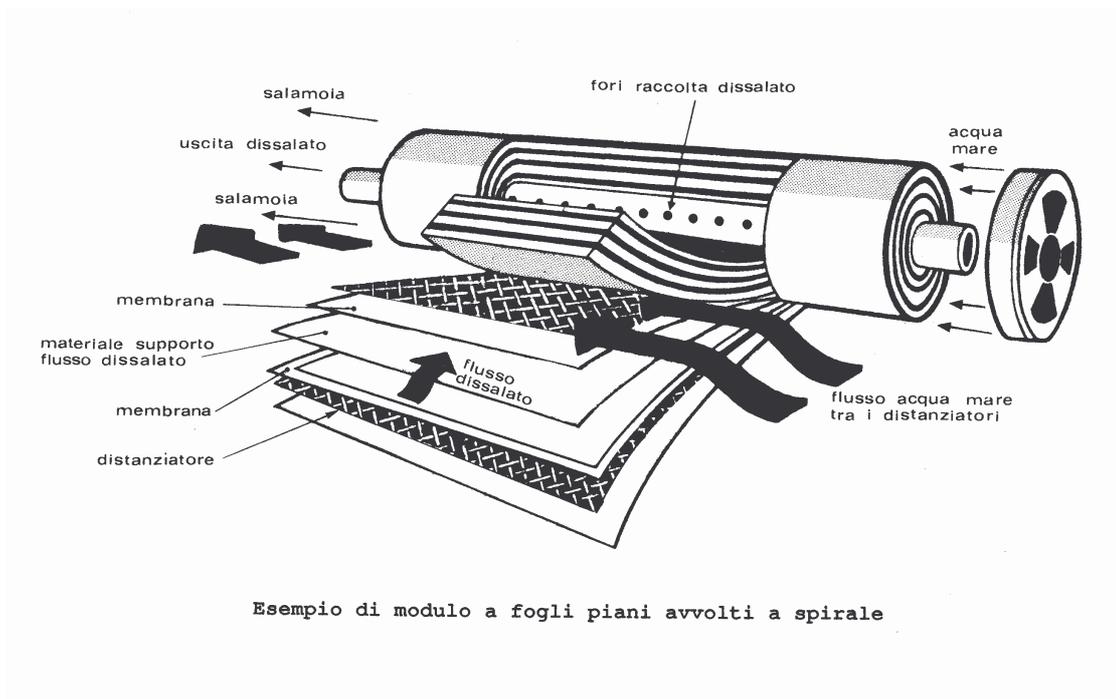
Con il complesso in servizio, l'acqua di mare in pressione passa attraverso il fascio di fibre dall'esterno verso l'interno.

Una parte dell'acqua attraversa le fibre cave e, tramite le cavità, giunge al coperchio dove viene raccolta.

La rimanente acqua di mare che non attraversa le fibre viene inviata come salamoia (brine) ad una estremità del cilindro e poi scaricata fuori bordo.

Nei moduli con membrane a foglio avvolte a spirale il foglio sottile, costituente la membrana, è avvolto a mò di sandwich insieme al suo materiale di supporto ed ai distanziatori del flusso.

L'intero sandwich è infine avvolto attorno ad un tubo cavo e forellato come mostrato nella figura seguente.



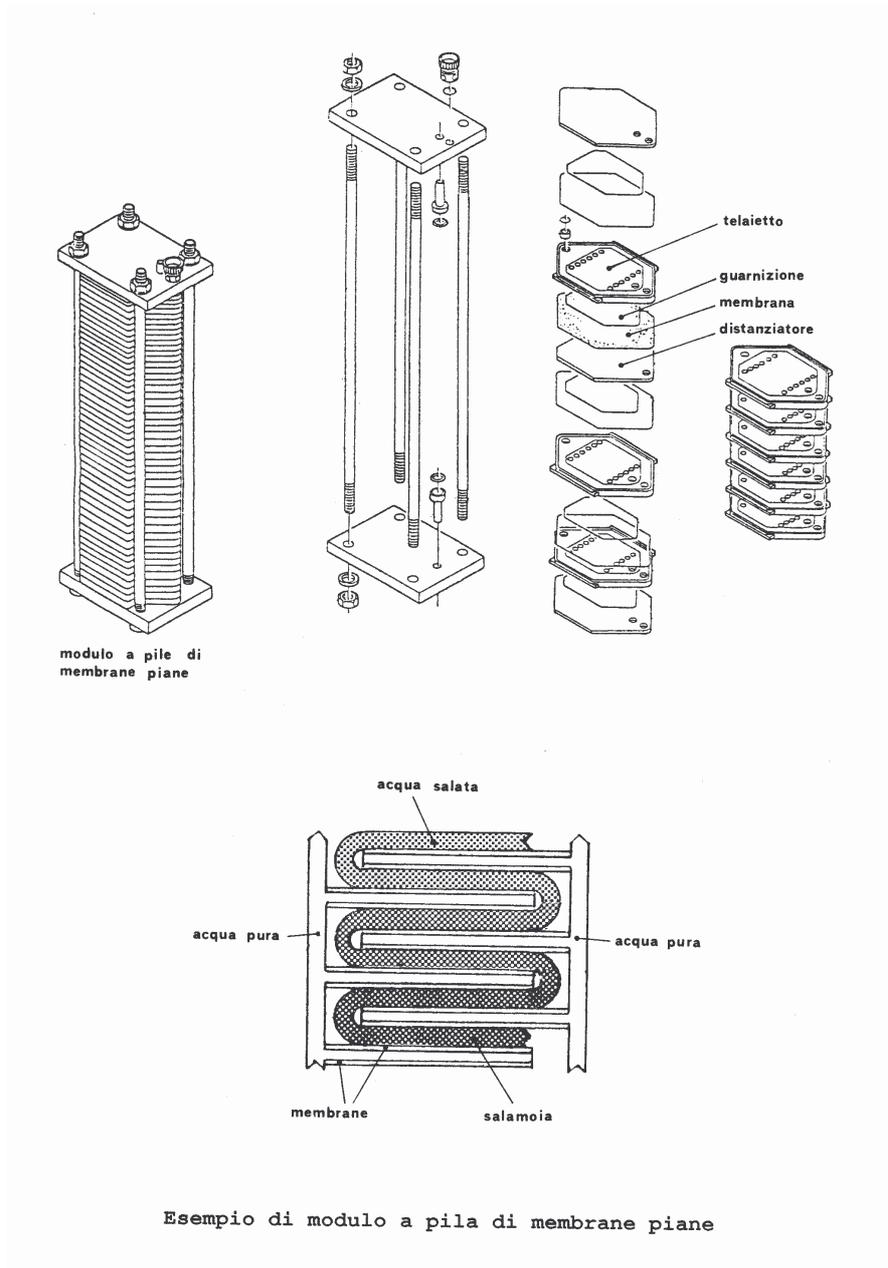
Esempio di modulo a fogli piani avvolti a spirale

Il tutto viene infilato in un recipiente cilindrico a pressione munito di collegamenti per l'acqua di mare di alimentazione, per lo scarico della salamoia e per la raccolta dell'acqua dolce.

Quando l'elemento è in funzione, l'acqua di mare ad alta pressione passa attraverso i distanziatori e sulle superfici dei fogli della membrana; l'acqua dolce attraversa la membrana fino al materiale di supporto.

L'acqua dolce quindi fluisce con moto a spirale attraverso il materiale di supporto fino al tubo forato dove viene raccolta ed aspirata; la salamoia viene invece scaricata fuoribordo.

I moduli con membrane a fogli piani sono concettualmente i più semplici essendo realizzati da "pile" di membrane piane di forma opportuna alloggiati in contenitori a pressione come rappresentato nella figura seguente.



1.3 - Efficienza e prestazioni delle membrane

Per efficienza delle membrane si intende la capacità delle stesse di arrestare le molecole dei sali disciolti espressa in percentuale del totale.

In teoria le membrane dovrebbero avere il 100% di efficienza, non dovrebbero cioè essere superate nè dalle molecole di sali nè da virus, nè da batteri ecc.

In pratica l'efficienza dei moduli impiegati negli impianti di dissalazione dell'acqua di mare ad unico stadio varia tra il 98% ed il 99.5%; non si raggiunge cioè mai il 100% a causa di imperfezioni nelle membrane o nel modulo.

A causa di ciò non vi è pertanto mai l'assoluta certezza che i microorganismi vengano arrestati dalle membrane; conviene pertanto prevedere la sterilizzazione dell'acqua prodotta, a scopo

cautelativo, soprattutto se si pensa di dissalare in porto, su bassi fondali, in prossimità della foce di fiumi o in prossimità della costa.

Le prestazioni delle membrane sono normalmente riferite alle seguenti condizioni standard dell'acqua di mare:

- temperatura 25 °C
- TDS (sali totali disciolti) 35000 p.p.m.

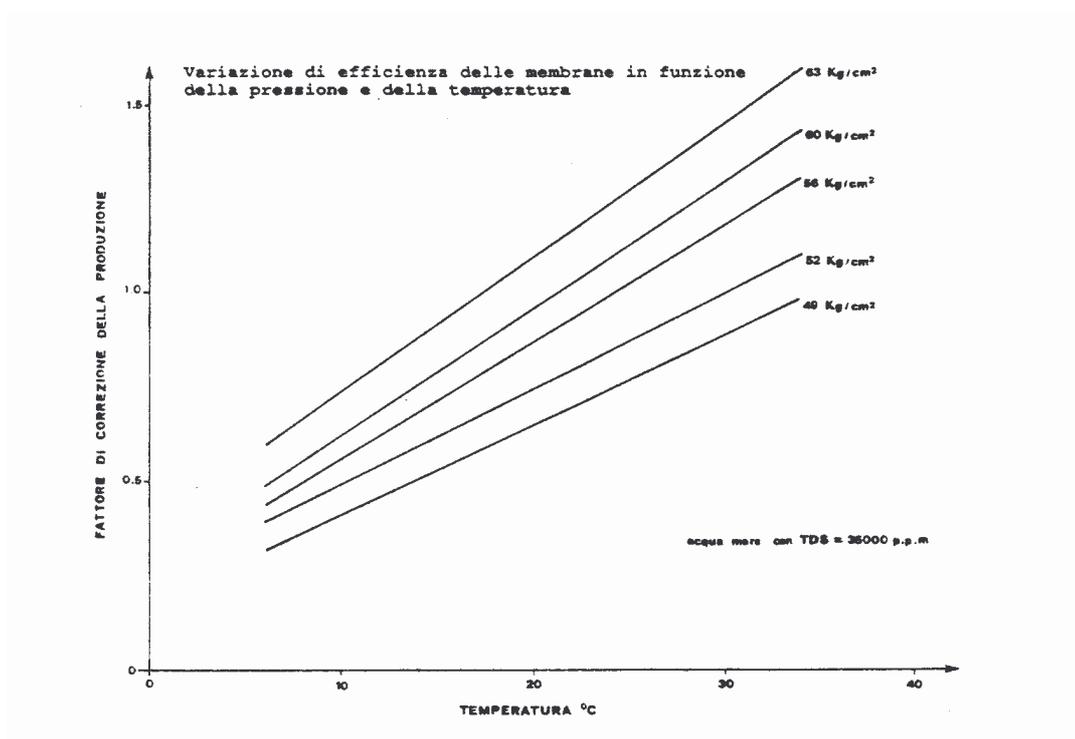
A parità di altre condizioni, la produzione varia del 3% per ogni grado centigrado di variazione di temperatura.

Il campo di temperatura ammesso per il funzionamento è in genere compreso tra i 5 e i 35 °C.

La produzione dipende inoltre, a parità di altre condizioni, anche dalla pressione di lavoro; questo perché il fattore di recupero, (rapporto tra acqua dolce prodotta ed acqua di mare di alimento), varia proporzionalmente alla pressione stessa.

Inoltre al diminuire della pressione di lavoro diminuisce leggermente l'efficienza delle membrane.

Si riporta nella figura seguente un diagramma che indica come varia la produzione di una membrana nuova rispetto alla produzione standard, in funzione della temperatura dell'acqua di mare e della pressione di lavoro.



1.4 - Confronto tra i diversi moduli

L'acqua prodotta con moduli a fibre cave è conveniente in termini di energia, di spazio e di peso richiesto per i moduli stessi.

Questo dipende dall'elevato fattore di recupero ammissibile (30%) e dalla maggiore superficie utile, a parità di altre dimensioni che essi presentano.

Essi però sono molto sensibili alle impurità, perchè difficilmente pulibili anche mediante opportuni solventi chimici.

Pertanto, un impianto che utilizza moduli a fibra cava, deve avere un sistema di trattamento estremamente accurato dell'acqua di alimento.

Questo consiste nell'iniezione di componenti aggreganti e flocculanti, in un filtraggio molto spinto e nella sterilizzazione.

Deve inoltre essere tenuta sotto controllo la concentrazione della salamoia (brine) in funzione della temperatura, allo scopo di evitare la precipitazione di sali sulle membrane.

Per quanto detto l'impianto, anche se efficiente, risulta complicato e quindi potenzialmente meno affidabile di altri; la sua condotta richiede inoltre personale specializzato.

La mancata osservanza delle suddette precauzioni può portare, in tempi brevi, ad avere prestazioni sempre più scadenti ed un costo di esercizio elevato a causa della frequente necessità di sostituire i moduli.

Il modulo a spirale avvolta può essere pulito in maniera efficace con adatti solventi chimici.

Questa possibilità consente la realizzazione di impianti molto semplici e meno difficili da condurre.

Il trattamento dell'acqua di alimento è sempre richiesto, ma non così spinto come nei casi precedenti; in genere viene richiesta sia la filtrazione che l'iniezione di composti chimici aggreganti-flocculanti, mentre non è indispensabile la sterilizzazione.

Questa ultima particolarità è estremamente importante poichè il metodo di sterilizzazione più usato è basato sulla clorazione, per cui, tenuto conto che le membrane in poliammide usate negli impianti navali, non accettano il cloro libero, occorre dechlorare l'acqua di alimento prima che arrivi alle membrane stesse.

L'eliminazione della clorazione comporta quindi notevoli vantaggi per la condotta e affidabilità dell'impianto.

Gli impianti con moduli a spirale avvolta, indipendentemente dal tipo di membrana, non richiedono un controllo continuo nè dell'acqua di mare per dosare esattamente il flocculante, nè della salamoia per rilevarne la concentrazione; questo perché un eventuale sporcamento, se non molto elevato, può essere eliminato mediante lavaggio.

E' buona norma ridurre lo sporcamento per ottenere il miglior compromesso tra prestazioni, semplicità ed economia di esercizio; il fattore di recupero medio di funzionamento scende a valori compresi tra 10% e 15%.

L'abbassamento del fattore di recupero comporta l'impiego di un maggior numero di moduli per garantire la portata d'acqua dolce necessaria; la produzione con moduli a spirale avvolta è quindi più onerosa in termini di energia ed ingombro.

Questi svantaggi sono però ampiamente compensati dalla maggior semplicità ed affidabilità; in campo navale gli impianti per piccole e medie produzioni (fino a 100 t/giorno) sono in maggioranza con moduli a spirale avvolta.

Come conclusione dobbiamo notare che, caratteristica comune ai moduli a fibra cava e spirale avvolta, è la impossibilità di essere riparati una volta completamente intasati o danneggiati.

Questo comporta un notevole aggravio di costo di esercizio.

A parità di dimensioni il modulo a membrane piane ha una produzione inferiore a quella dei moduli a fibra cava, infatti, pur ammettendo lo stesso fattore di recupero, ha una superficie utile minore; questo è valido anche nei confronti dei moduli a spirale avvolta, sia pure in minor misura, vista la consistente differenza dei fattori di recupero.

Il modulo a membrane piane ha però dei vantaggi notevoli rispetto ai concorrenti che lo rendono effettivamente adatto all'impiego navale:

- data la configurazione delle camere di circolazione nelle quali l'acqua lambisce le membrane esso è meno soggetto ai pericoli di sedimentazione, del deposito di sali ed all'installarsi di microorganismi
- il lavaggio delle membrane risulta estremamente facile ed efficace
- dato il suo particolare sistema di montaggio il modulo può essere smontato e riparato sostituendo i componenti in avaria, membrane comprese, con i mezzi di bordo.

Basandosi sulla effettiva possibilità di lavare efficacemente le membrane, l'impianto che utilizza i moduli a membrane piane, richiede come trattamento dell'acqua di alimento solo una filtrazione accurata, ma non eccessivamente spinta; questo porta ad avere un impianto estremamente semplice, affidabile e facile da condurre e con bassi costi di esercizio.

1.5 - Caratteristiche dell'acqua prodotta

Con gli impianti di dissalazione ad osmosi inversa si possono ottenere acque della purezza desiderata.

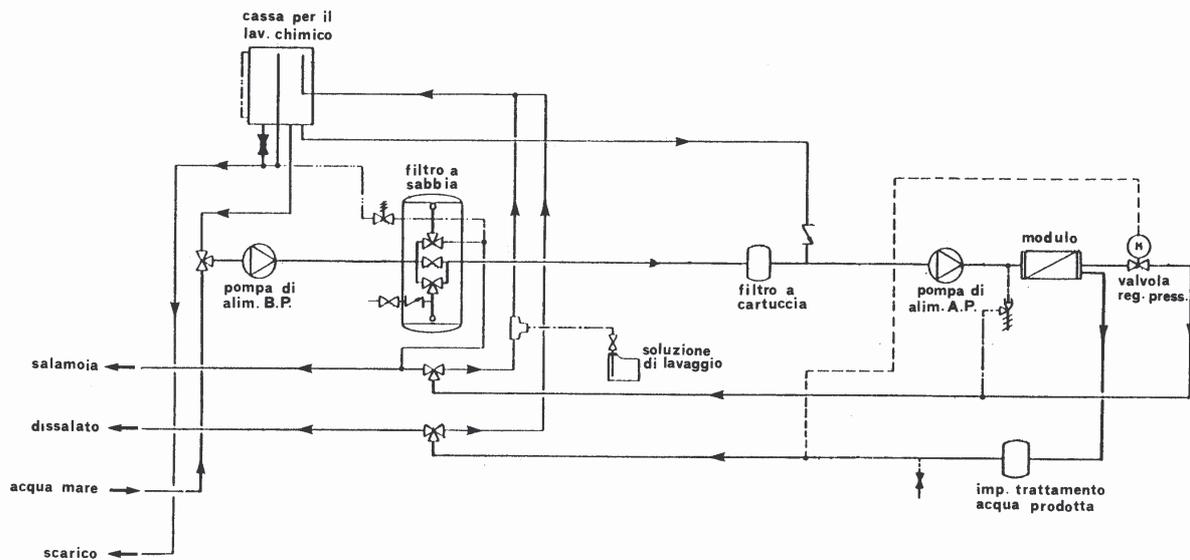
Per la produzione di acqua potabile risultano normalmente sufficienti dei dissalatori a stadio unico che, con membrane nuove, producono acqua con un TDS (salinità totale disciolta), inferiore a 500 p.p.m..

Per l'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO), il limite massimo del TDS, affinché l'acqua possa essere definita potabile, è pari a 1500 p.p.m., mentre il valore ottimale è 500p.p.m..

C'è però da dire che il TDS dell'acqua prodotta dai dissalatori tende ad aumentare all'accumularsi delle ore di funzionamento delle membrane; per ottimizzare il rapporto costo/efficacia della gestione è opportuno accettare una escursione del TDS fino a 1000 p.p.m..

1.6 - Schemi di impianti ad osmosi inversa

Un impianto ad osmosi inversa è in genere configurato come nella figura seguente:



Schema circuitale di un generico impianto ad O.I.

- alimento a bassa pressione;
- filtraggio e trattamento acqua di alimento;
- alimento ad alta pressione;
- moduli;
- scarico salamoia;
- trattamento e controllo dell'acqua prodotta e suo trasferimento;
- trattamento impianto (risciacquo, lavaggio chimico, messa in conservazione).

L'alimento a bassa pressione è simile a quello di altri servizi di bordo; circa la dislocazione della presa di aspirazione conviene che essa sia lontana da eventuali scarichi a mare di fluidi trattati con cloro.

L'impianto viene alimentato con una E/P di bassa pressione la cui caratteristica di funzionamento deve essere tale da soddisfare le esigenze dell'impianto previste nel progetto che non si limitano alla sola alimentazione dei moduli ma anche a fornire una portata aggiuntiva che serve a lavare in controcorrente i filtri multimedia.

Il filtraggio, più o meno spinto in funzione del tipo di modulo adottato, è fondamentale per il corretto funzionamento dell'impianto.

In campo navale, a meno di problemi di spazio e di ingombro, viene usato un sistema di filtraggio composto da due stadi:

- il primo basato sull'uso di filtri "multimedia" (in genere sabbia +antracite) che permettono di filtrare e chiarificare l'acqua;
- il secondo con filtri a cartucce, del tipo a perdere, che possono essere considerati filtri di guardia.

I filtri a sabbia sono in genere ingombranti e pesanti; hanno però il vantaggio di essere lavabili in controcorrente e questo permette di diminuire di molto i costi di esercizio dell'impianto e le difficoltà di approvvigionamento dei filtri.

Oltre al filtraggio, comune a tutti gli impianti, esistono altri trattamenti dell'acqua di alimento che dipendono dal tipo di membrana o dal tipo di modulo adottato nell'impianto; essi sono:

- controllo temperatura;
- controllo pH;
- arresto cloro libero;
- arresto idrocarburi;
- iniezione aggreganti- flocculanti
- sterilizzazione.

Il controllo della temperatura viene effettuato in quanto le membrane non sopportano temperature superiori ai 40 °C e questo pone dei problemi per la installazione dell'impianto e la conservazione dei moduli.

Circa la temperatura dell'acqua di mare da assumere per il progetto dell'impianto c'è da dire che nel Mediterraneo l'escursione di temperatura dell'acqua in superficie è di circa 1°C variando nell'anno da 26°C a 11°C.

Dato che, come detto prima, la produzione diminuisce con il diminuire della temperatura dell'acqua di mare (di circa il 3% per ogni grado centigrado), alcuni impianti utilizzano dei riscaldatori allo scopo di non scendere mai al di sotto di 25°C in modo da assicurare la produzione minima richiesta in ogni condizione.

In genere però si evita di ricorrere a tale soluzione assegnando una temperatura minima all'acqua di alimento cui viene riferita la produzione minima richiesta.

Per quanto riguarda la M.M.I. la temperatura di riferimento è stata fissata pari a 10°C.

Il controllo del pH non è richiesto, alle normali temperature di lavoro, per le membrane a base di poliammide che lavorano con acqua di mare, mentre può essere necessario con membrane di altro materiale o se viene dissalata acqua con altre caratteristiche.

Come già detto le membrane a base di poliammidi non accettano la presenza del cloro libero, pertanto l'impianto che usa questo tipo di membrana deve prevedere gli accorgimenti atti a proteggere adeguatamente le membrane quando necessario.

Si può ipotizzare la presenza di cloro libero nell'acqua di alimento solo se l'aspirazione dell'impianto è posta in prossimità di scarichi clorati o se si usa la clorazione saltuaria del circuito di alimento in funzione antivegetativa; in questo caso per arrestare il cloro si usano dei filtri a carbone attivo.

Gli idrocarburi sono dannosi perché possono depositarsi sulle membrane formando una pellicola impermeabile all'acqua.

Se però si posiziona la presa a scafo dell'impianto in profondità e lontano da zone in cui possono scaricarsi acque oleose, il problema degli idrocarburi viene superato.

L'iniezione di aggreganti-flocculanti, dosata in base alla portata ed alle condizioni dell'acqua, permette di aggregare in flocculi le particelle in sospensione troppo piccole per essere filtrate e tali

quindi da creare il pericolo di occlusione dei canali di scorrimento delle membrane; l'iniezione deve quindi avvenire prima degli stadi di filtraggio.

Nel caso di moduli a fibra cava la filtrazione deve essere spinta fino a fermare anche queste particelle così aggregate prima che arrivino alle membrane, e di qui sorge la necessità di munire l'impianto di un misuratore di torbidità.

Nel caso dei moduli a spirale avvolta l'arrivo di tali particelle alle membrane non provoca grossi danni poiché le dimensioni dei canali di flusso sono tali da permettere la loro eliminazione attraverso lo scarico della salamoia (brine).

Il trattamento con aggreganti-flocculanti non è richiesto con i moduli a membrana piana, questo perché la stessa conformazione delle camere tra membrana e membrana e le caratteristiche del flusso di acqua impediscono il deposito di sedimenti di qualsiasi natura, inoltre il lavaggio può essere condotto in maniera estremamente efficace.

La sterilizzazione continua dell'acqua di alimento è ritenuta necessaria quando il materiale costituente le membrane è a base di acetati di cellulosa, oppure i moduli sono del tipo a fibre cave.

È senz'altro utile, ma non tassativo, quando i moduli sono a spirale avvolta; non è normalmente richiesta con i moduli a membrana piana.

I metodi seguiti per la sterilizzazione sono vari, i più comuni sono:

- *la clorazione*

- *il trattamento con raggi ultravioletti.*

L'alimentazione ad alta pressione (la pressione di funzionamento delle membrane varia dai 55 ai 65 bar), viene fornita mediante una E/P di alta pressione; negli impianti navali di piccole e medie dimensioni vengono normalmente usate pompe alternative.

Questa scelta, tenuto anche conto delle basse portate richieste, è giustificata dall'alto rendimento, dall'affidabilità, dalla semplicità e quindi facilità di manutenzione che questo tipo di pompe presenta nei confronti delle pompe centrifughe che vengono invece usate normalmente nei grossi impianti basati a terra.

È necessario risolvere alcuni problemi legati a questo tipo di pompe e cioè:

- cavitazione

- rumorosità

- vibrazioni

La cavitazione viene eliminata dimensionando ed installando accuratamente la tubolatura di aspirazione.

Trattandosi poi di una pompa alternativa conviene che, in corrispondenza dell'aspirazione, vi sia un polmone per ridurre le fluttuazioni di pressione e l'innescò di cavitazione.

Uno smorzatore di pulsazioni deve essere previsto anche sulla mandata.

Per quanto riguarda i moduli questi possono essere posti tra loro in parallelo, in serie oppure in una combinazione dei due modi suddetti.

La sistemazione in parallelo permette di avere uno scarico della salamoia meno concentrato e quindi viene impiegata quando la concentrazione salina dell'acqua di alimento o la sua temperatura sono elevate: questo per evitare precipitazioni saline sulle membrane.

La sistemazione in serie permette di utilizzare pompe con portata ridotta rispetto al caso precedente.

In questo caso però è possibile arrivare a concentrazioni della salamoia troppo elevate nei moduli finali, con rischio di precipitazione salina anche alle basse temperature.

Si è detto precedentemente che la produzione, a parità di altre condizioni, varia proporzionalmente con la temperatura.

Se vogliamo che l'impianto assicuri una produzione minima anche a bassa temperatura per evitare l'impiego di un riscaldatore dell'acqua di alimento, dovremo scegliere un numero di moduli che assicuri tale produzione minima.

All'aumentare della temperatura la produzione in eccesso si elimina facendo funzionare l'impianto in maniera intermittente oppure escludendo un certo numero di moduli dal funzionamento.

Convieni comunque avere più di un modulo in modo che una avaria non comporti il blocco dell'impianto ma un funzionamento con produzione ridotta.

Per quanto riguarda il risciacquo, il lavaggio chimico e la messa in conservazione dell'impianto è bene notare che è di vitale importanza che ogni volta che l'impianto si arresta questo venga irrigato abbondantemente con acqua dolce prelevata dalla cassa di raccolta o da una cassa apposita.

Questo è fondamentale per evitare danni alle membrane; qualora l'acqua di mare permanesse su di esse si instaurerebbe, ad impianto fermo, il processo di osmosi diretta.

L'osmosi diretta, date le pressioni in gioco, potrebbe portare allo scollamento ed alla rottura dello strato osmotico della membrana, che può sopportare la pressione solo in un senso.

Il riempimento con acqua dolce permette poi di mantenere in stand-by l'impianto per periodi abbastanza lunghi, (almeno una settimana), senza problemi per quanto riguarda la proliferazione di microorganismi sulle membrane.

Se il periodo di sosta supera una settimana, conviene riempire il circuito od i soli moduli di una soluzione conservante.

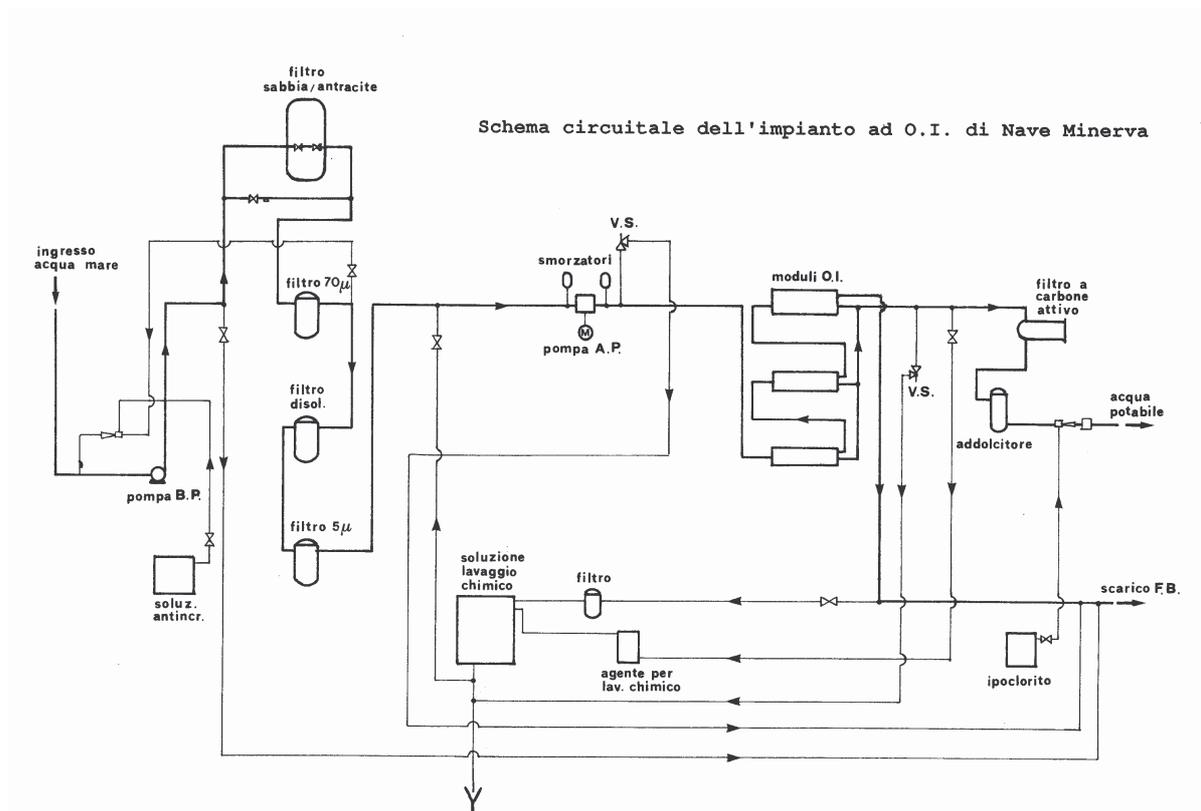
Il lavaggio chimico delle membrane viene di norma fatto quando le prestazioni delle stesse decadono al di sotto di limiti prefissati.

In genere il lavaggio viene eseguito mediante circolazione di soluzioni ognuna preposta alla rimozione di un particolare tipo di sporco.

Quello riportato nella figura è un possibile schema generico di impianto di dissalazione ad osmosi inversa.

1.7 - Esempi di impianti realizzati

Uno dei primi impianti di dissalazione ad osmosi inversa impiegato a bordo di unità della M.M.I., dopo quello sperimentale installato sulla nave "Alpino", è l'impianto fornito dalla TERMOTECNICA per le Unità Classe MINERVA avente una potenzialità di 15 m³ al giorno (vedi figura seguente).



Si tratta di un impianto che adotta moduli con membrana in poliammide del tipo avvolto a spirale alimentati in serie avente un fattore di recupero del 10%.

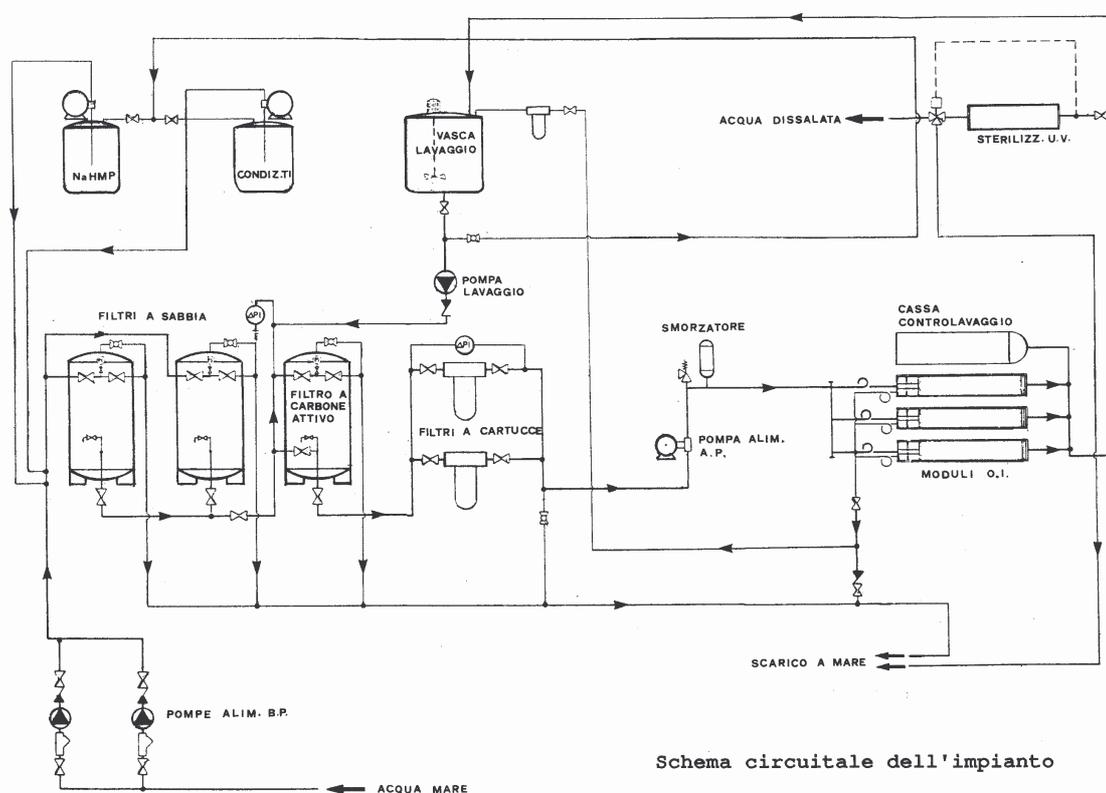
L'impianto comprende inoltre i seguenti componenti principali:

- E/pompa di alimento acqua mare a bassa pressione di tipo centrifugo.
- Un filtro a sabbia-antracite in cui la componente filtrante è costituita da un letto di materiali stratificati e precisamente: uno strato di antracite con funzione di filtro a grana grossa; uno strato di sabbia con funzione di filtro a grana fine; uno strato di grana fine con funzione di supporto. Tale elemento filtrante consente la rimozione di corpuscoli del diametro superiore a 200 microns ed è rigenerabile mediante controlavaggio.
- Un gruppo di prefiltri posti in serie costituiti da: un filtro da 70m; un filtro disoleatore ed un filtro da 5m.
- Un impianto di dosaggio di soluzione antincrostante costituito da; un serbatoio contenete una soluzione diluita di agente antincrostante e da un eiettore per acqua alimentato da una frazione dell'acqua di alimento ricircolante dall'uscita del filtro da 70m sull'aspirazione della pompa di alimento a bassa pressione.
- Una pompa ad alta pressione a pistoni che innalza la pressione dell'acqua di mare al valore di esercizio dei moduli che è di circa 50 bar.
- Una unità ad osmosi inversa costituita da tre moduli alimentati in serie contenenti permeatori in materiale poliammidico con configurazione a spirale avvolta.
- Un sistema di lavaggio chimico costituito da; un serbatoio contenente l'agente chimico per il lavaggio e una cassa contenente la soluzione di lavaggio. La soluzione viene preparata immettendo l'acqua dissalata nel serbatoio contenente l'agente chimico e inviando il tutto nella

cassa da cui poi la soluzione viene prelevata dalla pompa A.P. ed inviata ai tre moduli dove compie il lavaggio chimico delle membrane e da qui torna al circuito di lavaggio.

- Un filtro a carbone attivo installato a valle dei moduli di dissalazione per l'eliminazione di odori e sapori causate da sostanze organiche. Dopo il filtro a carbone attivo, l'acqua viene fatta passare attraverso una colonna di neutralizzazione per la correzione del pH e per un ulteriore addolcimento.
- Un impianto di sterilizzazione mediante dosaggio di una soluzione di ipoclorito di sodio al 12%. La soluzione di ipoclorito viene aspirata dal serbatoio di stoccaggio tramite un eiettore che sfrutta come fluido motore l'acqua da trattare.

Nella figura seguente è riportato lo schema dell'analogo impianto di dissalazione ad osmosi inversa installato sulle Unità da sbarco SAN GIORGIO.



Schema circuitale dell'impianto
ad O.I. di Nave S. Giorgio

Nella condotta dei suddetti impianti bisogna porre attenzione al fatto che ad ogni fermata che non sia di carattere temporaneo (8-10 ore) è opportuno procedere al flussaggio con acqua dolce per eliminare la salamoia dalle membrane ed evitare così l'innesco dell'osmosi diretta. Nel caso di fermata prolungata dell'impianto (oltre una settimana), bisogna procedere alla messa in conservazione trattando le membrane con una soluzione di opportuni condizionanti (ad es. una soluzione contenente 0,5% di metabisolfito di sodio).

CAP.2 - IMPIANTI DI DISTILLAZIONE MEDIANTE EVAPORAZIONE

2.1 -Generalita'

Il processo di distillazione consiste nel riscaldamento dell'acqua di mare fino alla temperatura di evaporazione e nella successiva condensazione del vapore prodotto.

Gli evaporatori vengono classificati principalmente in base al tipo di energia sfruttata che può essere termica o meccanica.

La fonte di energia termica comunemente utilizzata è il vapore prodotto o dalle caldaie navali di propulsione (vapore di scarico dei macchinari ausiliari in navi con propulsione a vapore), o da caldaie ausiliarie appositamente installate se si tratta di navi con propulsione non a vapore (Diesel, gas o miste).

2.2 - Evaporatori

Gli evaporatori utilizzati sulle Unità navali sono stati principalmente:

- evaporatori a tubi sommersi;
- evaporatori ad effetto "flash" pluristadio;
- evaporatori a compressione di vapore

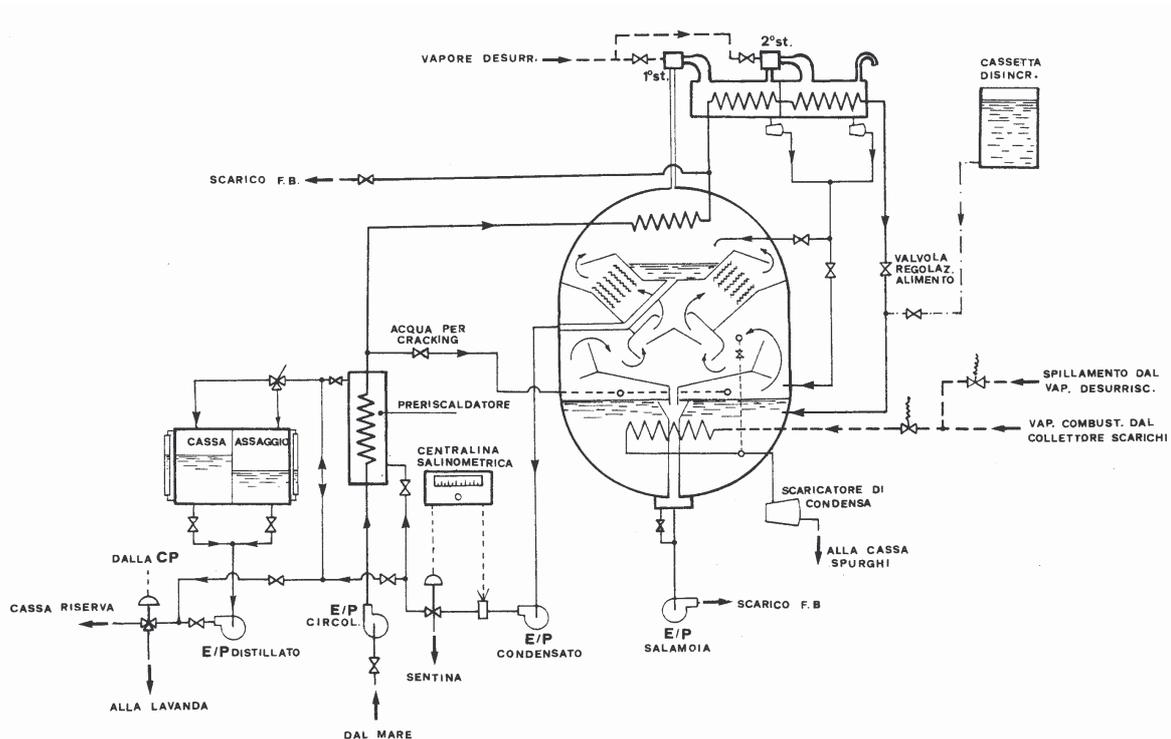
2.2.1 - Evaporatore a tubi sommersi

Questi evaporatori, una volta molto diffusi a bordo delle Unità della M.M.I., oggi sono stati abbandonati a causa del loro scarso rendimento e sono stati sostituiti da evaporatori ad effetto "flash",.

Negli evaporatori a tubi sommersi, il fascio tubiero riscaldatore attraversato dal vapore "combustibile" è completamente immerso nell'acqua di alimento in ebollizione.

L'inconveniente principale di questo tipo di impianto è che, esternamente ai tubi, si formano rapidamente incrostazioni di notevole entità con conseguente peggioramento del rendimento dell'impianto.

Questi evaporatori possono essere a semplice o doppio effetto; l'impianto a semplice effetto (vedi figura seguente), è essenzialmente costituito da un involucro cilindrico che contiene due fasci tubieri, due pacchi separatori e alcuni diaframmi.



Schema di funzionamento di un evaporatore a tubi sommersi

Il fascio tubiero riscaldatore, completamente immerso nell'acqua di alimento, è internamente percorso dal vapore combustibile.

Riscaldando l'acqua di mare il vapore si condensa e mediante uno scaricatore la condensa viene inviata nella cassa spurghi.

L'acqua di mare evaporata, per giungere a lambire i tubi del fascio condensatore è costretta da una doppia serie di diaframmi a seguire un percorso sinuoso e ad attraversare due separatori costituiti da pacchi di lamierini ondulati; vengono così ostacolati eventuali trascinamenti di goccioline di acqua salata.

Sotto il fascio condensatore è sistemata una ghiotta che raccoglie l'acqua distillata prodotta e la invia all'aspirazione della E/P di estrazione del condensato.

Sulla mandata di tale pompa è sistemata una cella salinometrica a funzionamento continuo.

Se la salinità dell'acqua prodotta supera il limite massimo accettabile (10 p.p.m.) viene comandato automaticamente lo smistamento di una valvola a tre vie che scarica l'acqua prodotta in sentina.

Se invece la salinità è accettabile l'acqua distillata viene refrigerata in un apposito scambiatore, dove viene preriscaldata l'acqua di mare, dopodiché viene inviata alle casse di assaggio, e da qui viene inviata alle casse di riserva.

L'acqua di mare, spinta dalla E/P di circolazione, attraversa i condensatori del gruppo eiettori preriscaldandosi ed entra nella parte bassa dell'evaporatore.

Per contenere la formazione di incrostazioni a valle della valvola di regolazione alimento viene immessa una soluzione antincrostante.

La parte di acqua non evaporata, detta salamoia, stramazza da un tubo di sfioro il cui compito è anche quello di mantenere costante il livello e viene scaricata fuori bordo dalla E/P estrazione salamoia.

La pulizia esterna del fascio tubiero dalle incrostazioni saline viene effettuata mediante shock termico detto cracking.

Questa operazione avviene scaricando completamente la salamoia, riscaldando il fascio tubiero evaporante col vapore combustibile ed aprendo poi l'acqua di alimento ad appositi erogatori che innaffiano l'intero fascio.

Il gruppo eiettori a due stadi mantiene bassa la pressione all'interno dell'evaporatore in modo che la vaporizzazione avvenga a bassa temperatura.

L'evaporatore a doppio effetto del tipo soloshell (unico involucro) ha un funzionamento del tutto analogo a quello di un evaporatore a semplice effetto; esso è costituito da un involucro cilindrico diviso in due parti da un diaframma verticale.

Ciascuno dei due "effetti" o "stadi" funziona in modo simile all'evaporatore a semplice effetto descritto sopra.

La denominazione "doppio effetto" deriva dal fatto che l'acqua di mare viene vaporizzata in due fasi successive; il vapore combustibile del secondo effetto è quello prodotto dal primo effetto.

L'acqua di alimento, che è una piccola parte di quella di circolazione, entra nella camera evaporante del primo effetto già alla temperatura di evaporazione di 80 °C, essendo stata preriscaldata attraverso il fascio condensatore del secondo effetto, il piccolo condensatore degli eiettori ed il preriscaldatore di alimento.

Il calore latente di vaporizzazione viene fornito dal vapore combustibile.

Solo 1/3 dell'acqua di alimento viene evaporata complessivamente.

Nel primo effetto ne vaporizza circa 1/6; la rimanente parte viene travasata nel secondo effetto dove esiste un vuoto più spinto.

Una piccola parte dell'acqua evapora istantaneamente poichè provenendo dal primo effetto, si trova alla temperatura di 80 °C che è maggiore della temperatura di evaporazione che compete al secondo effetto pari a 50°C.

Questa evaporazione istantanea assorbe una quantità di calore tale da portare tutta l'acqua del secondo effetto a 50 °C.

Per produrre altro vapore occorre somministrare altro calore pari a quello latente di vaporizzazione.

Il vapore combustibile disponibile per il secondo effetto è quasi tutto quello prodotto nel primo effetto.

Il vapore prodotto dal primo effetto, infatti, in piccola parte si condensa preriscaldando l'acqua di alimento, il resto si condensa nel fascio vaporizzatore del secondo effetto cedendo il proprio calore latente di condensazione all'acqua del secondo effetto.

2.2.2 - Evaporatore ad effetto flash pluristadio

Negli evaporatori ad effetto flash il riscaldamento dell'acqua di alimento avviene in un apposito scambiatore sistemato esternamente all'involucro dell'evaporatore.

Questo scambiatore non è soggetto quindi ad incrostazioni perché l'acqua di mare non evapora, essendo ancora in pressione.

La trasmissione del calore si mantiene quindi a livelli elevati per lungo tempo.

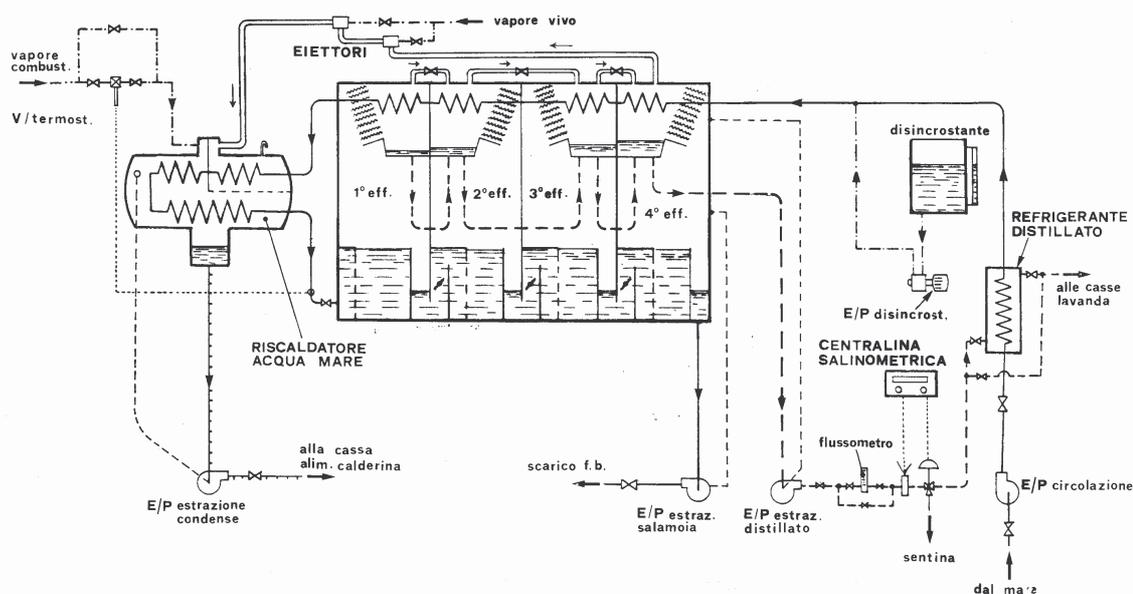
Successivamente l'acqua di mare così riscaldata viene introdotta all'interno del corpo evaporante, dove regna una pressione molto inferiore a quella atmosferica.

L'acqua si trova così ad una temperatura superiore a quella di evaporazione corrispondente a quella pressione, per cui una parte di essa evapora istantaneamente (effetto "flash").

I sali separatisi dall'acqua evaporata, in parte vengono scaricati fuoribordo attraverso la salamoia, in parte formano incrostazioni sulle pareti del corpo evaporante, ma non provocano alcun inconveniente perché lo scambio termico è già avvenuto fuori dall'evaporatore, nell'apposito scambiatore.

L'evaporazione viene ottenuta normalmente in più stadi aventi pressione decrescente; normalmente si tratta di evaporatori a tre o quattro stadi.

Nel caso di un evaporatore a quattro stadi, esso è costituito da un involucro parallelepipedo suddiviso in quattro camere da tre diaframmi verticali (vedi nella figura seguente lo schema di un evaporatore tipo "flash" a quattro stadi).



Schema di funzionamento di un evaporatore tipo "flash"

Tra uno stadio e l'altro è ricavato un sifone dotato di una farfalla la cui regolazione viene effettuata in fase di collaudo e messa a punto dell'impianto.

Lo scopo dei sifoni è quello di permettere il travaso dell'acqua di mare da uno stadio all'altro mantenendo costante il livello nelle singole camere.

Il proporzionamento dei sifoni tiene conto delle differenze di pressione riguardanti le camere adiacenti tra le quali sono inseriti.

Un eiettore a doppio stadio aspira dalla camera del quarto effetto.

Esistono poi dei tubi che mettono in comunicazione ciascuna camera di condensazione con quella precedente, allo scopo di convogliare i gas incondensabili sull'aspirazione dell'eiettore e mantenere sotto vuoto le singole camere.

Dal primo all'ultimo effetto il vuoto assume valori progressivamente più spinti in dipendenza della temperatura di condensazione che è invece decrescente.

Una E/P di circolazione aspira acqua di mare che dopo aver refrigerato l'acqua distillata prodotta, viene fatta fluire attraverso i fasci tubieri condensanti dal quarto al primo stadio riscaldandosi progressivamente, condensando il vapore prodotto la cui temperatura è crescente dal quarto stadio verso il primo.

Successivamente l'acqua di mare percorre il fascio tubiero del riscaldatore di alimento dove raggiunge la temperatura di circa 75 °C.

La costanza di tale temperatura è garantita da una valvola termostatica sistemata sulla ammissione del vapore combustibile.

Nella camera del primo stadio l'acqua di mare trova un grado di vuoto cui corrisponde in base alla tabella di Regnault, una temperatura di evaporazione minore, autoevaporando parzialmente.

Negli stadi successivi avviene lo stesso fenomeno poichè il grado di vuoto è sempre più spinto.

La E/P di estrazione della salamoia aspira l'acqua non evaporata dall'ultimo stadio e la scarica fuoribordo.

Il vapore prodotto nei singoli stadi, lambendo il fascio tubiero del proprio condensatore, si condensa raccogliendosi nella sottostante ghiotta.

Ciascuna ghiotta, a partire dal primo stadio, scarica la condensa in quella successiva per mezzo di un tubo ad "U" la cui altezza, espressa in metri, deve essere almeno pari alla differenza di pressione, anch'essa espressa in metri, della colonna di acqua esistente tra i due stadi; in caso contrario il tubo si disinnesca portando allo stesso valore la pressione nei due stadi attigui.

La E/P di estrazione del condensato aspira dalla ghiotta del quarto stadio ed invia l'acqua prodotta alle casse di riserva o alla lavanda.

La condensa del vapore combustibile e del vapore eiettori viene aspirata da una apposita pompa ed inviata alle casse dell'acqua distillata di alimento delle calderine.

A completamento dell'impianto esiste una centralina salinometrica ed una cassetta con relativa pompa per l'introduzione dell'antincrostante.

PARTE 2^: IMPIANTI ANTINQUINAMENTO

CAP.3 - CONSIDERAZIONI SULL'INQUINAMENTO MARINO

3.1 - Generalità

La massiccia industrializzazione dei paesi più evoluti ha negli ultimi decenni reso sempre più grave il problema dello smaltimento dei rifiuti e dei residui di lavorazione dei diversi settori produttivi.

La dispersione incontrollata nell'ambiente di tali sostanze ha già provocato gravi guasti ad alcuni ecosistemi per cui è diventata una esigenza pressante ed indilazionabile la ricerca di sistemi, di produzione trasporto e smaltimento di una grande quantità di sostanze inquinanti, che siano meno nocivi alla natura ed in ultima analisi all'uomo.

Con il termine inquinamento si intende appunto una immissione di sostanze in grado di apportare una qualsiasi modifica alle caratteristiche specifiche dell'ambiente naturale interessato (aria, acqua e suolo).

Questo termine è comprensivo di tutte le ipotesi di alterazione dell'ambiente e si può riferire tanto all'atto dell'immissione quanto agli effetti che tale immissione provoca.

Per quanto riguarda in particolare l'inquinamento dell'ambiente marino, che ci interessa più da vicino, esso è provocato da una vastissima gamma di sostanze diverse dai costituenti dell'acqua di mare, che direttamente od indirettamente vi vengono immesse.

Sono causa di inquinamento diretto del mare gli scarichi da terra degli effluenti industriali e dei rifiuti civili generati da insediamenti dislocati lungo le coste, i versamenti generati da naviglio di ogni genere e quelli provocati da incidenti occorsi a navi durante la navigazione.

L'inquinamento indiretto è invece da attribuire a tutte le altre forme di immissioni, atmosferiche, terrestri, lacustri e fluviali che da terra confluiscono in mare.

Per quanto concerne gli effetti dell'inquinamento sull'ambiente marino essi possono essere diversissimi: talvolta le sostanze immesse sono così tossiche da distruggere più o meno completamente gli organismi che vi si trovano esposti, come accade con certi pesticidi usati in agricoltura; altre volte, pur non essendo tossiche, esse impediscono o riducono una funzione vitale agendo negativamente, ad esempio, sulla riproduzione di una certa specie.

Molto spesso, le sostanze immesse hanno proprietà tali da agire profondamente sull'ambiente marino alterandone le caratteristiche oppure, come avviene per gli idrocarburi, impedendone la naturale e indispensabile ossigenazione.

Certe sostanze, accumulandosi negli organismi che vivono in mare possono farli diventare, a loro volta, tossici per coloro che se ne nutrono; infine, possono provocare degli effetti selettivi a lungo termine con conseguente alterazione del fattore più importante dell'ambiente marino: il suo equilibrio biologico.

Riferendoci al tipo di modificazione che l'inquinante produce si può fare una distinzione tra:

- "*inquinamento fisico*", allorché vengono modificate le proprietà fisiche dell'acqua come temperatura, limpidezza e colore.

- "*inquinamento chimico*", allorché le modificazioni interessano le caratteristiche chimiche come pH, durezza e salinità.
- "*inquinamento biologico*", quando vengono alterati i caratteri biologici, sia per quanto riguarda la richiesta di ossigeno nei processi di trasformazione delle sostanze organiche presenti, sia per l'anormale presenza di microrganismi, funghi e batteri.

Nella maggior parte dei casi, l'inquinamento marino investe tutti e tre gli aspetti sopra descritti.

3.2 - Sostanze che consumano ossigeno

La sopravvivenza vegetale e animale in un bacino è strettamente dipendente dalla capacità dell'acqua di mantenere disciolta la quantità minima di ossigeno indispensabile per una normale biocenosi.

La concentrazione di ossigeno disciolto D.O. (Dissolved Oxygen) varia con la temperatura dell'acqua e la pressione atmosferica: alla temperatura di 20°C e 1 atm di pressione, alla saturazione, il valore del D.O. è 9 mg/l (9 p.p.m.).

Un bacino viene considerato inquinato quando la concentrazione del DO risulta inferiore al livello necessario per mantenere una normale biocenosi dell'acqua.

La causa principale della deossigenazione dell'acqua è la presenza dei rifiuti che, nel loro insieme, vengono chiamati "sostanze che consumano ossigeno" in quanto esse sono facilmente decomposte da microrganismi i quali richiedono, per i loro processi vitali, la presenza dell'ossigeno.

Questi microrganismi aerobici possono utilizzare solo l'ossigeno disciolto ed in mancanza di questo soccombono; in queste condizioni al loro posto compaiono microrganismi anaerobici che decompongono le sostanze organiche in prodotti sgradevoli e dannosi (processi di putrefazione), come idrogeno solforato, ammoniaca, ammine, acidi, metano ecc.; questi prodotti dopo aver saturato l'acqua passano nell'atmosfera inquinandola.

Se la quantità delle sostanze organiche presenti nell'acqua non è troppo elevata e se l'ossigeno in essa disciolto è sufficiente, i microrganismi aerobici possono demolirle completamente trasformando il carbonio e l'idrogeno rispettivamente in CO₂ e H₂O, l'azoto in ammoniaca, la quale verrà successivamente ossidata a nitriti e poi a nitrati.

In queste condizioni non si potranno avere processi di putrefazione e l'acqua viene definita "stabilizzata".

Per potere accertare se l'ossigeno contenuto nell'acqua è sufficiente o meno per decomporre tutte le sostanze inquinanti presenti, ad opera dei microrganismi aerobici esistenti, occorre evidentemente conoscere non solo le quantità ma anche la natura di queste sostanze, cosa generalmente molto difficile da stabilire.

Per risolvere il problema si ricorre ad una prova pratica che ci consente di valutare la *richiesta di ossigeno biochimico* (Biochemical Oxygen Demand), cioè la quantità di ossigeno richiesta dai processi biochimici ossidativi, senza arrivare alla putrefazione.

Tale quantità si determina diluendo l'acqua inquinata con acqua pura a contenuto noto di ossigeno disciolto, lasciando la miscela in incubazione, a 20 °C, per 5 giorni e poi determinando l'ossigeno ancora presente.

Il BOD₅, espresso in p.p.m., è un dato importante per valutare il livello di inquinamento di una acqua non tanto perchè ci indica la quantità di ossigeno necessario per la sua autodepurazione, ma perchè ci fornisce un criterio di valutazione sulla ossidabilità delle sostanze inquinanti che è strettamente connessa con la natura e la struttura dei composti presenti, con le condizioni ambientali e con il tipo di microrganismi coinvolti nei processi biochimici di trasformazione.

Un'acqua è considerata pura quando ha un BOD₅ inferiore ad 1 p.p.m.; sufficientemente pura con un BOD₅ di 3 p.p.m..

Il limite massimo di BOD₅ ammesso per le acque di scarico è di 40 p.p.m..

Per valutare la quantità e la natura delle sostanze organiche presenti nell'acqua inquinata, allo scopo di adottare il trattamento di depurazione più efficace, è necessario conoscere anche il COD (Chemical Oxygen Demand), parametro che rappresenta la quantità di ossigeno equivalente a quella porzione di materiale organico suscettibile di essere completamente trasformato per mezzo di un ossidante chimico.

Il limite massimo di COD ammesso per le acque di scarico è di 160 mg/l.

Nella categoria "*sostanze che consumano ossigeno*" vengono compresi non solo gli scarichi di liquami e materiali organici ma, in certi casi, gli scarichi contenenti sostanze inorganiche e minerali, come ad esempio quelli provenienti dalle industrie alimentari, dalle concerie e dalle lavorazioni della cellulosa.

3.3 - Agenti patogeni

L'acqua è un potenziale vettore di microrganismi patogeni e può quindi essere pericolosa per la salute e la vita umana.

Gli agenti patogeni più frequentemente trasmessi attraverso l'acqua sono quelli responsabili delle infezioni intestinali (tifo, paratifo, dissenteria e colera) e quelli responsabili della poliomielite e dell'epatite virale.

Per quanto riguarda l'ambiente marino, la causa di questo tipo di inquinamento è da ricercarsi negli scarichi delle fognature urbane, i quali effettuati generalmente sotto costa, creano problemi soprattutto per quanto concerne la balneazione.

Per valutare il grado di pericolosità di una acqua si ricorre all'analisi batteriologica che ci consente di conoscere sia il numero complessivo dei microrganismi presenti nel campione sia l'eventuale presenza di alcune specie di agenti patogeni che rappresentano l'indice di inquinamento fecale.

La presenza dello *streptococco fecale*, capace di sopravvivere per breve tempo nell'acqua, è indice di inquinamento in atto; la presenza del colibacillo, molto più resistente del primo, è indice di inquinamento meno recente; se invece è presente il *clostridium perfringens*, germe patogeno molto più resistente degli altri due tipi, l'inquinamento è da ritenere relativamente più remoto.

I limiti di accettabilità di un'acqua di scarico inquinata da agenti patogeni vengono espressi in MPN/100ml (Most Probable Number), cioè nel numero di coliformi e streptococchi fecali contenuti nel terreno di coltura (gelatina, agar) e riferito a 100 ml dell'acqua in esame.

La legge in vigore prevede per le acque di scarico un contenuto di coliformi fecali fino a 12000 MPN e per gli streptococchi fecali fino a 2000 MPN.

3.4 - Sostanze nutritive della flora acquatica

Le sostanze nutritive della flora acquatica sono un importante fattore che ne condiziona lo sviluppo; a parità di tutti gli altri fattori, la rapidità e il grado dello sviluppo delle alghe e delle piante è proporzionale alla quantità di sostanze nutritive utilizzabili.

Quando in un corso di acqua o bacino, specie se a lenta corrente, viene ad essere elevato il tenore dei fosfati, dei nitrati e delle altre sostanze nutritive, si ha il fenomeno della "eutrofizzazione" (dal greco "buon nutrimento") che comporta, come prima conseguenza, uno sviluppo di eccezionale rigoglio della flora acquatica.

All'inizio di questo fenomeno biologico avremo un aumento della funzione clorofilliana, con consumo dell'anidride carbonica presente nell'ambiente circostante e corrispondente cessione di ossigeno.

A questa prima fase positiva succede poi quella della morte delle alghe e delle piante e la loro caduta sul fondo; tutto questo avviene in condizioni di grave turbativa dell'ecosistema, dato che la velocità di riproduzione in queste condizioni è assolutamente abnorme.

Si instaurano condizioni di vita anaerobica: le piante, ed in particolare le alghe, cadute sul fondo imputridiscono alterando le condizioni di vita dei pesci ed il fiume, il lago, il corso d'acqua, il mare muoiono.

L'insieme dei fenomeni sopradescritti, dall'abnorme sviluppo generale fino alla scomparsa di ogni forma di vita legata alla presenza dell'ossigeno, gli inconvenienti che ne derivano (sgradevoli odori a causa dell'imputridimento delle alghe, impraticabilità degli specchi marini antistanti le spiagge, ecc.), viene chiamato "eutrofizzazione".

Tra le sostanze ad elevato potere nutritivo che si ritrovano per diversi motivi nelle acque superficiali e sotterranee oltretutto negli scarichi, sono da annoverare i fosfati ed i nitrati.

I fosfati sono sempre associati, in concentrazioni che possono arrivare anche al 50%, ai detergenti sintetici di cui oggi si fa uso indiscriminato.

Le leggi in vigore prevedono la graduale sostituzione dei detergenti non biodegradabili con i biodegradabili e con gli enzimatici, ma è da prevedere che tali accorgimenti non porteranno ad un miglioramento della situazione perchè anche questi nuovi tipi di detergenti saranno sempre associati a notevoli quantità di fosfati.

Un contributo di fosfati insieme a ingenti quantità di nitrati è dato dai processi di dilavamento ed erosione dei terreni agrari trattati con fertilizzanti artificiali.

I nitrati poi, situazione addirittura paradossale, traggono origine anche dagli stessi impianti di depurazione nati un po' ovunque, nei quali i composti azotati sotto altre forme (nitriti, ammoniaca), vengono trasformati in nitrati per ossidazione.

Attualmente questo fenomeno sta interessando i bacini dell'alto Adriatico con gravi danni per la pesca ed il turismo, industrie particolarmente sviluppate in quelle zone.

3.5 - Composti organici sintetici

A questa categoria appartengono le materie plastiche, i plastificanti, le fibre, i solventi, le vernici, gli additivi di prodotti alimentari, i prodotti farmaceutici ed in particolare, i detersivi, gli erbicidi e gli antiparassitari il cui uso è andato rapidamente espandendosi in questi ultimi anni.

Molte delle sostanze sopracitate sono resistenti alla degradazione biochimica dei microrganismi naturali dell'acqua e, di conseguenza, permangono nell'acqua per lunghi periodi di tempo, con possibilità di accumulo.

Alcune sono responsabili dell'alterazione del sapore, dell'odore e del colore del corpo idrico, con conseguente danno per la vita di pesci e dei molluschi.

Altre, anche se presenti in concentrazioni molto basse, sono tossiche per i pesci e per le altre forme di vita.

Per quanto riguarda i detersivi, vi è anche da menzionare l'inconveniente della formazione di schiuma che in certi bacini assume l'aspetto di una vera e propria coltre che modifica l'ambiente anche dal punto di vista estetico e che impedisce l'ossigenazione del corpo idrico.

L'elevata tossicità di queste sostanze è rilevabile dai limiti di concentrazione ammessi per le acque di scarico che le contengono (vedi la tabella 1 nella figura seguente): si va da 2 p.p.m. per i tensioattivi, a 0,1 p.p.m. per i solventi organici azotati, a 0,05 p.p.m. per i pesticidi clorurati.

3.6 - Sostanze chimiche inorganiche e minerali

Sono gli acidi, i sali, i metalli, le polveri e i fanghi immessi nelle acque sia direttamente che indirettamente, intenzionalmente o meno, dalle industrie chimiche, elettrochimiche, metalmeccaniche, metallurgiche, minerarie ecc., con conseguente azione sul pH, salinità e la tossicità dell'ambiente idrico interessato.

Le proprietà tossiche di numerosi composti inorganici, particolarmente quelle dei metalli pesanti, sono note da tempo ma solo oggi ci siamo resi conto del grave pericolo rappresentato dall'accumulo di queste sostanze nell'aria e nell'acqua, in concentrazioni prossime ai livelli di tossicità.

Il mercurio (Hg), il piombo (Pb), l'arsenico (As), il cadmio (Cd), il cromo (Cr) e il nichel (Ni), sono tutti metalli che si accumulano negli organismi provocando gravi danni, le più volte irreversibili.

A questo riguardo, ricordiamo la vicenda dei fanghi rossi provenienti dagli impianti per la fabbricazione del biossido di titanio (TiO₂) a Scarlino; quella dei tonni e di altre specie di pesci in cui è stato riscontrato un elevato tasso di mercurio la cui provenienza è da individuare nei processi elettrolitici per la produzione del cloro e della soda (processo Solvay), in certi fungicidi e disinfestanti, in certi impianti elettrici (lampade a vapori di mercurio, batterie al mercurio ecc.).

I limiti di concentrazione ammesse nelle acque di scarico vanno da 2p.p.m. per il nichel a 0,005 p.p.m. per il mercurio.

N.	PARAMETRI	CONCENTRAZIONI	NOTE	N.	PARAMETRI	CONCENTRAZIONI	NOTE
01	pH	5.5 - 9.5	(01)	26	Zinco, come Zn	mg/l 0.5	(12)
02	Temperatura	°C	(02)	27	Cianuri, come CN ⁻	mg/l 0.5	
03	Colore		(03)	28	Cloro attivo, come Cl ₂	mg/l 0.2	
04	Odore		(04)	29	Solfuri, come H ₂ S	mg/l 1	
05	Materiali grossolani	Assenti	(05)	30	Solfiti, come SO ₃ ⁻	mg/l 1	
06	Materiali sedimentabili	ml/l 0.5	(06)	31	Solfati, come SO ₄ ⁻	mg/l 1000	(13)
07	Materiali in sospensione totali	mg/l 80	(07)	32	Cloruri, come Cl ⁻	mg/l 1200	(13)
08	BOD ₅	mg/l 40	(08)	33	Fluoruri, come F ⁻	mg/l 6	
09	COD	mg/l 160	(09)	34	Fosforo totale, come P	mg/l 10	(14)
10	Metalli e non metalli tossici totali (As-Cd-Cr(VI)-Cu-Hg-Ni-Pb-Se-Zn)	mg/l 3	(09)	35	Ammoniaca totale, come NH ₄ ⁺	mg/l 15	(15)
11	Alluminio, come Al	mg/l 1	(11)	36	Azoto nitroso, come N	mg/l 0.6	(15)
12	Arsenico, come As	mg/l 0.5	(12)	37	Azoto nitrico, come N	mg/l 20	(15)
13	Bario, come Ba	mg/l 20	(11)	38	Grassi e oli animali e vegetali	mg/l 20	
14	Boro, come B	mg/l 2	(11)	39	Oli minerali	mg/l 5	
15	Cadmio, come Cd	mg/l 0.02	(12)	40	Fenoli tot., come C ₆ H ₅ OH	mg/l 0.5	
16	Cromo III, come Cr	mg/l 2	(11)	41	Aldeidi, come H-CHO	mg/l 1	
17	Cromo IV, come Cr	mg/l 0.2	(12)	42	Solventi organici aromatici	mg/l 0.2	
18	Ferro, come Fe	mg/l 2	(11)	43	Solventi organici azotati	mg/l 0.1	
19	Manganese, come Mn	mg/l 2	(11)	44	Solventi clorurati	mg/l 1	
20	Mercurio, come Hg	mg/l 0.005	(12)	45	Tensioattivi	mg/l 2	
21	Nichel, come Ni	mg/l 2	(12)	46	Pesticidi clorurati	mg/l 0.05	
22	Piombo, come Pb	mg/l 0.2	(12)	47	Pesticidi fosforati	mg/l 0.1	
23	Rame, come Cu	mg/l 0.1	(12)	48	Saggio di tossicità		(16)
24	Selenio, come Se	mg/l 0.03	(12)	49	Coliformi totali	MPN/100 ml: 20000	(17)
25	Stagno, come Sn	mg/l 10	(11)	50	Coliformi fecali	MPN/100 ml: 12000	(17)
				51	Streptococchi fecali	MPN/100 ml: 2000	(17)

Tabella 1 - Limiti di accettabilità delle sostanze inquinanti nelle acque di scarico (Legge n° 319 del 10/5/1976 G.U. n°141 del 29/5/1976)

3.7 - Sedimenti

Si tratta di sostanze chimicamente inerti, le quali, rimanendo sospese nell'acqua, ne provocano l'intorbidamento, con conseguente riduzione della penetrazione della luce in profondità.

La diminuzione della quantità di luce solare riduce la velocità del processo di fotosintesi delle piante e con ciò, si ha una diminuzione della produzione di ossigeno necessario per il normale bilancio vitale del bacino idrico.

Di solito, i sedimenti sono generati dal dilavamento dei terreni poco protetti e dai processi naturali di erosione.

3.8 - Radioattività

Si possono distinguere due tipi di inquinamento radioattivo: un primo tipo, non intenzionale, dovuto al "fallout" prodotto dalle esplosioni nucleari, dalle applicazioni sanitarie, dalle centrali elettronucleari; l'altro proveniente dall'impiego delle radiazioni ionizzanti per la conservazione degli alimenti.

Quest'ultima applicazione non è ancora molto diffusa, tuttavia è da menzionare per le favorevoli prospettive di sviluppo che essa presenta.

3.9 - Calore

Dai grossi impianti industriali, dalle centrali termoelettriche ed elettronucleari vengono emesse ingenti quantità di acqua di raffreddamento o di condensa, acqua che viene restituita all'ambiente originario a temperature molto superiori rispetto a quelle di prelievo.

Tale innalzamento di temperatura determina una grande turbativa nell'ecosistema acquatico, alterando le condizioni di vita e di ambiente della flora e della fauna ittica.

I principali effetti che il calore può provocare sono:

- diminuzione del tenore di ossigeno disciolto nell'acqua
- incremento della velocità delle reazioni chimiche
- superamento, per certe specie di organismi, della temperatura letale
- alterazione dei normali cicli vitali

Il calore è un pericoloso agente inquinante in quanto per certi aspetti può risultare più dannoso di molti inquinanti chimici.

Per questa ragione la legge in atto prevede parametri piuttosto restrittivi per quanto concerne gli scarichi di natura termica.

Per i corsi d'acqua la variazione massima di temperatura ammessa, a monte e a valle del punto di immissione dello scarico, non deve superare i 3°C.

Per il mare, la temperatura dello scarico non deve superare i 35°C e l'incremento di temperatura dell'ambiente recipiente non deve superare i 3°C oltre i 1000 m di distanza dal punto di immissione.

3.10 - Oli minerali

L'inquinamento da olii minerali riguarda tutte le acque, siano esse superficiali o sotterranee, a causa della capillare diffusione degli impianti di distribuzione, dell'elevato numero di depositi e degli impianti di lavorazione dei combustibili liquidi.

Un contributo non indifferente è dato anche da altri settori industriali, come ad esempio quelli metalmeccanici, dove si fa grande uso di lubrificanti e olii da taglio.

L'inquinamento da olii minerali interessa particolarmente l'ambiente marino per i gravi danni connessi con lo sviluppo, su grande scala, dei traffici mondiali dei prodotti petroliferi generalmente chiamati col termine idrocarburi.

Per conoscere l'origine di questi agenti inquinanti, gli inconvenienti che essi provocano e gli accorgimenti tecnici da mettere in atto per limitarne i danni, è necessario acquisire qualche nozione elementare sulle caratteristiche chimiche e fisiche del petrolio grezzo e dei prodotti ottenuti dalla sua lavorazione.

3.11 - Inquinamenti da idrocarburi

Sulle quantità degli idrocarburi che complessivamente vengono immessi nei mari ogni anno, esistono dati considerevolmente discordanti poichè diversi sono i criteri ed i parametri usati per il calcolo, comunque dalle stime più attendibili tale quantitativo dovrebbe ammontare sui 5 milioni di tonnellate all'anno.

Da un primo esame si può dedurre che la maggiore concentrazione di idrocarburi si avrà nelle zone di mare relativamente più vicine alle coste e lungo le principali rotte commerciali, con conseguente distribuzione non omogenea e determinazione di zone a livelli di concentrazione più critici della media.

Sempre in termini di confronto possiamo ritenere, per quanto concerne l'equilibrio dell'ecosistema marino, i versamenti effettuati in mare aperto meno dannosi di quelli effettuati in prossimità delle coste.

Inoltre, indipendentemente dal tipo della fonte inquinante, i danni maggiori sono da attendersi dai prodotti petroliferi più pesanti, cioè quelli che avendo bassa tensione di vapore e quindi scarsa tendenza all'evaporazione vengono chiamati olii persistenti, come ad esempio il petrolio grezzo, gli olii combustibili, i gasoli, i lubrificanti ecc., tutti prodotti nei quali più del 50% distilla a temperature superiori ai 300°C.

3.11.1 - Comportamento in mare degli idrocarburi

Il comportamento in mare degli idrocarburi dipende dalle loro caratteristiche chimiche e fisiche e dalle condizioni meteomarine (temperatura, forza del vento, moto ondoso) esistenti al momento del versamento.

Il petrolio grezzo, i distillati leggeri (virgin nafta, benzine), i lampanti (cheroseni, petroli), i distillati pesanti (gasoli), i distillati sottovuoto (lubrificanti) e i residui della distillazione (oli combustibili), in relazione alla loro diversa tensione di vapore, alla densità ed alla viscosità si comporteranno in modo molto diverso ma tutti daranno luogo ai seguenti fenomeni: diffusione evaporazione, solubilizzazione, emulsione, degradazione microbiologica, interazione con materie sospese.

Al momento in cui il prodotto raggiunge la superficie del mare i fenomeni che prevalgono sono la diffusione e l'evaporazione; l'olio tende a diffondersi formando uno strato più o meno consistente che, nel tempo ed in relazione alle caratteristiche fisiche del prodotto, tenderà a formare un film di aspetto iridescente.

A titolo di esempio, 5 litri di un comune petrolio grezzo può, per diffusione, disperdersi su una superficie di circa 20000 m² di acqua e nel frattempo perdere il 20-30% del suo volume iniziale per evaporazione.

Nella fase della diffusione il fenomeno dell'evaporazione viene accelerato e la quantità di idrocarburi che dal mare passano nell'atmosfera dipenderà dalla natura del prodotto versato, in particolare dalla sua tensione di vapore, dalla temperatura ambiente e dalla forza del vento.

Una parte degli idrocarburi, specie quelli di basso peso molecolare, tenderà invece a passare in soluzione, con conseguente diffusione dei medesimi nella colonna d'acqua sottostante lo spandimento.

Questo fenomeno sarà più o meno intenso in relazione alla salinità del mare e della sua temperatura.

Mano a mano che lo spandimento si appesantisce, per l'insieme dei fenomeni che portano ad una diminuzione dei componenti più leggeri e volatili, il sistema eterogeneo idrocarburi-acqua di mare tende a stabilizzarsi; in questa fase si possono formare delle emulsioni olio-acqua, contenenti anche aria, in funzione delle caratteristiche dell'olio (densità, viscosità, presenza di idrocarburi complessi, asfalti, bitumi, resine) e di quelle del mare (temperatura, salinità, plancton) nonché del suo stato di agitazione.

Viene chiamata emulsione la dispersione di un liquido (fase dispersa) in un secondo liquido immiscibile (fase disperdente o continua).

La stabilità dell'emulsione dipenderà dalla presenza o meno di un componente a funzione emulsionante, cioè un agente che tende ad abbassare le tensioni superficiali delle due fasi.

E' consuetudine classificare le emulsioni in due tipi:

- il tipo olio in acqua (in inglese O/W, oil in water) in cui le sferule di olio sono disperse in acqua;
- il tipo acqua in olio (W/O, water in oil) nel quale le due fasi sono invertite.

Nel primo caso avremo piccole quantità di olio che si disperdono in acqua, formando emulsioni costituite da sferule di olio piccolissime ma fortemente stabilizzate per effetto dell'interazione tra cariche elettriche esistenti sulle superfici di contatto.

Nel secondo caso, quando l'olio è presente in notevoli quantità, si ha il fenomeno inverso con inclusione di sferule di acqua in pellicole di olio; il sistema sarà tanto più stabile quanto più l'olio sarà ricco di idrocarburi complessi, come resine, asfalti, bitumi.

In queste condizioni si formerà una massa galleggiante più o meno densa, più o meno viscosa e consistente (mousse), di colore più o meno bruno (color cioccolato), con volume apparente molto più grande di quello dell'olio versato (v. figura seguente).

Quello che resta del versamento originario, in relazione allo stato del mare e delle correnti, si suddividerà in macchie e grumi di dimensioni sempre più piccole che potranno raggiungere le coste

oppure, appesantendosi per l'assorbimento di sostanze minerali (sabbia) e per effetto di processi ossidanti, tenderanno ad affondare.

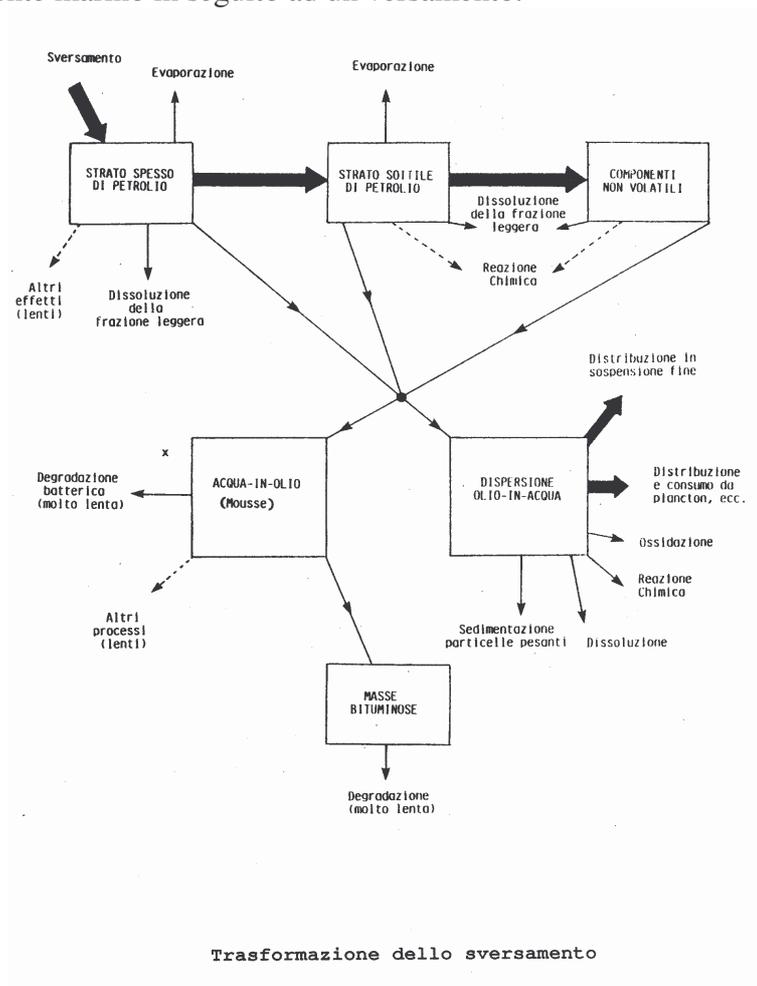
Gli idrocarburi non emulsionabili e quelli che si liberano dalla emulsione sotto forma di minute particelle vengono lentamente degradati mediante processi ossidativi che sono favoriti dalla luce e dall'ossigeno presente nell'acqua di mare (foto-ossidazione); contemporaneamente avviene l'attacco dei microrganismi (degradazione microbiologica) che si trovano nell'ambiente marino.

Questi processi, insieme ad altri molto più complessi, conferiscono al mare quel potere autodepurante da cui dipende la sua sopravvivenza agli inquinamenti.

Nel corso dello spandimento, si avranno anche delle interazioni con le materie solide disperse nell'acqua attraverso meccanismi di adsorbimento, che favoriranno la coalescenza o la dispersione delle particelle oleose favorendone l'affondamento, oppure i processi ossidativi o microbiologici sopra descritti.

Alla fine di tutti questi processi, avremo quello che resta dello spandimento sotto forma di macchia che, nel tempo ed in relazione al vento ed alle correnti, si potrà suddividere in macchie più piccole e poi in grumi i quali potranno raggiungere le coste oppure, se appesantiti dalle sostanze minerali (sabbia, argilla con le quali si sono conglomerati), si depositeranno sul fondo marino.

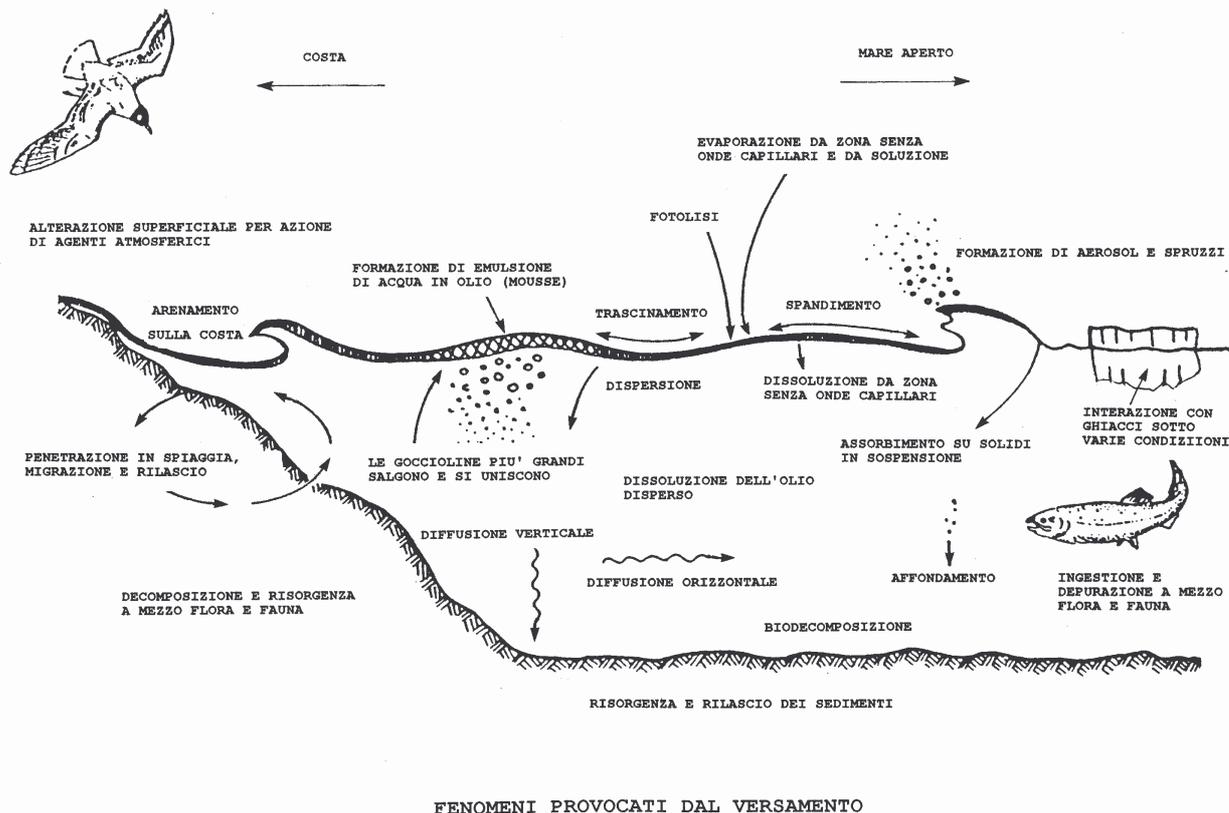
Nella figura seguente sono schematicamente rappresentati i fenomeni sopra descritti che avvengono nell'ambiente marino in seguito ad un versamento.



3.11.2 - Effetti fisici e biologici

In pratica, quando del petrolio grezzo viene versato in mare, uno strato iniziale di alcuni millimetri tende più o meno velocemente ad espandersi, fino a ridursi ad uno strato superficiale dell'ordine di centesimi di micron nel quale, nel frattempo, hanno luogo i fenomeni sopra descritti.

Gli effetti principali che questo tipo di inquinamento può provocare in tempi relativamente brevi sono (vedi figura seguente):



a)- riduzione della trasmissione della luce

Tralasciando il macroscopico effetto schermante di uno strato oleoso superficiale, si deve tenere presente che anche nel caso di dispersioni non visibili a occhio nudo, la riduzione della trasmissione della luce può essere tale da compromettere la fotosintesi della flora marina.

Quando un raggio luminoso attraversa una soluzione, se le particelle disciolte sono sufficientemente piccole, non si verificheranno fenomeni di dispersione poichè le particelle disperse di dimensioni dell'ordine di 5 \AA , non possono disturbare onde della lunghezza di $4000-7000 \text{ \AA}$ come sono quelle della luce visibile.

Quando però le particelle hanno diametro dell'ordine di migliaia di Angstrom, come nel caso delle emulsioni a livello colloidale, il raggio di luce viene disperso o diffratto tanto da apparire visibile lateralmente (effetto Tyndall).

b) - diminuzione dell'ossigeno disciolto

Anche in questo caso è evidente il fenomeno su scala macroscopica, quando cioè siamo in presenza di strati oleosi superficiali che impediscono il naturale scambio di ossigeno tra aria e acqua.

Inoltre, bisogna considerare anche il consumo dell'ossigeno disciolto nell'acqua da parte dei processi ossidativi che avvengono con maggiore intensità quanto più è elevato il grado di dispersione del sistema acqua-olio.

c) - tossicità

Molti idrocarburi, specie quelli di tipo aromatico (benzene, naftalina, fenantrene), presentano una discreta solubilità in acqua, danno luogo a soluzioni acquose di elevata tossicità, in grado di procurare la morte di diverse specie di organismi marini (molluschi, crostacei, larve) e pesci.

d) - danni agli uccelli acquatici

Quando questi uccelli vengono a contatto con l'acqua oleosa, la loro capacità di galleggiamento e di volo viene ridotta poché le piume tendono ad appiccicarsi e ad aderire al corpo.

Si manifesta allora una drastica riduzione del potere isolante del piumaggio ed il volatile, a contatto con l'acqua fredda, muore per assideramento.

Si stimano in 25.000 gli uccelli marini morti nelle acque della Cornovaglia in seguito all'incidente della petroliera Torrey Canyon.

e) - soffocamento

Lungo le coste, nelle zone del bagnasciuga, le macchie ed i grumi oleosi vanno a depositarsi sulle alghe e sui licheni che in breve tempo muoiono.

3.12- Inquinamento del mare

L'inquinamento marino interessa, anche se in diversa misura, tutti i mari poichè in essi vanno a finire direttamente o indirettamente tutti gli scarichi da terra lungo le coste e quelli in mare aperto dalle navi in navigazione.

Nel suo stato naturale il mare è la soluzione salina più abbondante della terra; oceani e mari interni coprono un'area totale di 362 milioni di Km² cioè il 71% del superficie terrestre.

La salinità dei vari mari, cioè la concentrazione totale dei sali disciolti, espressa in g/l, non è uguale ma varia in funzione della portata dei fiumi che vi sboccano, del tipo di costa, dell'intensità di evaporazione, ecc.; la salinità media è di 35 g/l.

A parte i costituenti fondamentali (idrogeno e ossigeno) ed i cloruri di sodio e di magnesio, nella composizione dell'acqua di mare sono presenti, in quantità variabile da tracce ad alcune centinaia di p.p.m., la maggior parte degli elementi chimici od allo stato naturale o come composti.

Variazioni anche limitate delle caratteristiche chimiche e fisiche dell'acqua di mare possono determinare alterazioni profonde ed irreversibili sulle proprietà biologiche della flora e della fauna marina.

D'altra parte, i livelli di concentrazione delle sostanze che possono causare una degradazione dell'ambiente marino sono connessi essenzialmente con il tipo e la natura delle sostanze stesse e con il potere autodepurante dell'ambiente interessato.

A questo riguardo, ha notevole importanza la conoscenza del grado di degradabilità della sostanza accidentalmente o volutamente scaricata in mare, sia per programmare i provvedimenti da prendere a monte dello scarico (tipo di trattamento degli effluenti, regolamentazione dei processi di fabbricazione dei prodotti notoriamente pericolosi), sia per la scelta e la messa a punto dei prodotti e delle tecniche operative in grado di neutralizzare o circoscrivere l'inquinamento una volta verificatosi come, per esempio, viene fatto per eliminare le chiazze oleose.

Inoltre si deve valutare, con la migliore approssimazione possibile, la gravità e la portata di un inquinamento in relazione all'area che può essere o è già stata interessata (mare aperto, bacino chiuso, litorale) tenendo conto delle correnti, dei venti e delle maree che possono portare l'agente inquinante in zone marine anche molto lontane dal luogo dove si è verificato o potrebbe verificarsi l'evento.

Le origini dell'inquinamento dell'ambiente marino si possono ricondurre a due fonti principali:

- versamenti da terra lungo le coste, da parte delle varie attività umane
- versamenti in mare aperto, da parte del naviglio in navigazione

Noi ci occuperemo in particolare di questi ultimi.

3.13 - Tecniche di prevenzione per le navi cisterna

Con l'entrata in vigore della MARPOL 73/78 tutti gli stati aderenti all'IMO (Intergovernment Maritime Organization) si sono impegnati ad adottare, sia sulle navi in servizio sia su quelle di nuova costruzione, dei sistemi per ridurre i quantitativi dei residui oleosi che possono essere immessi nel mare nel corso dei vari cicli operativi della nave cisterna.

I principali sistemi proposti si possono raggruppare in tre categorie:

- a) separazione acqua-olio
- b) segregazione della zavorra
- c) lavaggio delle cisterne senza l'impiego di acqua

A questi tre sistemi si deve poi aggiungere quello più drastico, ma certamente anche più costoso, che fa obbligo ai gestori dei terminali di imbarco e sbarco ed ai cantieri di riparazione di costruire impianti idonei per il ricevimento ed il trattamento delle acque di zavorra.

- a) Il primo sistema consiste nel trasferire l'acqua miscelata con i residui oleosi in apposite cisterne (slop tanks) oppure in cisterne del carico destinate alla raccolta di questi residui. Per decantazione naturale, oppure facendo ricorso a sostanze demulsionanti, l'acqua si separa dall'olio raccogliendosi sul fondo delle cisterne dalle quali, mano a mano, viene pompata fuoribordo. L'operazione si ripete, nelle cisterne in cui la zavorra è stata imbarcata, sui residui del carico trasportato, avendo cura di sospendere l'operazione di pompaggio fuoribordo appena si giunge all'interfaccia acqua-olio; a questo punto, la miscela oleosa viene trasferita nella cisterna destinata alla raccolta degli slops dove continua il processo decantazione-separazione-pompaggio a mare dell'acqua depurata. Quando gli slops raccolti nelle cisterne adibite al carico non possono essere sbarcati ai terminali per mancanza di adatte attrezzature, il carico successivo può essere imbarcato su di essi; da qui il termine "load on top" (carico al di sopra). L'efficacia di questo sistema dipende da molti parametri: l'installazione a bordo di

analizzatori automatici per il dosaggio del contenuto di idrocarburi presenti nell'acqua in corso di scarica fuoribordo, durata del viaggio, condizioni meteomarine e tipo di greggio. Per il versamento in mare si dovranno rispettare le regole della MARPOL 73/78.

- b) Il secondo sistema consiste nel destinare permanentemente a zavorra una parte del volume disponibile della nave installandovi, come prescritto dalle regole MARPOL 73/78, pompe e collettori del tutto separati da quelli del carico. E' evidente che con questo sistema viene del tutto eliminata una delle più gravi cause di inquinamento di tipo operativo, ma risulta molto più oneroso dal punto di vista economico.
- c) Il lavaggio delle cisterne senza impiegare acqua per asportare la maggior parte dei residui impompabili è stato reso possibile dai notevoli progressi fatti nel settore della sicurezza della nave, in particolare con l'introduzione della tecnologia della inertizzazione. In pratica, qualsiasi nave cisterna adibita al trasporto di prodotti inquinanti e nello stesso tempo infiammabili può utilizzare questa tecnica, una volta installato a bordo un idoneo impianto generatore di gas inerte.

3.14- Impianti impiegati sulle navi militari

Le norme applicabili a tutte le navi, e quindi per estensione anche alle navi militari, sono riportate di seguito:

- a) le navi con stazza lorda $400 < S_L < 10.000$ ton dovranno essere dotate di "*impianto di separazione*" di acque oleose in grado di separare a meno di **100 ppm** oppure un "*impianto di filtrazione*" di acque oleose in grado di filtrare a meno di 100 ppm;
- b) le navi di $S_L > 10.000$ ton e le navi che portano grandi quantitativi di combustibile dovranno essere dotate di uno dei due impianti specificati in a) per navi di $400 < S_L < 10.000$ ton ed in più di una "*apparecchiatura di segnalazione e controllo*" del contenuto oleoso dell'acqua espulsa oppure un "*impianto di separazione di acque oleose*" in grado di separare a meno di 100 ppm e di un "*impianto di filtrazione*" di acque oleose in grado di filtrare a meno di **15 ppm**, munito di allarme che segnali quando tale valore non può essere mantenuto;
- c) le navi di $S_L < 400$ ton devono corrispondere totalmente alle prescrizioni suddette per $400 < S_L < 10.000$ ton, oppure essere dotate, per quanto ragionevole e praticabile, di sistemazioni per la "*conservazione totale a bordo*" delle acque oleose così da consentirne la scarica ad impianti di ricezione a terra.

Tutte le navi dovranno essere dotate di collegamenti unificati per la scarica a terra di residui oleosi o acque oleose che non possono essere scaricati in mare e le navi di $S_L > 400$ ton dovranno avere a bordo apposite casse di deposito per tali residui.

CAP.4 -TRATTAMENTO ACQUE OLEOSE E RELATIVI IMPIANTI

4.1 - Metodi di separazione dell'olio dall'acqua

Il petrolio e molti altri prodotti da esso derivati sono praticamente insolubili nell'acqua e tendono a formare con essa dispersioni ed emulsioni, cioè miscele eterogenee.

Tale formazione è associata ad un incremento di energia del sistema che, se non attentamente controllato può rendere estremamente difficile la successiva riseparazione.

Le dispersioni sono miscele termodinamicamente instabili, per cui tendono a ridurre la propria energia libera, riducendo la superficie all'interfaccia fra le due fasi mediante coalescenza delle gocce; tale coalescenza, in concomitanza con l'azione della gravità su componenti di diversa densità, fa sì che, man mano che le gocce d'olio più leggere crescono, aumenti la spinta idrostatica sulle gocce stesse le quali quindi tendono ad addensarsi in alto in modo che alla fine del processo si formano due strati distinti costituiti da due fasi continue.

Le emulsioni per contro sono sistemi quasi stabili, che si formano sotto l'azione di forti sollecitazioni meccaniche come le vibrazioni o moti turbolenti, ad esempio quando una miscela acqua-olio attraversa una pompa centrifuga, o durante le operazioni di lavaggio delle cisterne con getti ad alta pressione, od in presenza di un terzo componente detto agente emulsionante, presente di solito a bassa concentrazione, che si adsorbe sulle gocce d'olio e ne impedisce la coalescenza.

In tal modo si forma un sistema in cui le gocce d'olio hanno dimensioni ridottissime e pertanto non possono separarsi per gravità, in quanto il loro movimento è ostacolato dai movimenti Browniani, dando luogo a sospensioni permanenti che si separano solo dopo lungo tempo o mediante processi speciali.

I metodi più frequentemente usati per separare le miscele acqua-olio sono:

- la sedimentazione per gravità
- la coalescenza su superfici di varia specie
- la filtrazione

talvolta in combinazione tra di loro.

a) sedimentazione per gravità

E' la tecnica più semplice e di più largo impiego, in quanto non richiede apparecchiature sofisticate, seppure abbia dei limiti dal punto di vista dell'efficienza, non potendo scendere al di sotto di alcune decine di p.p.m. d'olio.

La velocità con cui le goccioline di olio si muovono verso l'alto attraverso l'acqua è data dalla legge di Stokes per regimi di flusso laminari, cioè per goccioline piccole, con numero di Reynolds inferiore a due.

Per gocce di dimensioni maggiori, la velocità è ridotta rispetto a quella prevista dalla legge di Stokes a causa della turbolenza, con numeri di Reynolds compresi fra 500 e 1000, per cui si può ritenere valida la legge di Newton.

In pratica per la maggior parte dei casi vale una legge intermedia, in quanto anche nella separazione per gravità interviene in parte nel processo la separazione per coalescenza.

Si riportano a titolo esemplificativo le espressioni matematiche delle leggi succitate:

$$R_e = 0 \div 2 \quad u = \frac{g(D_s - D)d^2}{18\eta}$$

$$R_e = 500 \div 200.000 \quad u = 1,74 \sqrt{\frac{g(D_s - D)d}{D}}$$

$$R_e = 2 \div 500 \quad u = \frac{0,153g^{0,71}(D_s - D)^{0,71}d^{1,14}}{D^{0,29}\eta^{0,43}}$$

dove:

u = velocità assoluta della goccia (m/s)

d = diametro della goccia (m)

η = viscosità assoluta della miscela (N·s/m)

D_s = densità dell'olio (Kg/m³)

D = densità dell'acqua (Kg/m³)

Nel processo di separazione per gravità, le gocce della miscela acqua/olio, entrando nel separatore, tendono a salire verso l'alto con una velocità, ricavabile dalle formule suddette, che dipende sostanzialmente dal suo diametro: va notato che tale velocità peraltro non è costante poiché le gocce nella risalita si urtano ed unendosi variano il proprio diametro aumentando la velocità.

In prossimità della superficie, aumentando la concentrazione d'olio aumenta la probabilità di urto fra le gocce, le gocce subiscono un rallentamento a causa della diminuzione della spinta idrostatica, e pertanto si forma una zona dove prevalgono i fenomeni di coalescenza.

b) Separazione per coalescenza

La coalescenza è un fenomeno che sfrutta la tensione superficiale di un fluido e si manifesta attraverso diverse fasi: in un primo momento la goccia d'olio arriva all'interfaccia con un'altra goccia o anche con la massa della fase olio già separata in superficie, restandone però separata da un sottile strato d'acqua.

Prima che la coalescenza possa verificarsi, tale strato deve spostarsi, diventare instabile e quindi rompersi, vincendo le forze di coesione in un tempo che può variare da alcuni secondi ad alcuni minuti, mentre il trasferimento vero e proprio entro la massa della fase olio, dopo la rottura dello strato d'acqua richiede soltanto alcune frazioni di secondo.

Questo tempo di passaggio dalla miscela alla fase olio è funzione sia della viscosità dell'acqua che della differenza di densità fra acqua ed olio, pertanto la velocità di trasferimento è tanto maggiore quanto più alta è la temperatura.

Come precedentemente accennato, la separazione per gravità non riesce a separare gocce molto piccole, con diametro inferiore a 1,5 mm, in quanto la sedimentazione è interferita dai moti Browniani, per cui le gocce molto fini non riescono a raggiungere l'interfaccia dell'olio cioè la zona di coalescenza.

In tal caso si può sfruttare la coalescenza cercando di estendere la zona in cui il fenomeno si manifesta a tutto il separatore: tale processo si attua mediante piastre parallele, letti granulari o fibrosi, che ostacolano il cammino delle gocce, ne favoriscono gli urti e quindi ne accentuano la coalescenza.

Le gocce passando attraverso un letto costituito da granelli o fibre di materiale idoneo, possono aderire alle superfici del letto stesso per urto, se le forze di legame sono maggiori delle forze di attrito viscoso agenti su di esse e tendenti ad asportarle dal letto.

La coalescenza può aver luogo quando altre gocce, con urti successivi, vanno ad unirsi alle gocce aderenti al letto, costituendo gocce di dimensioni sempre maggiori.

L'attrito viscoso, con l'aumentare delle dimensioni delle gocce, tende ad aumentare progressivamente fino a quando, divenuto preponderante rispetto alle forze di adesione, fa sì che le gocce risultanti vengono staccate dal letto e tornano a fluire attraverso il letto, essendo però a questo punto di dimensioni maggiori e quindi essendo suscettibili di separazione per gravità.

E' importante notare che le gocce che aderiscono al letto non ne devono bagnare la superficie e pertanto la bagnabilità del letto da parte dell'olio diventa irrilevante nella separazione per coalescenza.

Anzi, la bagnabilità del letto che è importante nei processi di filtrazione, risulta generalmente nociva al processo di coalescenza in quanto ne consegue una sovrasaturazione con conseguente blocco del letto stesso ed efflusso di olio.

c) separazione per filtrazione

La filtrazione è generalmente impiegata nel caso di sospensioni costituite da particelle solide da separare da un liquido, tuttavia, essa può essere anche utilizzata nel caso delle dispersioni di olio in acqua in quanto, avendo l'olio una certa viscosità, rimane ugualmente catturato dal filtro come se le sue particelle fossero solide.

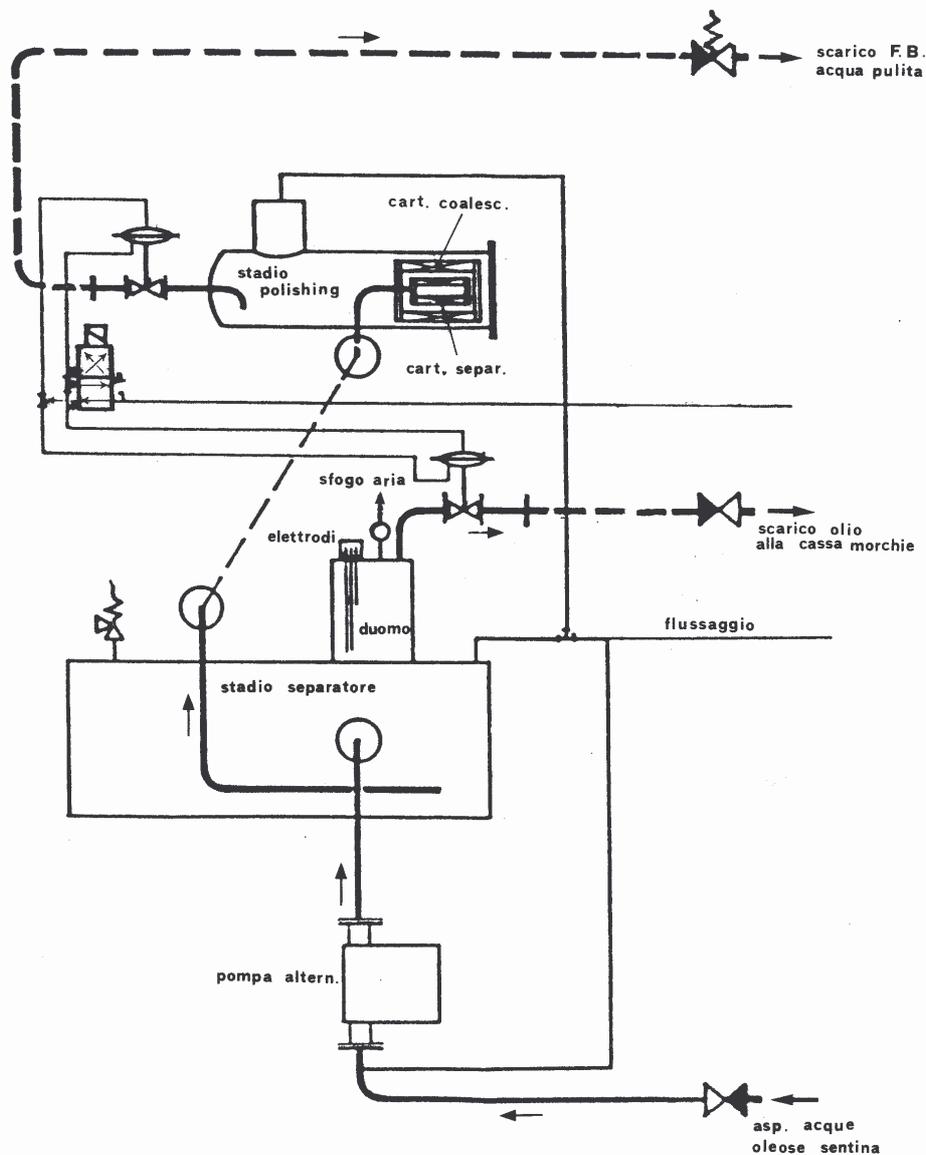
Anche questo processo però presenta limiti di efficienza in quanto l'efficacia è praticamente nulla nei confronti di particelle molto fini o di miscele molto emulsionate ed è notevolmente ridotta dalla presenza di particelle solide sospese (sabbia, ruggine, morchie ecc.).

E' evidente che tanto più grandi sono le gocce d'olio, tanto maggiore è l'efficienza della filtrazione, pertanto questo processo può essere impiegato in combinazione con altri processi, quali la flocculazione/flottazione o la coalescenza, con cui si aumentano le dimensioni medie delle particelle da separare.

I letti granulari a coalescenza descritti sopra in **b)** del resto sfruttano anche parzialmente la separazione per filtrazione, soprattutto nella zona di ingresso della miscela.

4.2 - Impianto FRAM OP10 (Unita' Classe "Maestrale")

L'impianto separatore delle acque oleose di sentina per le Unità classe Maestrale è così realizzato (vedi lo schema della figura seguente).



Separatore di sentina FRAM OP10 - Schema di flusso

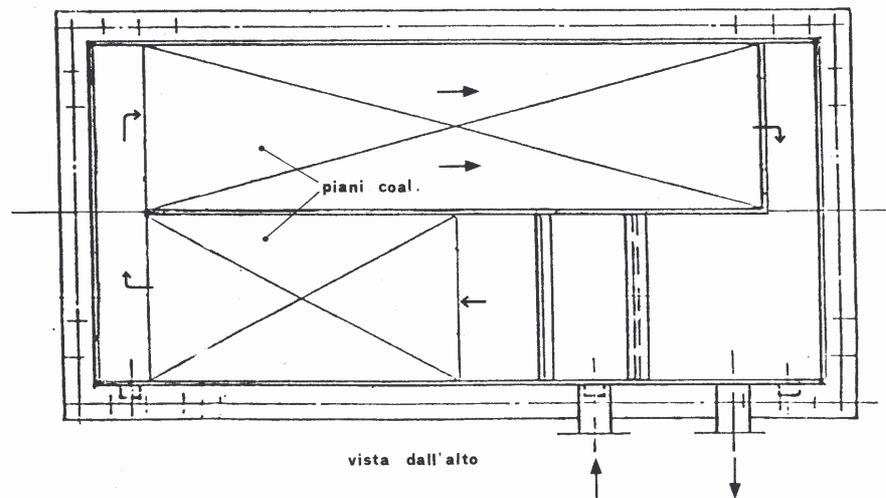
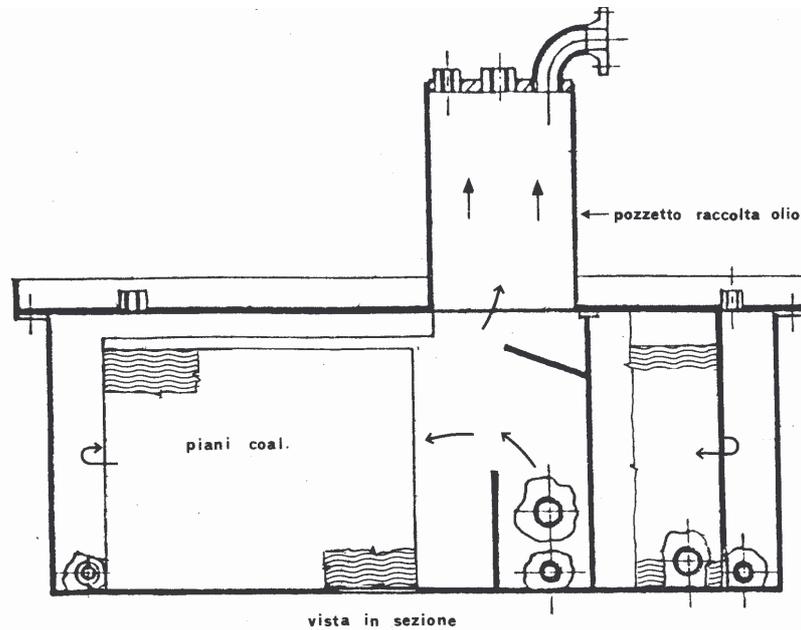
Separatore a piani coalescenti

La pompa volumetrica alternativa preleva la miscela acqua-olio dalla sentina e la trasferisce nel corpo orizzontale del separatore a piani coalescenti.

Essa ruota ad una velocità di 300 giri/min per evitare di emulsionare la miscela acqua-olio.

Il separatore a piani coalescenti contiene nel suo interno camere di forma rettangolare, separate da un setto verticale mediano che arriva quasi all'altezza del coperchio.

Entro queste camere sono disposti i piani coalescenti (vedi la figura seguente).



Separatore di sentina FRAM OP10 - Stadio separatore

Un altro setto verticale, perpendicolare al precedente, che fa tenuta con il coperchio, tiene separate tra loro le zone di ingresso e di uscita del separatore.

La corrente di acqua oleosa spinta dalla pompa entra nel separatore e viene rivolta verso il basso dal troncone di tubo appositamente predisposto.

A questo punto l'acqua rallenta il suo moto, a causa del maggior volume disponibile della camera di ingresso rispetto a quello del tubo, e si dirige verso l'alto per poter superare l'ostacolo rappresentato da un setto trasversale poco più alto di 200 mm, posto tra il tubo di ingresso ed i piani coalescenti.

In questo tragitto si separano le particelle d'olio più grossolane a causa del movimento verso l'alto e della decelerazione del moto.

L'olio così separato viene convogliato direttamente nel duomo di raccolta, posto sopra alla camera di ingresso della miscela.

A questo punto l'acqua, contenente solamente le goccioline di olio più minute, entra nei piani coalescenti.

La forma stessa dei piani tende ad uniformare il flusso riducendo la turbolenza ad un valore molto basso (numero di Reynolds da 60 a 100).

All'interno dei pacchi lamellari tutte le particelle d'olio di diametro maggiore o uguale a 20 micron aderiscono per gravità al materiale oleofilo dei piani.

Inoltre, a causa delle variazioni di velocità della corrente, dovute al percorso di forma quasi sinusoidale, le goccioline d'olio di diametro inferiore a 20 micron si riuniscono idrodinamicamente, per collisioni multiple, in particelle di diametro superiore e si separano per gravità venendo catturate dai piani oleofili.

L'olio raccolto dai piani gocciola poi verso l'alto attraverso i pacchi lamellari fino alla superficie e di qui al duomo di raccolta.

L'acqua parzialmente trattata procede quindi, per subire il trattamento finale, attraverso il secondo stadio di coalescenza.

Secondo stadio coalescente-polishing

Il separatore a coalescenza-polishing, che rappresenta il secondo stadio, è costituito da un cilindro ad asse orizzontale munito di duomo per raccolta olio e le relative connessioni di alimentazione e scarico acqua e scarico olio.

Nel suo interno sono installate due cartucce: la prima all'interno è di tipo FRAM FELT a grande superficie; la seconda, concentrica alla prima, è una cartuccia coalescente avente lo scopo di unire le piccole particelle di olio e separarle dal flusso di acqua.

L'acqua parzialmente trattata proveniente dal separatore primo stadio, ha già subito una notevole separazione che viene ulteriormente aumentata dal trattamento del secondo stadio, fino ad ottenere in uscita un effluente contenente un massimo di 15 p.p.m.

L'olio che viene a depositarsi nel duomo viene, tramite la linea di recupero, riportato all'aspirazione della pompa.

Sistema automatico di scarico dell'olio

Il separatore provvede a scaricare automaticamente l'olio raccolto nel duomo, su comando fornito da un apposito sistema costituito da:

- sonda a tre elettrodi resistivi posta sulla sommità del duomo
- regolatore elettronico per controllo di livello
- elettrovalvola a solenoide a 4 vie, per comando valvole a farfalla

- operatore pneumatico con lo scopo di commutare l'apertura o la chiusura della valvola a farfalla.

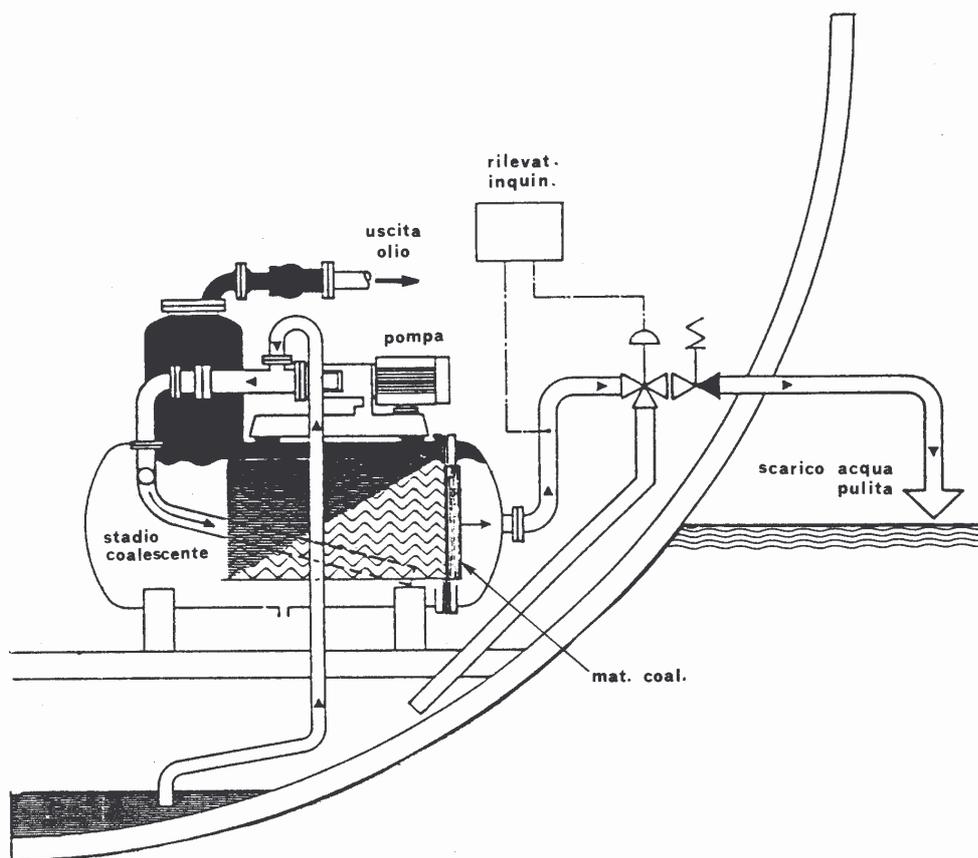
Procedure di funzionamento

La funzione del sistema di controllo di livello è quella di rilevare, tramite la sonda ad elettrodi, la quantità massima di olio raccolta nel duomo e dare il consenso all'elettrovalvola di comandare l'apertura della valvola di scarico dell'olio e la chiusura temporanea della valvola di scarico dell'acqua, consentendo all'olio di essere pompato fuori dal separatore.

Allorché la quantità di olio ritorna al valore minimo, si ha la chiusura della valvola scarico olio e la simultanea apertura della valvola di scarico acqua.

4.3 - Impianto FRAM CPS-5B MK II (Unità Classe "Minerva")

Simile al precedente è l'impianto in dotazione alle Unità classe Minerva tipo FRAM CPS-5B MK-II sotto descritto (nella figura seguente lo schema di flusso).



Impianto FRAM CPS-5B - Schema di flusso

Separatore a piani coalescenti

Una pompa trasferisce le acque aspirate dalla sentina al separatore a piani coalescenti.

Il separatore contiene internamente uno scomparto rettangolare nel quale sono alloggiati i piani coalescenti.

Il fluido in trasferimento, aspirato dalla pompa, entra nel tubo di entrata del separatore dividendosi in due tronconi nelle due camere laterali allo scomparto rettangolare contenente i piani oleofili.

La flangia di separazione posta al fondo dello scomparto, divide la sezione di entrata e trattamento acque (A), dalla sezione di uscita acque trattate (B).

Alle acque, che fuoriescono dai due tronconi del tubo d'entrata, viene impresso un moto ascensionale in quanto detti tronconi volgono le bocche di uscita verso la parte bassa del separatore ed unitamente alla decelerazione del flusso le particelle di olio più grossolane si separano.

Per evitare inoltre che le acque possano by-passare il pacco coalescente, lo scomparto rettangolare che lo contiene, è dotato di guarnizioni fissate all'esterno dello stesso sulla parte alta delle pareti laterali; dette guarnizioni aderiscono perfettamente alle pareti interne del separatore facendo così tenuta ed impedendo alla miscela oleosa di superare i piani coalescenti senza passarvi attraverso.

Nel corso di tale fase, a causa di quanto sopra esposto, viene inoltre favorita la decantazione delle eventuali impurità solide sul fondo del serbatoio.

L'olio separato viene quindi convogliato direttamente nella zona di raccolta, mentre la miscela oleosa deve compiere una seconda conversione di moto di 180 gradi, con rotazione dal basso verso l'alto dovuta al moto ascensionale impressogli.

Le acque contengono ora solo una piccola percentuale di olio, consistente in piccole particelle (goccioline in sospensione), ed entrano nei piani coalescenti.

La sagoma sinusoidale dei piani tende ad uniformare il flusso riducendo così la turbolenza ad un valore molto basso (numero di Reynolds 60-100).

All'interno dei piani coalescenti tutte le particelle d'olio di diametro maggiore ed uguale a 20 micron, aderiscono per gravità al materiale oleofilo dei piani.

Inoltre a causa delle variazioni di velocità del flusso, dovute al percorso di forma sinusoidale, le goccioline di olio si uniscono le una alle altre idrodinamicamente per collisioni multiple, in particelle di diametro superiore a 20 micron e si separano quindi per gravità venendo così catturate dai piani oleofili.

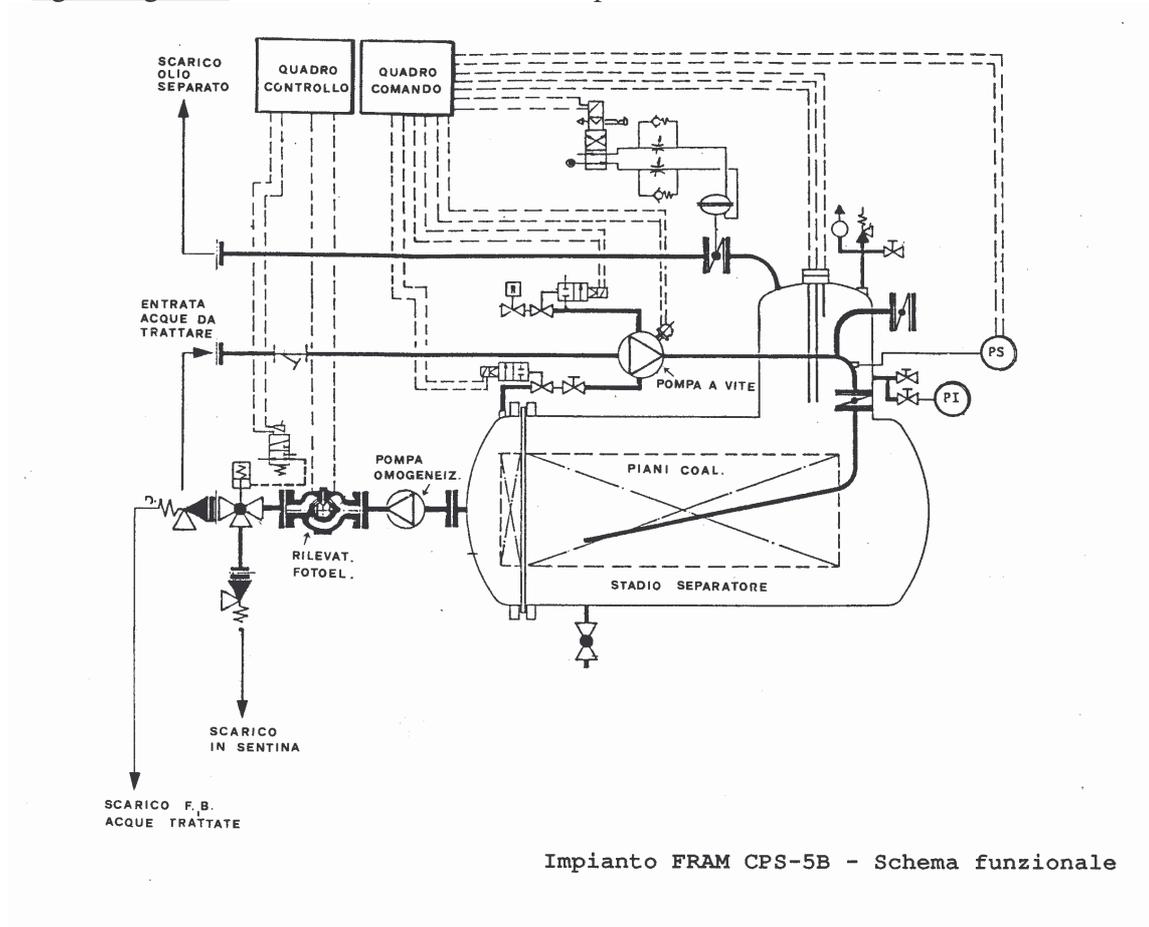
L'olio raccolto nei piani, gocciola verso l'alto attraverso gli stessi, fino alla superficie dove viene raccolto e trasferito al duomo di raccolta.

L'acqua in uscita dai piani attraversa un materassino coalescente (PAD), che effettua una ulteriore separazione portando il valore de contenuto di olio a meno di 15 p.p.m..

Il materassino coalescente è costituito da un telaio di supporto (griglia) che contiene l'elemento filtrante vero e proprio, costituito da un tessuto che ha la proprietà di coalescere le particelle di olio residue, consentendo lo scarico fuoribordo in acque internazionali, incluse le aree speciali, delle acque di sentina.

Il separatore provvede inoltre allo scarico dell'olio accumulato nel duomo tramite sistema automatico.

Nella figura seguente lo schema funzionale del separatore.



Sistema automatico di controllo di livello e scarico olio

Il separatore provvede a scaricare automaticamente l'olio raccolto nel duomo, su comando fornito da un apposito sistema di controllo costituito da:

- sonda a tre elettrodi resistivi posta sulla sommità del duomo
- regolatore elettronico per controllo di livello
- elettrovalvola a solenoide a 4 vie, comando valvola a farfalla.
- operatore pneumatico con lo scopo di commutare l'apertura o la chiusura della valvola a farfalla.

Procedure di funzionamento

La funzione del sistema di controllo di livello è quella di rilevare, tramite la sonda ad elettrodi, la quantità massima d'olio raccolta nel duomo e dare consenso, tramite l'elettrovalvola, all'apertura della valvola di scarico dell'olio, consentendo a questo di essere espulso dal separatore.

Quando la quantità di olio ritorna al valore minimo, si avrà nuovamente la chiusura della valvola scarico olio.

Rilevatore di inquinamenti e torbidità - schema di flusso

L'impianto in oggetto è dotato di un dispositivo di allarme di inquinamento che è posto all'uscita del separatore con lo scopo di segnalare la quantità di olio di scarico fuoribordo.

Infatti, in caso di un effluente con più di 15 p.p.m. di idrocarburo, l'oleometro andrebbe in "Allarme", dando il consenso alla valvola a tre vie di posizionarsi sul ricircolo in sentina sino al ripristinarsi del corretto valore dell'effluente.

CAP.5 - TRATTAMENTO ACQUE BIOLOGICHE E RELATIVI IMPIANTI

5.1 - Impianti di depurazione chimica dei liquami di bordo

L'inquinamento marino provocato dallo scarico dei liquami di bordo si evidenzia con effetti negativi e cioè:

- pericolo per la salute pubblica
- riduzione dell'ossigeno disciolto nell'acqua

Durante la permanenza nei porti o la navigazione in acque costiere, lo scarico a mare del liquame non trattato è del tutto inaccettabile specie per la salute pubblica.

E' infatti noto come la sopravvivenza in acqua di mare dei coliformi e degli altri batteri costituenti la flora gastroenterica animale è dell'ordine di 1-3 ore (riduzione del 90%); purtroppo i virus patogeni hanno una resistenza molto maggiore e tempi di scomparsa di 2-3 giorni.

Gli impianti di trattamento dei liquami da installarsi a bordo delle navi si dividono in:

- impianti senza effluente
- impianti con effluente

Al primo tipo appartengono i seguenti impianti:

- cassa di raccolta;
- incenerimento totale;
- riciclo del liquido.

Alla seconda categoria appartengono i seguenti tipi di impianti:

- macerazione/clorazione;
- trattamento biologico;
- trattamenti chimico-fisico.

La scelta del tipo di impianto dipende dai seguenti fattori:

- disponibilità di spazio per la sua sistemazione;
- accesso al locale destinato a ricevere l'impianto;
- esistenza o possibilità di realizzare la separazione tra la tubolatura delle acque nere da quella delle acque grigie;
- funzionamento automatico senza necessità di impiego di personale qualificato;
- norme di accettabilità imposte per l'effluente;
- frequenza con cui bisogna estrarre ed eliminare i fanghi o rifornirsi di prodotti chimici necessari per l'impianto;
- consumo di energia richiesta per il funzionamento;
- costi di acquisto, di installazione e di esercizio.

La Marina Militare Italiana, in adesione dei principi dell'IMCO 73, ha esaminato le varie tecnologie di depurazione delle acque nere e grigie da applicare sul naviglio militare.

Ha scartato le soluzioni di maggiore costo e di più complessa gestione ed ha scelto il trattamento meccanico fisico (macerazione+clorazione).

Tale trattamento, semplice e poco ingombrante, è mirato soprattutto ad eliminare la pericolosità del liquame grazie alla energica azione battericida del cloro; una adeguata triturazione dei solidi presenti nel liquame, consente una migliore efficacia dell'azione del cloro.

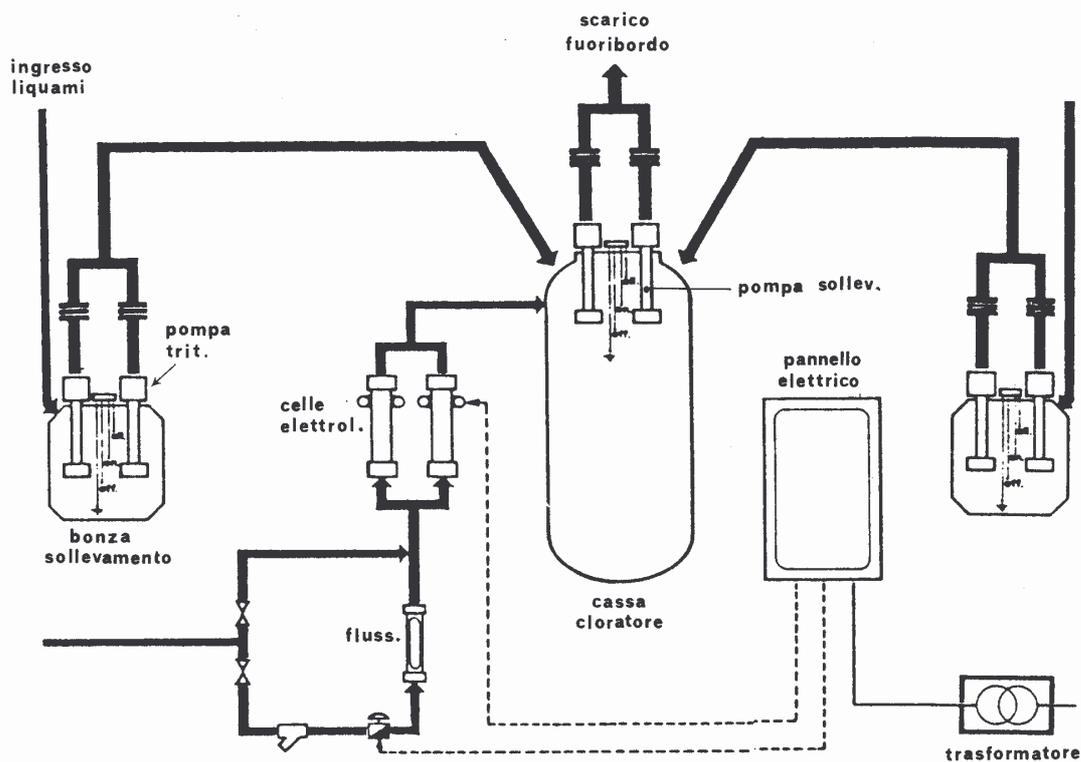
L'impianto di macerazione/clorazione convenzionale prevede l'invio del liquame grezzo in un contenitore provvisto di pompa tritratrice.

Al liquame viene aggiunta, sotto buona agitazione, una soluzione di ipoclorito di sodio commerciale (12%) prelevata con una pompa dosatrice da un apposito serbatoio.

L'impianto fornisce buoni risultati ma richiede una serie di misure di sicurezza in relazione allo stoccaggio ed alla manipolazione della soluzione di ipoclorito, nonché una attenta manutenzione della pompa dosaggio.

5.2 - Impianto ARTECO (Unita' Classe "Lerici")

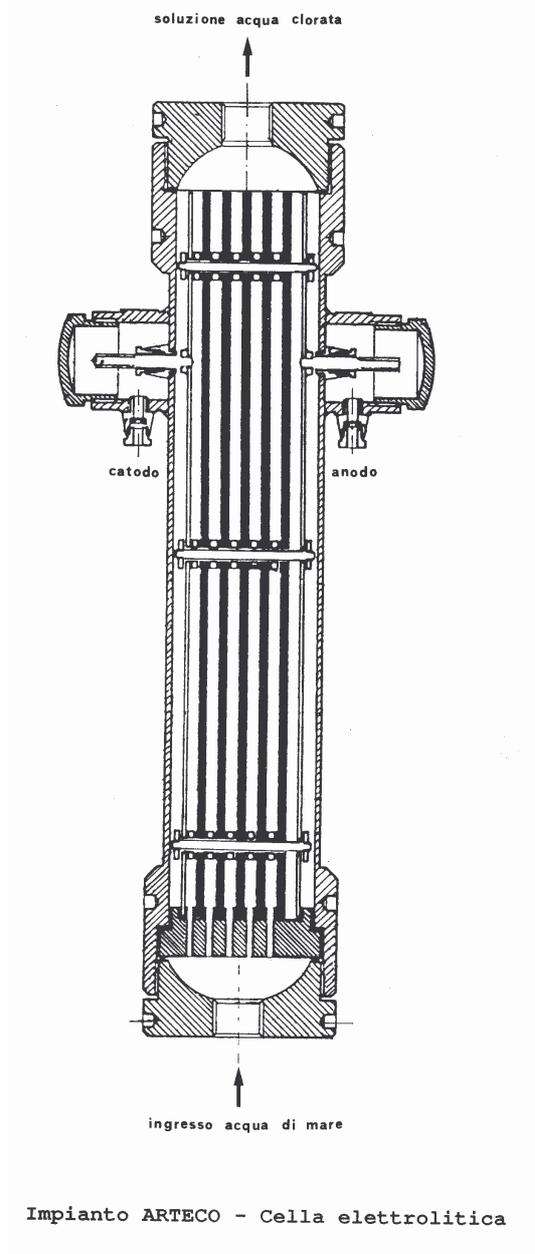
L'impianto Arteco (vedi figura seguente) utilizza un sistema di trasferimento dei liquami delle casse di raccolta al cloratore, effettuato con pompe tritratrici che evitano i caratteristici intasamenti delle tubolature e consentono una riduzione dei volumi del gruppo clorazione.



Impianto ARTECO - Schema funzionale

Il gruppo clorazione non utilizza il sistema serbatoio-pompa di dosaggio ipoclorito, bensì produce cloro elettrolitico da acqua di mare al momento del suo utilizzo.

E' composto da una cella elettrolitica (vedi figura seguente) e una elettrovalvola di immissione di acqua di mare, attivate in parallelo, con la pompa di scarico fuoribordo.



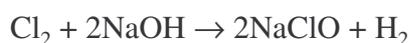
L'impianto, per le sue ridotte dimensioni ed elevata efficienza, sia del sistema di triturazione sia della clorazione, è particolarmente adatto per piccole-medie imbarcazioni ed è stato installato sui cacciamine Classe Lerici della M.M.I..

Principio del processo di clorazione

Il processo di clorazione utilizza esclusivamente acqua di mare e corrente elettrica ed è pertanto raccomandato esclusivamente per navi operanti in mare.

Facendo passare acqua di mare tra due elettrodi si ha idrolisi dei sali con sviluppo di cloro all'anodo e formazioni di idrogeno e idrossidi al catodo.

Il cloro reagisce immediatamente con l'idrossido formatosi dando luogo alla formazione di ipocloriti secondo la reazione:



L'ipoclorito formatosi è un ossidante energico di tutte le sostanze organiche e riducenti ed uno sterilizzante efficace della flora batterica presente.

I cattivi odori dovuti a composti volatili prodotti dalla decomposizione anaerobica delle sostanze organiche dei liquidi, sono immediatamente eliminati dall'ipoclorito.

L'idrogeno solforato, una delle cause principali degli odori sgradevoli e di corrosioni sulle condotte, viene ossidato a innocuo solfato.

Analogamente l'ipoclorito distrugge altri prodotti maleodoranti e in genere velenosi come le fosfine, derivati ammoniacali, cianuri ecc. che vengono trasformati nei loro derivati ossidati (nitriti, fosfati, carbonati) assolutamente innocui.

L'abbattimento del BOD dei liquami viene effettuato dall'ipoclorito per ossidazione delle sostanze organiche con formazione di sostanze insolubili ed inerti.

Al pH pressochè neutro dei liquami, un trattamento con ipoclorito (15 minuti tempo di contatto, 0,5 mg/l di cloro residuo), consente l'abbattimento dei coliformi da circa 1 milione a qualche centinaio per 100 ml.

Processo di macerazione

La macerazione dei corpi grossolani non metallici presenti nei liquami viene effettuata da pompe maceratrici installate sulle bonze di raccolta.

Le pompe utilizzate sono provviste di un dispositivo sulla aspirazione, atto a tagliare e lacerare piccoli pezzi di cartone, stracci, plastica, legno, ossa ecc..

Il dispositivo è composto da una robusta girante bicanale a rilievo dentato, ruotante su una bocca di aspirazione anch'essa con rilievo dentato.

La girante si mantiene sempre pulita dai materiali filamentosi che, sminuzzati, vengono eliminati dal flusso in uscita.

Si previene in tal modo l'intasamento dovuto agli agglomerati filamentosi che normalmente avvolgono e intasano le pompe.

La riserva di energia cinetica della girante è sfruttata per vincere la resistenza provocata dal taglio e dilacerazione dei materiali grossolani.

La riserva di potenza del motore deve essere sufficiente per vincere la resistenza dei corpi estranei normalmente presenti nei liquami.

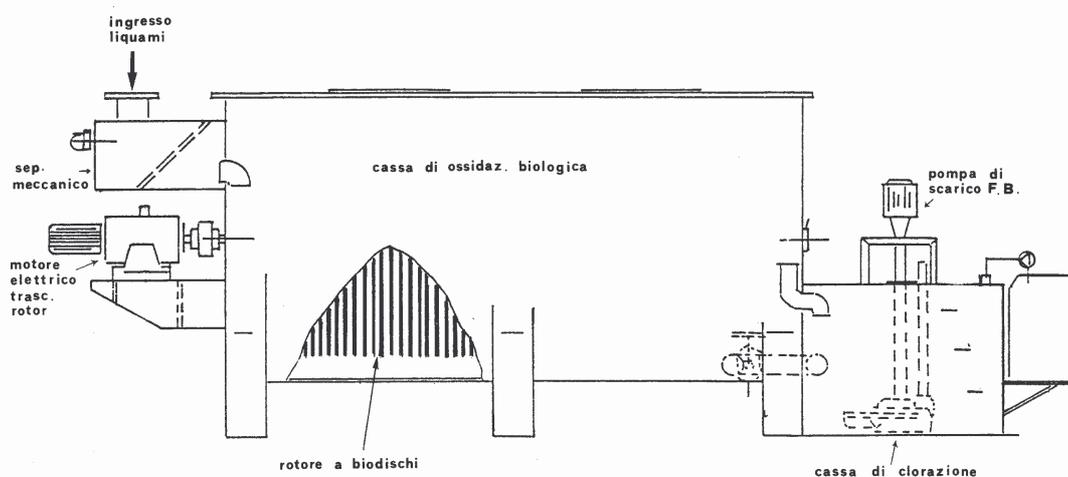
I materiali metallici eventualmente recapitati nelle bonze non possono essere richiamati dalle pompe le cui bocche di aspirazione sono sistemate a 150 mm dal fondo della bonza stessa.

5.3 - Impianto BIODISK FVN (Unita' Classe "San Giorgio")

Scopo e principio di funzionamento

L'impianto di depurazione acque nere e grigie tipo Biodisk FVN serve per il trattamento delle acque di rifiuto degli impianti igienico-sanitari e delle lavanderie di bordo.

Le acque da depurare subiscono prima una depurazione meccanica per separare la parte solida da quella liquida; quindi si effettua un trattamento biologico di ossidazione dei liquami per mezzo di un rotore a biodischi, seguito da una decantazione finale e da una clorazione che elimina i batteri coliformi (vedi figura seguente).



Impianto depuratore BIODISK FVN

Dopo il trattamento si ottiene un liquido depurato che può venire scaricato fuoribordo, ed i fanghi trattati, che vengono inviati nella cassa di raccolta, possono essere scaricati in mare aperto o in un impianto di terra.

Descrizione generale

L'impianto di depurazione liquami può trattare acque di scarico provenienti dai gabinetti (acque nere), dalle cucine, dalle lavanderie e dai bagni (acque grigie) a bordo delle navi.

L'impianto consiste in tre parti principali con a monte una camera convogliante per la grigliatura statica dei liquami affluenti.

Dalla raccolta le acque pervengono al primo stadio di trattamento, in cui la ossidazione biologica è espletata da un rotore a biodischi; i biodischi sono costituiti da materiale plastico avente una superficie corrugata e sono parzialmente immersi nel liquame.

Azionato da un motore elettrico attraverso un riduttore, per avere una bassa velocità di rotazione, il rotore trasferisce naturalmente una ingente quantità di ossigeno dall'aria all'acqua di scarico, favorendo la continua formazione di una pellicola biologica di microrganismi (biofilm) sulla

superficie dei dischi ed un continuo distacco della stessa, causato dalle forze di taglio che si esercitano nell'impatto disco-liquami, quando la biomassa esaurita non riesce più ad assorbire ossigeno dall'atmosfera circostante.

Nel secondo stadio si attua la fase di chiarificazione finale del mixed-liquor proveniente dalla fase di ossidazione, con i solidi sospesi che, per effetto del loro alto peso specifico, sedimentano velocemente.

I fanghi accumulatisi sul fondo vengono estratti periodicamente da una pompa comandata da un programmatore o tramite sistema valvola a saracinesca-pompa e scaricati fuoribordo o in apposito serbatoio di raccolta, che dovrà essere saltuariamente vuotato.

Il terzo stadio è costituito dalla fase di clorazione, dove avviene la sterilizzazione batterica dell'affluente chiarificato e depurato per mezzo di una soluzione commerciale di ipoclorito di sodio, regolata da una elettropompa dosatrice, in modo tale da garantire una minima concentrazione di cloro residuo nell'affluente, per non arrecare danno alla fauna e alla flora marina presenti nella zona dello scarico nel rispetto della vigente normativa.

L'effluente depurato e sterilizzato potrà essere scaricato direttamente fuoribordo.

Descrizione dettagliata

Grigliatura

I liquami provenienti dai gabinetti, dalle cucine, dai bagni e lavanderie vengono fatti arrivare alla parte superiore dell'impianto e da qui vengono fatti passare attraverso un separatore meccanico.

Il separatore meccanico è costituito da una griglia obliqua.

La griglia è formata da profili in acciaio distanziati tra loro con una luce molto piccola.

Il separatore meccanico consente il passaggio dei liquidi e di particelle solide fino a 0,3 mm di diametro, trattenendo invece qualsiasi altro materiale solido che viene accumulato.

Cassa di ossidazione biologica

I liquami che scorrono attraverso il separatore meccanico e che già sono stati depurati meccanicamente, cadono dentro la cassa di ossidazione.

In tale cassa, un rotore biologico a biodischi in materiale plastico, ruota a bassissimo numero di giri e trasferisce ossigeno dall'aria all'acqua di scarico favorendo la crescita, sulla superficie dei dischi, di una pellicola batterica responsabile della biodegradazione delle acque stesse.

Sulla cassa di ossidazione è sistemato uno scarico di emergenza.

Cassa di sedimentazione

La cassa di ossidazione biologica è collegata con la cassa di sedimentazione. Durante il funzionamento la cassa di sedimentazione viene riempita di liquido.

Alcune lamiere oblique vengono inserite nella cassa stessa per aumentare l'effetto di sedimentazione.

I fiocchi si depositeranno rapidamente sul fondo della cassa e formeranno del fango secondario. Le acque chiarificate passeranno invece nella cassa di clorazione.

Cassa di clorazione

La cassa di sedimentazione è collegata con la cassa di clorazione.

In essa, le acque chiarificate, subiscono un processo di sterilizzazione batterica per mezzo di una soluzione di ipoclorito di sodio ed infine vengono scaricate fuoribordo tramite una pompa di scarico comandata da elettrolivelli.

Pompa dei fanghi

I fanghi che si accumulano sul fondo della cassa di sedimentazione vengono estratti periodicamente da una pompa comandata da un programmatore e scaricati fuoribordo o in una apposita cassa di raccolta che dovrà essere saltuariamente vuotata.

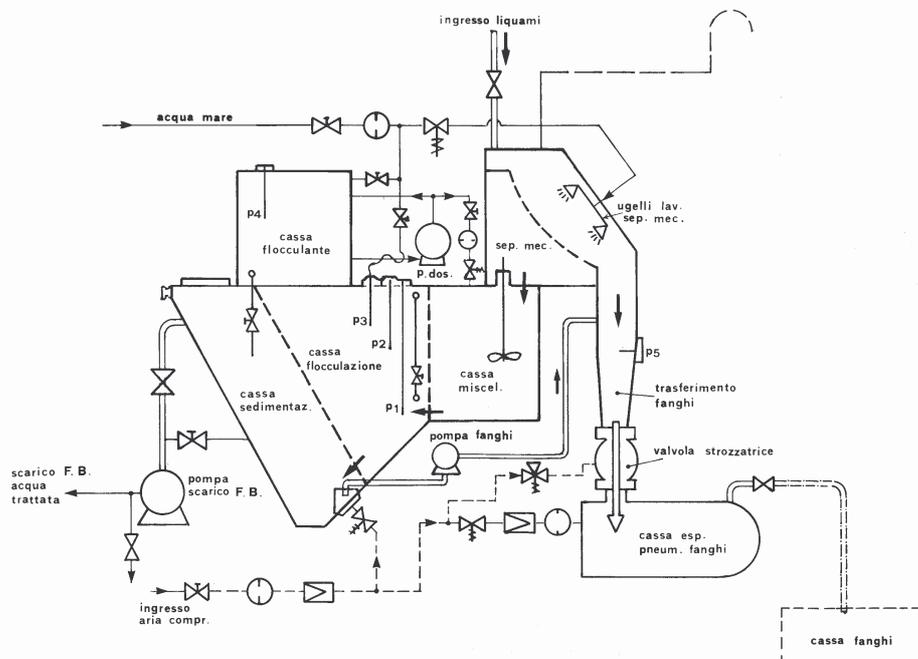
Descrizione del rotore biologico

Il rotore biologico è alloggiato nella cassa di ossidazione dei liquami.

Esso è fissato alle due estremità della cassa stessa per mezzo di due supporti e ruota a bassa velocità azionato dal motoriduttore ad esso collegato tramite giunto elastico di accoppiamento.

5.4 - Impianto ATLAS AWWU (Unita' Classe "Maestrale")

Di seguito viene descritto l'impianto di depurazione di acque nere e grigie tipo AWWU, completo di cassa raccolta liquami HT-3 e cassa raccolta fanghi HT-2, installato a bordo delle Unità classe "Maestrale" e fornito dalla A/S ATLAS di Copenhagen (vedi la figura seguente).



Impianto depuratore "AWWU" - Schema

Scopo e principio di funzionamento

L'impianto di depurazione acque nere e grigie tipo AWWU serve per il trattamento delle acque di rifiuto degli impianti igienico sanitari, e delle lavanderie di bordo.

Le acque da depurare subiscono prima una depurazione meccanica per separare la parte solida da quella liquida; quindi si effettua un trattamento chimico per mezzo di un flocculante $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (calce spenta), che uccide tutti i batteri.

Dopo il trattamento si ottiene un liquido depurato, che può venire scaricato fuoribordo, e dei fanghi trattati che vengono inviati nella cassa di raccolta per essere poi scaricati in mare aperto o in un impianto ricettore di terra.

Descrizione generale

L'impianto di depurazione liquami può trattare acque di scarico provenienti dai gabinetti (acque nere), dalle cucine, dalle lavanderie e dai bagni (acque grigie) a bordo delle navi.

L'impianto consiste in due parti principali: la parte per la depurazione meccanica e quella per la depurazione chimica.

L'impianto funziona senza ricorrere alla decomposizione a mezzo di batteri; perciò il tempo necessario per il trattamento risulta molto breve ed il processo stesso è insensibile alle sostanze velenose eventualmente presenti nei liquami.

Nel compartimento di separazione meccanica le acque nere e grigie in arrivo, vengono separate in una fase solida e in una liquida.

La fase liquida viene trattata chimicamente con l'aggiunta di un flocculante con il risultato di ottenere la formazione di fanghi e di liquido chiaro; inoltre i batteri vengono uccisi.

I fanghi, insieme alla fase solida, vengono estratti dal compartimento di depurazione meccanica con un sistema di trasporto pneumatico, per essere ammessi in una cassa di raccolta, dalla quale verranno successivamente travasati in un impianto ricettore a terra.

La parte depurata potrà essere scaricata attraverso l'impianto di trattamento liquami, direttamente fuoribordo.

Descrizione dettagliata

Separatore meccanico

I liquami provenienti dai gabinetti, dalle cucine, dai bagni e lavanderie vengono fatti arrivare alla parte superiore dell'impianto e da qui vengono trasportati, attraverso una piastra di distribuzione, al separatore meccanico.

Il separatore meccanico è costituito da una griglia obliqua ed arcuata.

La griglia è formata da profili in acciaio inossidabile, sistemati ad angolo retto rispetto alla corrente liquida e distanziati tra loro con una luce molto piccola.

La parte posteriore della griglia è dotata di uno scivolo per mezzo del quale la griglia stessa risulta autopulente.

Il separatore meccanico consente il passaggio dei liquidi e di particelle solide fino a 0,3 mm di diametro, trattenendo invece qualsiasi altro tipo di materiale solido che viene accumulato e fatto scorrere verso il basso lungo la griglia.

La superficie della griglia arcuata viene pulita per mezzo di due ugelli che spruzzano acqua di mare sull'intera superficie della griglia stessa in modo automatico, dopo ogni pompaggio fuoribordo.

Cassa di miscelazione

I liquami che scorrono attraverso il separatore meccanico e che già sono stati depurati meccanicamente, cadono dentro la cassa di miscelazione dove viene aggiunto il flocculante ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), con contemporanea forte agitazione del liquido.

Il flocculante aggiunto comporta la coagulazione delle particelle rimaste in sospensione che formeranno successivamente un sedimento insieme ai sali insolubili quali ad esempio i fosfati.

Il flocculante, inoltre, distrugge i batteri patogeni eventualmente presenti nelle acque luride, in quanto il grado di pH sale fino a circa 12.

Cassa combinata di contatto e flocculazione

Il collegamento tra la cassa di miscelazione e la cassa combinata di contatto e flocculazione avviene attraverso fori di livello ed uno scarico di troppo pieno.

La cassa combinata di contatto e flocculazione ha due scopi: quello di rendere uniforme il flusso di liquami e quello di accrescere la grandezza dei micro-flocchi, formati nella cassa di miscelazione, prima che essi siano pronti per la sedimentazione.

Nella cassa stessa sono sistemate alcune lamiere verticali che servono a smorzare il movimento dei liquami, specie con mare agitato.

Cassa di sedimentazione

La cassa di contatto e flocculazione è collegata al fondo della cassa di sedimentazione.

Durante il funzionamento la cassa di sedimentazione viene riempita di liquido.

Alcune lamiere oblique vengono inserite nella cassa stessa per favorire l'effetto di sedimentazione.

Quando il liquido, nella cassa di contatto e flocculazione, ha raggiunto il livello massimo, inizia il pompaggio fuoribordo e le acque luride passano così dalla cassa di flocculazione alla cassa di sedimentazione.

I flocculi più pesanti si depositeranno rapidamente sul fondo della cassa, mentre la maggior parte dei flocculi più leggeri si depositeranno sulle lamiere oblique e quindi scenderanno lentamente lungo le lamiere stesse verso il fondo della cassa.

Il liquido depurato viene estratto dalla sommità della cassa di sedimentazione per mezzo della pompa di scarico fuoribordo.

Sul fondo della cassa di sedimentazione sono sistemate due pompe a membrana, ad aria compressa.

Durante il funzionamento delle pompe, i fanghi vengono smossi in modo da rendere più facile il loro pompaggio.

Pompa dei fanghi

Dopo ogni ciclo di pompaggio fuoribordo si avviano le pompe dei fanghi che convogliano questi dalla cassa di sedimentazione al dispositivo di trasferimento.

Dispositivo di trasferimento

Il dispositivo di trasferimento riceve i fanghi che provengono in parte dal fondo del separatore meccanico ed in parte dalla pompa dei fanghi.

Cassa di espulsione pneumatica dei fanghi

I fanghi provenienti dal dispositivo di trasferimento cadono attraverso una valvola strozzatrice nella cassa di espulsione pneumatica dei fanghi.

Dopo ogni ciclo di pompaggio si chiude la valvola strozzatrice e si immette aria compressa nella cassa stessa, espellendo così il contenuto di quest'ultima.

I fanghi provenienti dalla cassa di espulsione pneumatica, possono essere inviati in una cassa speciale di raccolta fanghi e di qui potranno essere successivamente trasferiti in un impianto inceneritore.

Pompa dosatrice

La pompa dosatrice è di tipo centrifugo.

Le funzioni della pompa sono le seguenti:

- 1) mescolare le acque luride immesse nell'impianto con il flocculante aggiunto.
- 2) evitare che il flocculante si depositi nella cassa di raccolta del flocculante stesso
- 3) produrre la pressione che serve per il dosaggio

La miscelazione avviene per la grande turbolenza nella pompa centrifuga; si evita la sedimentazione del flocculante sempre mediante turbolenza, provocata dal fatto che la mandata della pompa è rivolta all'indietro (verso la cassa di raccolta del flocculante), attraverso un ugello sistemato in modo tale che l'acqua colpisca il fianco della cassa stessa.

Tra la mandata della pompa e la cassa di miscelazione è sistemata una valvola a solenoide.

Questa valvola, comandata da un temporizzatore ad impulsi, assicura il corretto dosaggio del flocculante.

Cassa di raccolta del flocculante (calce spenta $Ca(OH)_2$)

Nella parte superiore della cassa del flocculante è sistemato un coperchio per poter caricare il flocculante.

Inoltre, sempre sulla cassa, è sistemata una valvola di ritegno per consentire di caricare l'acqua nella cassa stessa.

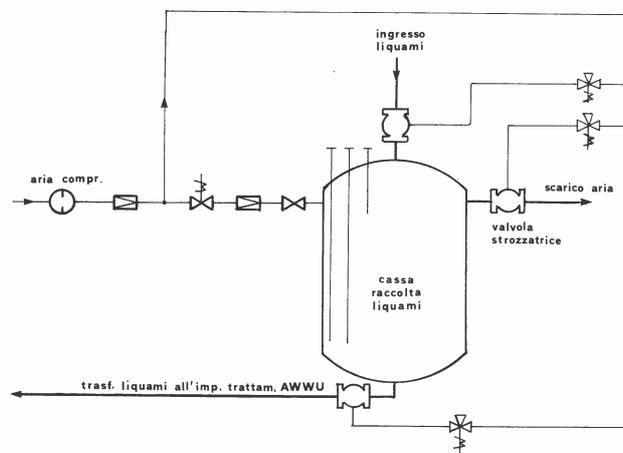
Pannello di comando

Questo pannello comprende i necessari avviatori del motore, il dispositivo di protezione contro i sovraccarichi ed i comandi automatici dell'impianto.

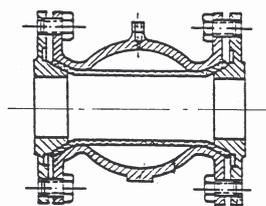
Gli impulsi di comando vengono dati da due elettrodi sistemati sulla cassa combinata di contatto e flocculazione nella parte superiore dell'impianto.

Cassa raccolta liquami

Le acque luride provenienti dai gabinetti arrivano alla cassa di raccolta liquami (vedi la figura seguente) e vengono trasferite nell'impianto trattamento acque luride AWWU per mezzo di aria compressa.



Cassa raccolta liquami



Valvola strozzatrice

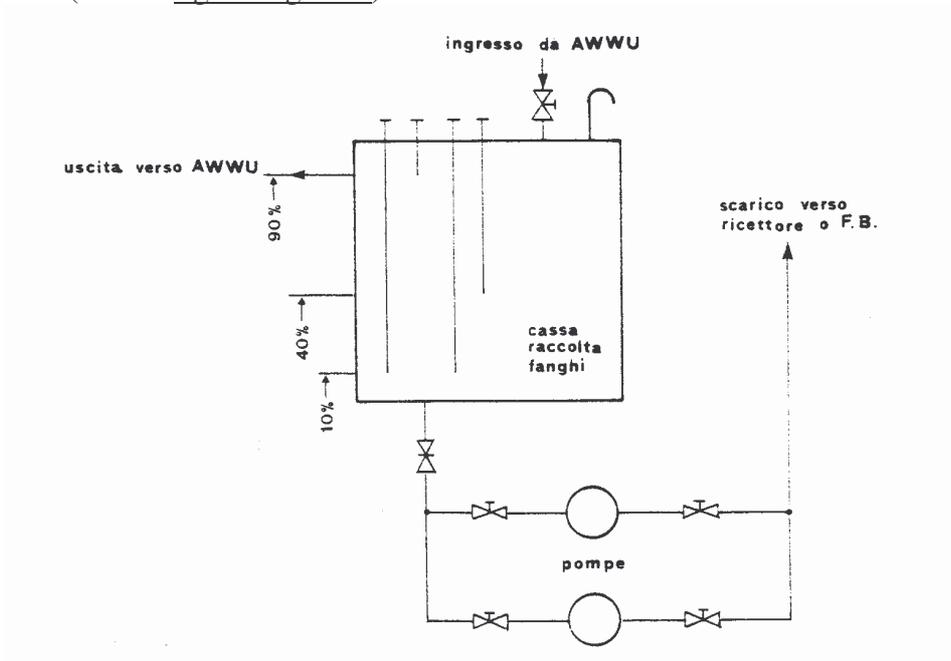
Nella cassa di raccolta ci sono degli elettrodi che controllano lo scarico automatico della cassa stessa.

L'apertura e la chiusura delle valvole strozzatrici è controllata per mezzo di valvole a solenoide.

I segnali per il funzionamento vengono dati dagli elettrodi attraverso l'unità elettronica che è montata sul pannello di comando elettrico.

Cassa raccolta fanghi

Durante il trattamento dei liquami i fanghi residui vengono scaricati attraverso la cassa di scarico pneumatico, situata all'uscita dell'impianto AWWU, verso la cassa di raccolta fanghi, nella quale vengono immagazzinati durante la navigazione in acque soggette a limitazioni o durante la sosta della nave in porto (vedi la figura seguente).



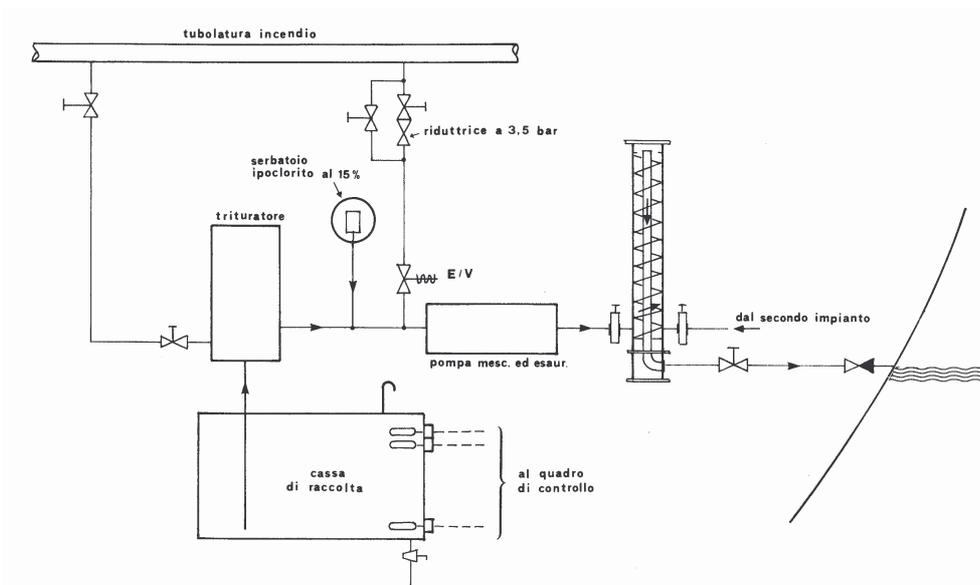
Il contenuto della cassa viene poi scaricato negli impianti ricettori a terra esistenti nei porti, o in mare aperto, al di là delle acque soggette a limitazioni.

Il trasporto dei fanghi residui viene effettuato per mezzo di due pompe di scarico delle quali una è di riserva all'altra.

5.5 - Impianto HAMMAN (Unita' Classe "Lupo")

Generalità

L'impianto Hamman è costituito da una cassa di raccolta munita di livellostati di massimo e di minimo ed un tritatore che riduce le particelle solide in sospensione in minime dimensioni (vedi la figura seguente).



Schema funzionale impianto HAMMAN

Alla base del trituratore, e precisamente al di sotto della parte cilindrica munita di coltelli dove è maggiore la turbolenza centrifuga, viene inviata aria allo scopo di stabilizzare il BOD ossia la quantità di ossigeno che una sostanza organica richiede, e quindi sottrae all'ambiente, per biodegradarsi.

Al trituratore è collegata anche una presa di acqua di mare per la periodica pulizia.

Dopo il trituratore le acque luride passano attraverso una pompa di mescolamento ed esaurimento sulla cui aspirazione è inserito un mescolatore a spirale interna con lo scopo di rallentare la velocità del liquido, prolungando il tempo di contatto con la soluzione di cloro.

Va notata, inoltre, l'assenza di elementi filtranti, inevitabilmente soggetti ad intasamenti e quindi a fastidiose manutenzioni.

L'impianto comprende anche un quadro elettrico di controllo sul quale è sistemato insieme a numerosi strumenti, anche un interruttore col quale è possibile smistare l'impianto da funzionamento "porto" a funzionamento "mare".

Quando l'impianto è smistato su "mare", il che può essere effettuato fuori dalla fascia delle acque protette dalla legislazione IMCO, viene esclusa dal funzionamento la pompa dosatrice.

Descrizione dettagliata

Tutte le acque nere e grigie di bordo, provenienti dagli scarichi dei WC, lavandini, docce, ecc., vengono convogliate in cinque casse di raccolta, due di trasferimento e tre "Hamman".

Tali casse sono munite di livellostati in modo da ridurre al minimo il volume inaspirabile per non creare permanenze troppo lunghe dei liquami nella cassa con pericolo di fenomeni fermentativi.

Quando le acque luride raggiungono nella cassa di raccolta un determinato livello (una altezza dal fondo pari a circa 2/3 dell'altezza totale della cassa) il relativo livellostato dà il segnale per la messa in moto del trituratore, della pompa di mescolamento/esaurimento e la pompa dosatrice.

Tali macchinari vengono fermati dal segnale del livellostato di minimo, situato ad una altezza di circa 20cm dal fondo della cassa.

Trituratore

Il tritatore è costituito da un corpo principale suddiviso da un diaframma orizzontale in due camere: quella inferiore che porta il tritatore vero e proprio, e quella superiore che accoglie il giunto di accoppiamento al motore elettrico.

Alla camera inferiore è collegato il tubo di aspirazione che pesca nella cassa raccolta liquami ed un branchetto munito di flangia per il collegamento all'aspirazione della pompa mescolatrice/esaurimento.

Pompa di mescolamento ed esaurimento

E' una pompa volumetrica mossa da un motoriduttore elettrico e giunto di disallineamento realizzato da un'asta con due giunti a snodo alle sue estremità.

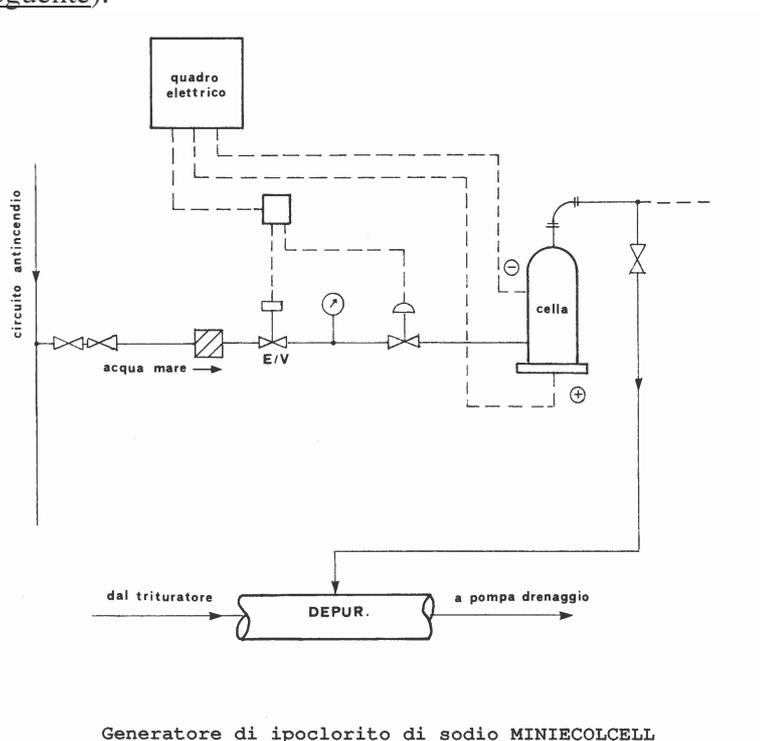
Il rotore è costituito da un elemento ondulato a sezione circolare che ruota dentro uno statore rivestito di gomma.

Le due parti sono lubrificate ad acqua e deve essere assolutamente evitato il funzionamento a secco.

L'aspirazione è prevista in corrispondenza del giunto di disallineamento mentre la mandata è sistemata orizzontalmente in asse con la pompa stessa.

Miniecolcell

L'impianto Miniecolcell è un generatore di ipoclorito di sodio ottenuto elettrolizzando l'acqua di mare (vedi la figura seguente).



L'elettrolisi avviene facendo passare acqua di mare dentro una apposita cella alla quale è applicata una bassa tensione in c.c. (5/6 Volts).

Al passaggio dell'acqua di mare una piccola parte del sale in essa contenuto viene trasformato in ipoclorito di sodio in quantità proporzionale alla corrente che passa nella cella la quale è regolabile agendo su un commutatore (cloro).

Quando il liquame nella cassa di raccolta raggiunge il livello previsto per l'entrata in funzione del trituratore e della pompa drenaggio, si apre l'E/V del Miniecolcell.

In tal modo l'acqua di mare arriva alla cella, il flussostato dà il consenso elettrico ed istantaneamente la cella produce ipoclorito di sodio nella quantità richiesta.

Quando la cassa di raccolta liquami si svuota, si fermano le pompe, si chiude l'E/V e quindi si interrompe la produzione di ipoclorito di sodio.

Tale metodo di produzione di ipoclorito di sodio presenta i seguenti vantaggi:

- produzione in loco di ipoclorito di sodio da acqua di mare nella quantità necessaria per un impiego immediato;
- eliminazione dei problemi di approvvigionamento e stoccaggio ;
- concentrazione costante e controllata di cloro attivo;
- l'ipoclorito viene immesso direttamente nell'impianto di depurazione evitando pericolose manipolazioni da parte del personale;
- la soluzione ottenuta ha un pH basso o neutro mantenendone quindi inalterato il potere battericida.

Mescolatore a spirale interna

Per incrementare il tempo di contatto fra le acque luride e la soluzione di ipoclorito al 15%, viene sistemato nell'impianto un mescolatore a spirale interna costituito da due tubi in acciaio inox uno interno all'altro.

Il tubo interno porta saldato sulla superficie esterna un piatto sagomato ad elica che ha lo scopo di ridurre la velocità dei due liquidi dandogli anche un senso di rotazione per un miglior mescolamento.

Arrivato alla sommità del serbatoio, il liquido rigurgita all'interno del tubo piccolo e viene scaricato fuoribordo.

PARTE 3^: CONDIZIONAMENTO E CELLE VIVERI

CAP.6 - IL CONDIZIONAMENTO DELL'ARIA

6.1 - Generalita'

Il condizionamento dell'aria è definito dalla *ASHRAE* (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers), come il processo di trattamento dell'aria, mediante il quale è possibile regolare contemporaneamente la sua temperatura, umidità, purezza e distribuzione in modo da soddisfare le esigenze dell'ambiente da condizionare.

-La regolazione della temperatura si effettua regolando il riscaldamento ed il raffreddamento;

-la regolazione dell'umidità riguarda l'umidificazione e la deumidificazione;

-la depurazione implica la rimozione delle impurità presenti nell'aria, quali polvere, fumi, batteri e gas non atmosferici;

-la regolazione della distribuzione e della circolazione varia, a secondo che si abbia una semplice circolazione di aria in una stanza (condizionatori a mobiletto) od una complessa distribuzione attraverso condotti (impianti centralizzati di condizionamento).

La temperatura e l'umidità dell'aria esterna variano da stagione a stagione; di conseguenza le funzioni espletate dai condizionatori d'aria sono diverse.

Esse possono essere così classificate:

1) funzioni invernali o di riscaldamento :riscaldamento e umidificazione.

2) funzioni estive o di raffreddamento : raffreddamento e deumidificazione.

3) funzioni comuni a tutto l'anno : depurazione, distribuzione e circolazione dell'aria.

Un sistema che espleti tutte le funzioni è chiamato sistema "*year round*" di condizionamento d'aria ed è ovviamente quello adottato sulle Unità Navali.

6.2 - Scopo del condizionamento a bordo

I primi impianti di condizionamento dell'aria sono comparsi a bordo delle Unità militari intorno agli anni '50 limitatamente a quei locali operativi dove, in seguito all'installazione delle prime apparecchiature elettroniche, si richiedevano, per il loro corretto funzionamento, condizioni di temperatura e umidità controllate e, per quanto possibile, indipendenti dalle condizioni climatiche esterne; tali locali erano principalmente: il locale radio, la C.O.C. e le stazioni di direzione tiro.

Successivamente, di pari passo con l'estendersi in altri settori della nave di apparecchiature elettroniche, è aumentata la richiesta di disporre di aria condizionata.

Infine, negli ultimi 15-20 anni, alle predette esigenze si è aggiunta quella di garantire accettabili condizioni di vita a bordo delle moderne Unità, soprattutto in relazione alla necessità di dotare la nave di un efficace protezione NBC con conseguente eliminazione di molte aperture come prese di aspirazione, oblò ecc.e di avere invece una ricircolazione di aria all'interno della nave, opportunamente trattata.

Le caratteristiche che deve avere l'aria condizionata, al fine di garantire il benessere per l'uomo, saranno descritte di seguito.

6.3 - L'aria atmosferica e l'uomo

6.3.1 - La macchina "UOMO" e la sua autoregolazione termica

Nei polmoni umani, come in quelli di tutti gli animali superiori, una parte dell'ossigeno contenuta nell'aria inspirata, si scioglie nel sangue e, sotto forma di ossi-emoglobina, è trasportato dal sangue stesso ai tessuti.

Nei tessuti, l'ossigeno si comporta come comburente nel processo di combustione combinandosi col carbonio e l'idrogeno costituenti i tessuti stessi; i tessuti verranno poi reintegrati mediante l'assimilazione di parte degli alimenti.

Il calore Q' sviluppato dalla combustione, detto "metabolismo", è in parte trasformato dalla macchina "Uomo" in lavoro necessario per mantenere in attività gli organi indispensabili all'organismo (cuore, polmoni ecc.) (metabolismo basale) ed eventualmente anche in lavoro esterno (per esempio un lavoro manuale).

Il calore della combustione che non è stato trasformato in lavoro:

$$Q'' = Q' - AL \quad (\text{dove: } A=\text{equiv. mecc. della caloria}, L=\text{lavoro compiuto})$$

deve essere versato (come fanno tutte le macchine termiche) al termostato inferiore (che è costituito dall'aria esterna).

Questo calore viene versato attraverso la pelle in misura dell'80% e per il restante 20%, mediante la espirazione. Il sintomo del regolare funzionamento della macchina uomo, detto *termogenesi basale*, è un equilibrio termico che mantiene la temperatura del corpo a circa 37°C.

Come per qualsiasi macchina termica, anche per quella umana è necessaria la presenza di un termostato superiore (che anche in questo caso è costituito da una combustione continua) e di un termostato inferiore dove si possa scaricare il calore non trasformato.

Di conseguenza, il regolare funzionamento della macchina uomo, in un certo ambiente, richiede che l'aria (termostato inferiore), sia in quantità tale, non solo da assicurare l'ossigeno per la respirazione (necessario per il verificarsi della combustione), ma anche per poter assorbire il calore Q'' di scarico.

La quantità di aria necessaria per la seconda funzione è, in genere, superiore a quella necessaria per la prima e di conseguenza i volumi di aria per la ventilazione che assicuri il benessere (si è parlato di funzionamento regolare della macchina uomo) vengono calcolati in base a quest'ultima esigenza.

Accurate esperienze hanno permesso di stabilire che il normale rendimento della macchina uomo vale circa:

$$\eta = \frac{Q' - Q''}{Q'} = 0,17$$

La quantità di calore Q' (metabolismo) è funzione dell'attività esterna: essa vale circa 150-200 Cal/h per lavori leggeri e circa 200-300 Cal/h per lavori pesanti.

La quantità minima di calore producibile Q' (metabolismo basale) è quella prodotta nell'organismo in assoluto riposo esclusivamente per mantenere in funzione il cuore, i polmoni, le ghiandole ecc.

Il valore medio del metabolismo basale è circa 100Cal/h; di conseguenza in assoluto riposo, il valore del calore da versare nell'ambiente è di circa:

$$Q'' = Q' \cdot (1 - \eta) = 100 \cdot (1 - 0,17) = 83 \text{ Cal/h}$$

e l'aria ambiente deve essere in condizione di poter assorbire questo calore.

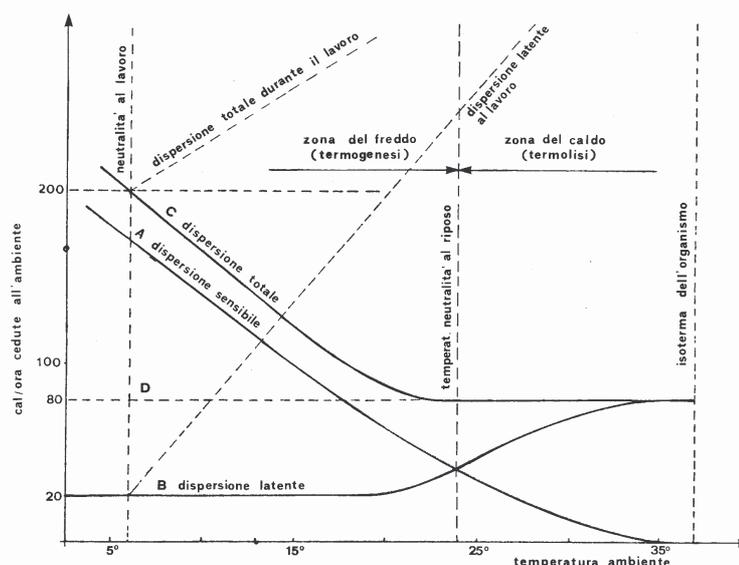
Si è detto che la maggior parte (80%) del calore che il corpo umano deve restituire, viene eliminato attraverso la pelle. Questa dispersione di calore avviene per irraggiamento convezione e per evaporazione del sudore traspirato.

La quantità di sudore traspirato dipende principalmente dalle condizioni dell'individuo e anche dalle condizioni dell'ambiente, ma la quantità di sudore evaporato dipende solo dalle condizioni dell'ambiente, ed è quindi proporzionale alla differenza fra la pressione di saturazione del sudore alla sua temperatura e la pressione di vapore dell'aria.

La dispersione per irraggiamento e convezione, che chiameremo *dispersione sensibile*, è evidentemente tanto maggiore quanto minore è la temperatura dell'ambiente rispetto a quella della pelle dell'individuo, ed essa si annulla quando le due temperature si eguagliano.

In realtà, nella dispersione sensibile, la parte costituita dall'irraggiamento, non dipende dalla temperatura dell'aria dell'ambiente ma, essendo l'aria ambiente impermeabile alla irradiazione, dalla temperatura dei corpi che ricevono tale calore (ad esempio le pareti, i mobili, le macchine ecc.).

Se su un diagramma (vedi la figura seguente) rappresentiamo in ascisse le temperature ed in ordinate le calorie disperse ogni ora dall'organismo, abbiamo che la linea A rappresenta la *dispersione sensibile*.



Principio di autoregolazione della temperatura del corpo umano

La dispersione per evaporazione del sudore, che chiameremo *dispersione latente*, prescindendo per semplicità dallo stato igrometrico dell'ambiente, si mantiene pressoché costante per un grande intervallo di temperatura.

Ammettendo che un organismo medio in riposo emetta 35 gr/h di acqua, il calore di vaporizzazione di questa è circa:

$$Q = 595 \times 0,035 = 20 \text{ Cal/h}$$

La linea *B* rappresenta la dispersione latente.

La linea *G* rappresenta la dispersione totale, somma della latente e della sensibile.

La retta *D* rappresenta il calore:

$$Q'' = 83 \text{ Cal/h}$$

che l'organismo deve versare all'esterno (nelle considerate condizioni di riposo).

Si nota che, se la dispersione latente si mantenesse costante anche oltre i 20°C, la dispersione totale diventerebbe minore di quella necessaria (83 Cal/h) e l'organismo non potrebbe a lungo funzionare.

Una provvidenziale facoltà della pelle fa sì che, al di sopra dei 20°C, i pori si allarghino e le ghiandole sudoripare emettano una quantità di acqua crescente: avviene allora una vaporizzazione supplementare (*termolisi*) che fa aumentare la dispersione latente in modo da compensare la insufficiente dispersione sensibile e mantenere la dispersione totale al necessario valore.

Alle temperature inferiori di 24°C, la dispersione è maggiore di Q'' e l'organismo deve produrre un eccesso di calore (*termogenesi*) per compensare l'eccesso di dispersione (differenze delle calorie tra le ordinate di *G* e di *B*).

Questo complesso fenomeno di autoregolazione termica varia se l'individuo, anziché essere in riposo, svolge un lavoro esterno.

In questo caso, essendo maggiore Q' e quindi Q'' , la retta *D* si sposta verso l'alto.

Il punto di incontro della linea *G* con la linea *D* si sposta verso le temperature inferiori, producendo così una diminuzione della temperatura di neutralità ed il fenomeno della termolisi inizia a temperature inferiori.

Se nella zona del freddo l'eccesso di dispersione è tale da superare le possibilità della termogenesi, l'ambiente diventa nocivo.

Se nella zona del caldo le condizioni dell'ambiente sono tali che, nonostante l'abbondante traspirazione risulta scarsa la evaporazione e quindi insufficiente la termolisi, l'ambiente diviene egualmente nocivo.

Queste condizioni si hanno quando nell'ambiente, per un aumento della temperatura e quindi della pressione di saturazione p_s o della umidità relativa U_r , aumenta la pressione parziale del vapore nell'ambiente ($p_v = U_r \cdot p_s$) per cui diminuisce la differenza:

$$P_{\text{sud}} - P_v$$

tra la pressione di saturazione del sudore e la pressione parziale del vapore dell'ambiente.

Quest'ultimo caso spiega il malessere che provocano gli ambienti caldi ed umidi delle zone tropicali: in essi la traspirazione non compensa (per la scarsa evaporazione) la diminuita dispersione sensibile.

6.3.2 - Il benessere e la temperatura effettiva

Da quanto visto prima risulta che tre fattori ambientali:

- temperatura
- velocità dell'aria
- umidità

concorrono nel promuovere la necessaria trasmissione del calore prodotto da una persona e nell'assicurare quindi l'abitabilità di un ambiente.

Tali fattori però, nel caso in cui varino indipendentemente l'uno dall'altro, possono dar luogo a sensazioni di malessere fisico.

In genere a tali variazioni fa fronte il potere di adattamento del corpo umano.

Quest'ultimo agisce nel senso di adeguare all'ambiente il meccanismo di trasmissione del calore prodotto trasmettendolo, al limite, totalmente sotto forma di calore sensibile se l'aria dell'ambiente è satura, o pressoché interamente sotto forma di calore latente se la temperatura dell'aria è relativamente alta e la sua umidità specifica bassa.

Affinchè un ambiente possa essere ritenuto confortevole è necessario che i tre fattori suddetti varino entro limiti più ristretti di quelli imposti dalla sola abitabilità.

E' opportuno notare che le condizioni ambientali che assicurano il benessere fisico dipendono anche dalle stagioni e pertanto devono essere variate con queste.

Per fare un esempio, un ambiente mantenuto d'estate a 26°C e $50\% U_r$ è confortevole per la maggior parte delle persone che lo occupano, queste tuttavia si sentirebbero a disagio se le stesse condizioni fossero mantenute d'inverno.

La causa di questo è la limitazione del potere di adattamento del corpo umano, che si modifica in funzione delle condizioni climatiche stagionali.

Un criterio di valutazione dell'effetto simultaneo dei tre fattori: temperatura, umidità relativa e velocità dell'aria, si ottiene introducendo il concetto di *temperatura effettiva* (t_E) che è un indice della sensazione di benessere che un certo ambiente può dare o meno.

Esperimenti eseguiti dall'A.S.H.V.E. (American Society of Heating and Ventilating Engineers) hanno provato che una data sensazione di freddo o caldo può essere prodotta da diverse condizioni di temperatura, umidità relativa e ventilazione.

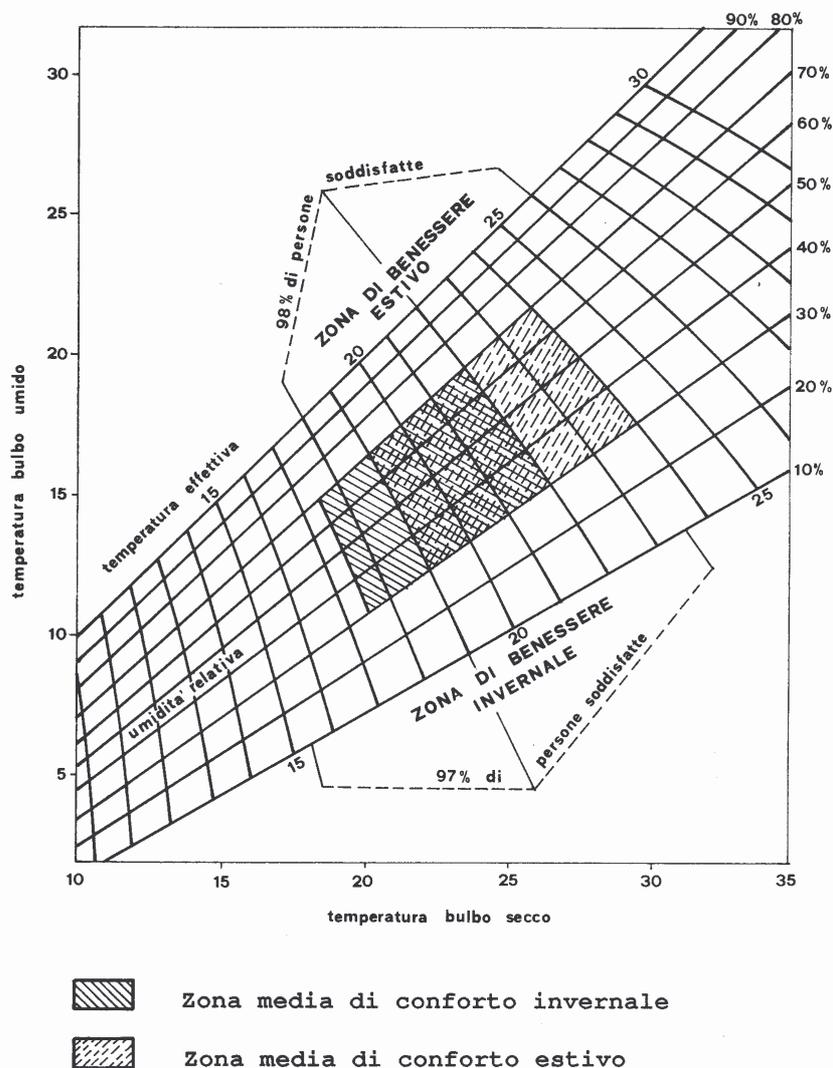
La scala delle temperature effettive si può ottenere sperimentalmente nel modo seguente.

Si supponga di disporre di due ambienti, uno alimentato da aria satura avente una velocità compresa tra 0,07-0,12 m/s, la cui temperatura si possa variare; l'altro alimentato da aria di cui si possano variare a piacere le temperature bulbo umido e bulbo secco, t_{bu} e t_{bs} , e la velocità.

Se la sensazione fisica che il secondo ambiente, tenuto in certe condizioni, provoca su un gruppo di persone è uguale a quella da esse sperimentate nel primo, si dice che la temperatura effettiva del secondo ambiente è uguale a quella del primo.

Pertanto l'effetto simultaneo di temperatura, umidità relativa e velocità dell'aria in un certo ambiente, è paragonato a quello di un altro ambiente la cui aria è satura ad una certa temperatura e si muove con la velocità sopra indicata.

I risultati degli esperimenti effettuati dalla A.S.H.V.E. sopra illustrati sono compendati nel diagramma della figura seguente, nel quale è delimitata la zona del benessere estivo, invernale e quella che può essere ritenuta confortevole in entrambe le stagioni.

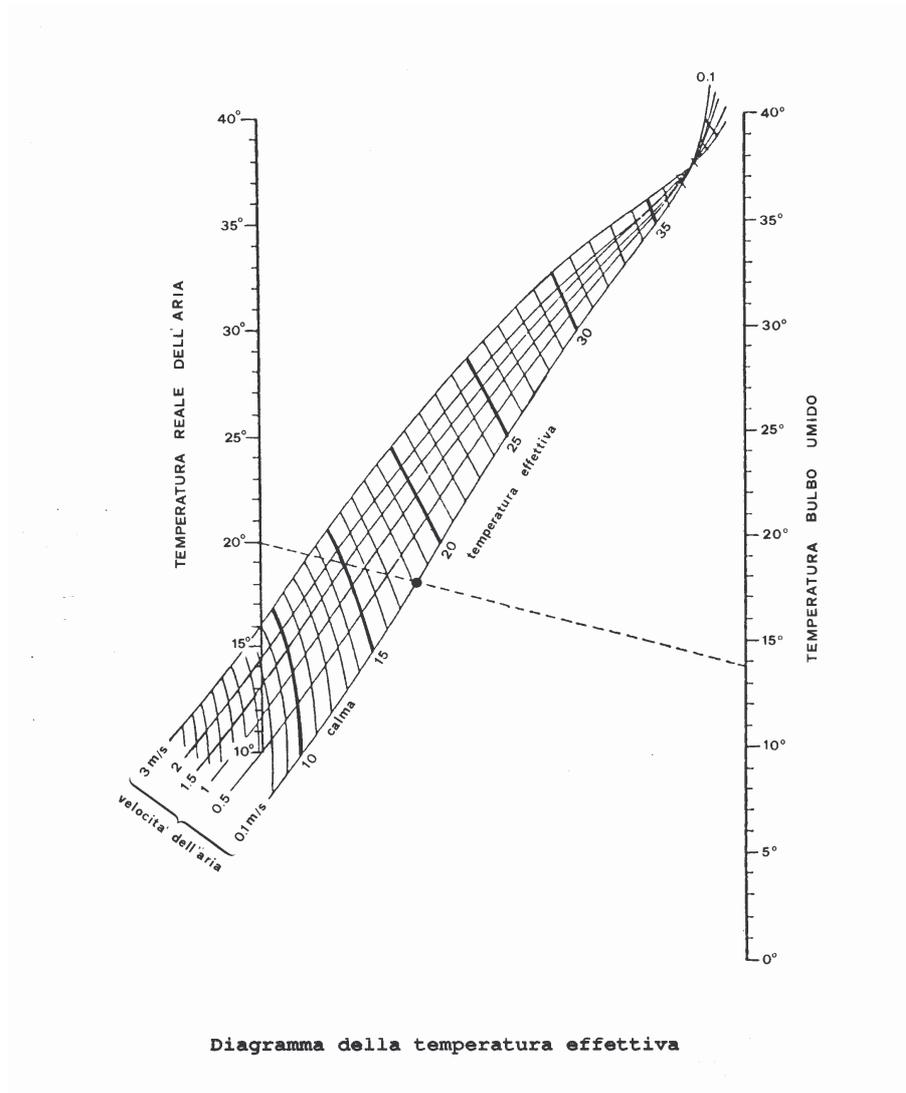


Condizioni di benessere invernale ed estivo

Tale diagramma è stato tracciato per aria pressoché in quiete, avente cioè velocità di 0,07-0,12 m/s.

In esso si vede che le condizioni ritenute mediamente confortevoli d'estate, corrispondono a circa 21°C t_E , quelle invernali a circa 19°C t_E .

Un altro diagramma mediante il quale si può calcolare la temperatura effettiva di un ambiente, anche al variare della velocità dell'aria, è illustrato nella figura seguente.



Nel caso considerato in figura si vede che la temperatura effettiva corrispondente a $20^{\circ}\text{C } t_{bs}$ e $13,8^{\circ}\text{C } t_{bu}$, è di 18°C , con aria alla velocità di $0,1 \text{ m/s}$ oppure di 17°C con velocità dell'aria di $0,5 \text{ m/s}$ e così via.

6.4 - Il rinnovo dell'aria

Un elemento da prendere in considerazione, nel calcolo del condizionamento, è il numero dei ricambi orari dell'aria che circola nell'ambiente, ricambi che si rendono necessari quando esistono cause di viziamento dell'aria stessa.

Infatti, le persone emettono anidride carbonica e anche sostanze tossiche dovute alla respirazione e alle emanazioni cutanee, le quali, accumulandosi, rendono l'aria irrespirabile e antigenica.

Poiché queste ultime non si possono determinare quantitativamente e d'altronde, essendo esse proporzionali all'incirca alla quantità di anidride carbonica emessa, in generale il grado di viziamento dell'aria viene giudicato in base alla percentuale di CO_2 .

L'aria atmosferica contiene in media lo 0,4 per mille in volume di anidride carbonica (litri 0,4 per metro cubo); nei locali abitati si può tollerare senza inconvenienti il 2 per mille (al di sopra di tale concentrazione iniziano i primi sintomi di avvelenamento).

La quantità di CO₂ emessa da uomini adulti, in media è di circa 40 gr/h; per donne e ragazzi tale peso si riduce a circa metà.

Quindi, tenendo presente che il volume specifico della CO₂ è di 0,505 m³/Kg si ha, per ogni persona e per ogni ora un accumulo di CO₂ pari a :

$$V_1 = 0,505 \cdot 0,040 = 0,0202 \text{ m}^3 = 20,2 \text{ dm}^3$$

Per contenere la percentuale di CO₂ dell'ambiente entro il 2 per mille occorre mettere a disposizione di ogni persona per ogni ora un volume di aria pari a:

$$V_2 = \frac{V_1}{(2 - 0,4)} = \frac{20,2}{1,6} = 12,6 \text{ m}^3$$

L'esperienza consiglia di fornire aria pura negli ambienti condizionati, nelle seguenti misure:

Ospedali:	40-60 m ³ /h per persona
Scuole:	10-16 m ³ /h per persona
Sale affollate:	20-25 m ³ /h per persona

Per gli ambienti di abitazioni è sufficiente un rinnovo completo ogni due o tre ore.

Le norme vigenti nella Marina Militare, prevedono, per i locali condizionati, un rinnovo di aria pari a 15 m³/h per persona considerando il massimo normale affollamento dei locali e un rinnovo orario minimo dell'ambiente pari a 6-7 volte il volume del locale.

CAP.7 - CICLI FRIGORIFERI

7.1 - Generalità

Le tecniche che possono essere usate per sottrarre una certa quantità di calore da una sorgente "fredda" per cederla ad una sorgente "calda", ossia per produrre freddo, sono molte, ma poche sono quelle sfruttabili con un buon rendimento e quindi economicamente convenienti; le più diffuse sono:

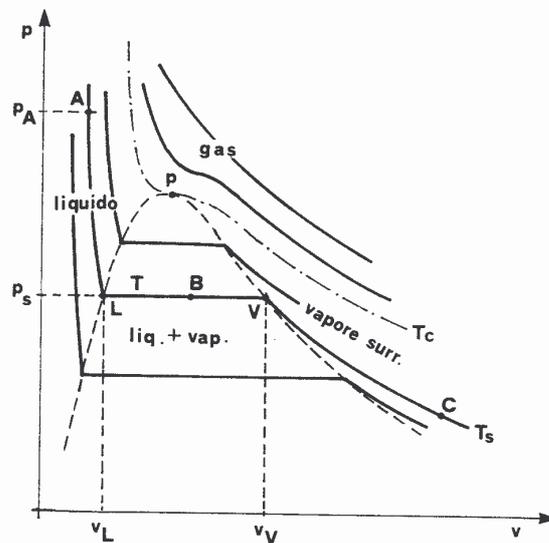
- espansione di un gas
- passaggio di stato di una certa sostanza dallo stato liquido a quello di vapore.

Di queste due tecniche, quando la quantità di calore da sottrarre è elevata, risulta molto più conveniente la seconda.

Dalla chimica sappiamo che nel passaggio dallo stato liquido a quello di vapore ogni sostanza assorbe una rilevante quantità di calore senza che la temperatura subisca variazioni.

Questa quantità di calore prende il nome di "*calore latente di vaporizzazione*" ed è caratteristico di ogni sostanza o miscela.

Il diagramma che descrive lo stato di una data sostanza, ed in particolare il suo volume specifico, al variare della pressione o della temperatura si chiama "*diagramma di stato*" ed ha, indipendentemente dalla sostanza, un andamento a campana e nel quale possono essere individuate quattro zone principali (vedi figura seguente):



- una zona del liquido: dove la sostanza a quei valori di pressione e temperatura è tutta allo stato liquido.
- una zona del vapore
- una zona all'interno della campana in cui è contemporaneamente presente la fase liquida e quella vapore
- una zona dove il comportamento del vapore si avvicina a quello dei gas.

Per mettere maggiormente in risalto la quantità di calore scambiata dal fluido con le sorgenti è più utile riferirsi ai diagrammi pressione-entalpia.

L'entalpia può definirsi in pratica come la quantità di calore contenuta in un Kg di sostanza ad una data temperatura.

Ad esempio, l'entalpia dell'aria secca, ad 1°C ed alla pressione atmosferica, è di 0,24Kcal/Kg.

Per definizione coincide anche col suo calore specifico a pressione costante c_p , in quanto è la quantità di calore necessaria per elevare di 1°C la temperatura di 1Kg di sostanza, (si assume convenzionalmente uguale a zero l'entalpia di ogni sostanza a zero gradi centigradi).

Il calore specifico dell'acqua è, per la definizione stessa di Caloria, di 1Kcal/Kg°C; invece per sostanze diverse questo valore cambia anche notevolmente.

L'entalpia aumenta con l'aumentare della temperatura; la formula per ricavare l'entalpia (a pressione costante) è la seguente:

$$h = c_p t$$

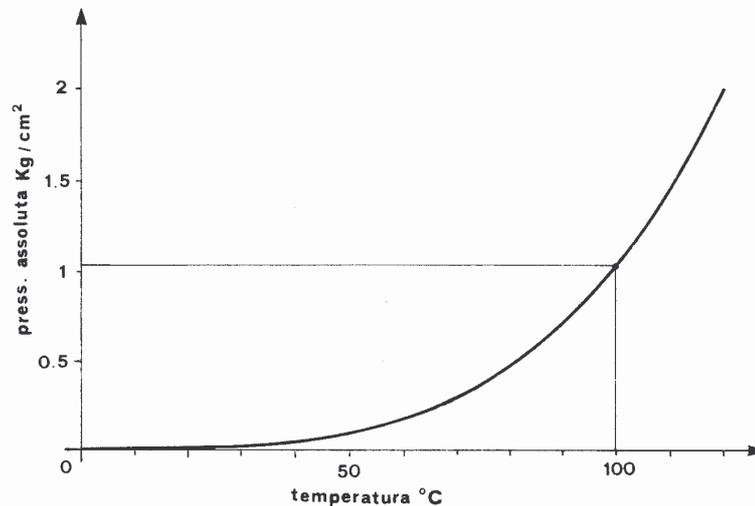
Quindi per l'aria secca avremo:

$$h = 0,24t$$

I rapporti tra la temperatura e le pressioni nei passaggi di stato variano secondo leggi caratteristiche proprie di una data sostanza.

Ad esempio la temperatura di ebollizione dell'acqua è di 100°C alla pressione atmosferica mentre alla pressione assoluta di 2 bar tale temperatura è di 120°C ed alla pressione assoluta di 0,5 bar essa è di 80°C.

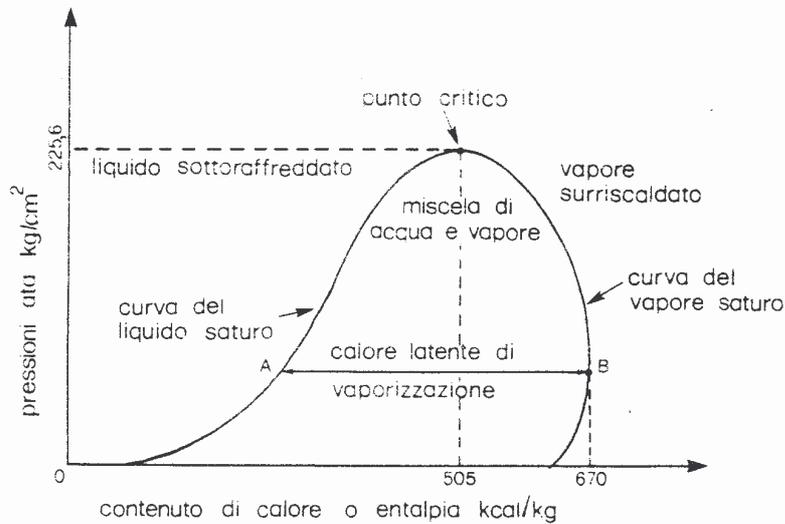
La temperatura di ebollizione dell'acqua varia dunque con la pressione secondo la legge rappresentata nella figura seguente.



Questo fenomeno è valido anche per numerosi altri fluidi, in particolare per quelli che ci interessano agli effetti della refrigerazione.

Il diagramma pressioni-entalpie riferito ad 1 Kg di fluido ci permette di apprezzare lo stato ed il "contenuto di calore" (entalpia), di tale fluido in funzione della pressione e di determinarne la temperatura.

Vediamo ora l'utilità del diagramma pressione-entalpia (vedi figura seguente).



Se tracciamo su di esso una retta orizzontale, verranno individuati due punti sulla curva: A e B.

Il punto A individuerà il contenuto di calore, o entalpia, di 1 Kg di liquido saturo.

Il punto B invece, individuerà l'entalpia del vapore saturo.

La differenza tra i punti A e B corrisponde al calore latente di vaporizzazione.

Il tratto AB rappresenta quindi un processo di evaporazione attraverso il quale il fluido passa dallo stato di liquido saturo, punto A, allo stato di vapore saturo secco, punto B, passando attraverso fasi intermedie di miscugli liquido vapore entro la curva.

Questa trasformazione avviene a spese di una certa quantità di calore sottratto dall'ambiente, rappresentato quantitativamente (in Kcal/Kg) dalla differenza tra l'entalpia del fluido nelle condizioni del punto B e del punto A.

Il ciclo che dobbiamo quindi realizzare dovrà comprendere due trasformazioni di stato, da liquido a vapore e viceversa e dovrà essere percorso in senso antiorario.

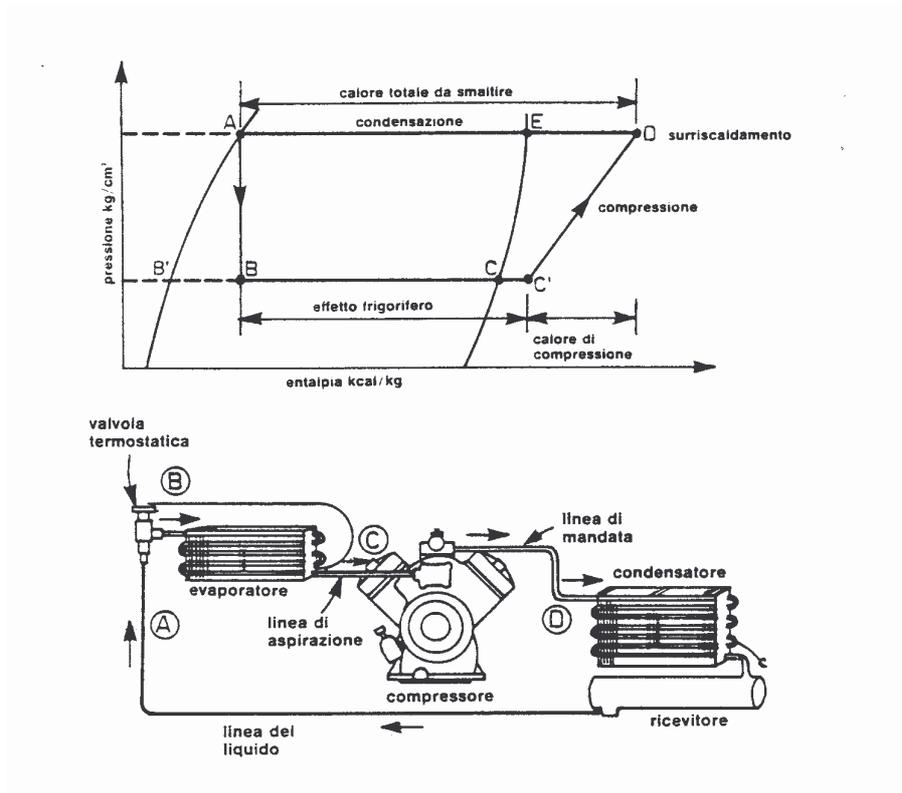
Per il postulato di Clausius che dice *"Il calore passa spontaneamente da un corpo a temperatura maggiore ad uno a temperatura inferiore ma non viceversa"*, se noi vogliamo trasferire una certa quantità di calore da una sorgente a temperatura inferiore ad una sorgente a temperatura superiore dovremo fornire energia dall'esterno.

Questa energia potrà essere energia meccanica o energia termica.

Nel primo caso abbiamo un *"ciclo frigorifero a compressione"*, mentre nel secondo caso abbiamo il *"ciclo frigorifero ad assorbimento"*.

7.2 - Ciclo frigorifero a compressione

Lo schema elementare di un impianto frigorifero funzionante secondo un ciclo frigorifero a compressione di tipo chiuso è rappresentato nella figura seguente.



Esso comprende i seguenti elementi fondamentali:

- un vaporizzatore, o evaporatore
- un compressore
- un condensatore
- una valvola di regolazione

L'evaporatore ed il condensatore sono due scambiatori di calore di cui il primo tra l'ambiente da raffreddare (termostato inferiore) ed il fluido frigorifero, ed il secondo tra quest'ultimo ed il termostato superiore.

Abbiamo quindi tutti gli elementi per esaminare un ciclo frigorifero reale sotto il profilo termodinamico.

In figura è riportato lo schema di un circuito frigorifero con il quale ci proponiamo di raffreddare dell'aria di un certo ambiente, ad esempio una cella frigorifera, facendole attraversare l'evaporatore.

Il condensatore sarà a propria volta raffreddato con aria esterna.

Tracciamo poi, un diagramma pressioni-entalpie per un certo fluido frigorifero.

Nel diagramma, sull'asse verticale, avremo i valori della pressione, e sull'asse orizzontale i valori dell'entalpia (riferiti ad un Kg di fluido frigorifero).

7.2.1 - Evaporazione

Iniziamo ad esaminare il ciclo frigorifero dal punto A immediatamente a monte della valvola di regolazione.

Qui il liquido refrigerante si trova praticamente alla temperatura di condensazione.

Nell'attraversare la valvola di regolazione, parte del refrigerante evapora a causa della pressione più ridotta esistente nel punto B, a valle della valvola.

Questa trasformazione si compie rapidamente e, in pratica, senza cessione né assorbimento di calore, è cioè *isoentalpica* e viene indicata sul diagramma da una retta verticale passante per A e B.

Il refrigerante entra perciò nell'evaporatore con la stessa quantità di calore che aveva a monte della valvola.

Una parte del refrigerante però evapora raffreddando il liquido refrigerante stesso.

Questo quantitativo di vapore, che raffredda il liquido, non può naturalmente compiere più un effetto utile nell'evaporatore e pertanto è responsabile di una riduzione della resa frigorifera.

Il quantitativo di calore perduto in questo modo è rilevabile sul diagramma ed è rappresentato dalla differenza di entalpia del fluido tra il punto B' ed il punto B.

Nelle normali applicazioni di condizionamento la quantità di vapore refrigerante spesa per raffreddare il liquido è intorno al 15-20%.

Il refrigerante fluisce dal condensatore all'evaporatore per effetto della differenza di pressione esistente fra i due scambiatori di calore.

Questa differenza di pressione è dovuta al lavoro del compressore.

Il refrigerante giunge nell'evaporatore sotto forma di miscela di liquido freddo e vapore.

Asportando calore dall'aria che attraversa l'evaporatore e che si trova a temperatura più elevata del liquido refrigerante, il liquido stesso evapora e si trasforma in vapore.

Per sfruttare appieno l'effetto frigorifero è necessario che tutto il refrigerante evapori prima di lasciare l'evaporatore.

Questa trasformazione è rappresentata sul diagramma pressioni-entalpie da una retta orizzontale B-C'.

Si ritiene infatti che l'evaporazione del refrigerante avvenga a pressione costante.

L'effetto frigorifero è dato dalla differenza di entalpia tra il punto C' ed il punto B.

Ora il vapore refrigerante può uscire dall'evaporatore in due condizioni diverse:

- sotto forma di vapore saturo, e perciò la retta B-C' si arresterebbe in realtà nel punto C sulla curva del vapore saturo. In questo caso viene a ridursi l'effetto frigorifero disponibile.
- sotto forma di vapore surriscaldato, come nel nostro caso, dove il punto C' cade al di là della curva del vapore saturo nella zona del vapore surriscaldato.

Questa differenza dipende dal dimensionamento dell'evaporatore e da altri fattori costruttivi.

In genere il costruttore dichiara la cosiddetta "*temperatura del refrigerante*" all'uscita dell'evaporatore: essa è in realtà la temperatura di saturazione del refrigerante corrispondente alla pressione con la quale esso lascia l'evaporatore.

Il refrigerante lascia dunque l'evaporatore allo stato di vapore saturo, punto C, o vapore surriscaldato, punto C' e raggiunge il compressore.

7.2.2 -Compressione

Il compressore, dopo averlo aspirato, comprime il vapore.

Il lavoro meccanico del compressore si traduce in un aumento del contenuto di calore del vapore.

Questo calore aggiuntivo viene chiamato "*calore di compressione*".

Per effetto della compressione viene ad aumentare altresì la pressione del vapore, e quindi, la sua temperatura.

Questa trasformazione è indicata sul diagramma pressioni-entalpie dal tratto C'-D.

Il calore di compressione varia di poco con il variare del tipo di liquido refrigerante, ma varia moltissimo con i differenti livelli di temperature e pressioni entro le quali è previsto il funzionamento del ciclo frigorifero.

Questo conduce alla conseguenza di un maggiore o minore assorbimento di potenza da parte del compressore, a seconda delle temperature e pressioni di funzionamento.

Il tratto di tubo tra l'uscita dell'evaporatore e l'ingresso del compressore viene detto "*linea di aspirazione*".

Il vapore deve venire aspirato dal compressore nella stessa quantità con la quale si produce entro l'evaporatore.

Un volume di aspirazione maggiore provocherebbe un'eccessiva riduzione di pressione (e perciò di temperatura) nell'evaporatore.

Al contrario, un volume di aspirazione inferiore al valore di produzione di vapore nell'evaporatore, produrrebbe un aumento della pressione e della temperatura nell'evaporatore.

Queste due condizioni sono molto importanti poiché vengono a determinarsi con la variazione dei carichi termici; bisogna prevedere dei dispositivi per far fronte a queste condizioni di funzionamento.

7.2.3 -Condensazione

Il refrigerante arriva nel condensatore allo stato di vapore surriscaldato.

Il tratto di tubo tra l'uscita del compressore e l'ingresso del condensatore, viene detto "*linea di mandata*".

Entro il condensatore viene smaltito il calore totale contenuto nel vapore, dovuto alla somma del calore assorbito nell'evaporazione, più il calore per il lavoro compiuto dal compressore.

Questa rimozione di calore viene rappresentata dal tratto orizzontale D-E-A.

Possiamo suddividere idealmente in due fasi il processo che avviene nel condensatore.

In una prima fase la temperatura del vapore surriscaldato viene abbassata fino al punto di saturazione, alla pressione esistente nel condensatore, tratto D-E.

Nella seconda fase, sempre per effetto della rimozione di calore, si ha un cambiamento di stato del fluido refrigerante, con passaggio da vapore saturo a liquido saturo, appunto la condensazione.

Questa seconda fase è rappresentata dal tratto E-A.

La temperatura alla quale avviene la condensazione naturalmente dipende dalla temperatura del fluido di raffreddamento disponibile (aria o acqua) nel condensatore.

Per mantenere lo scambio di calore tra il refrigerante e l'aria o l'acqua di raffreddamento del condensatore, la temperatura di condensazione del refrigerante deve, sempre, essere superiore a quella dell'aria o dell'acqua disponibili.

A seconda della superficie del condensatore, il refrigerante liquido può essere portato in condizioni di sottoraffreddamento, e in tal caso il punto A verrebbe a cadere a sinistra della curva del liquido saturo.

Come si può intuire, il sottoraffreddamento del liquido refrigerante conduce ad un aumento dell'effetto di refrigerazione.

Sul diagramma pressioni-entalpie, nella figura, esso corrisponde alla differenza tra l'entalpia nel punto C' meno l'entalpia del punto B' ($E_{F'} - E_{B'}$).

7.2.5 - *Equivalente termico del lavoro di compressione.*

Un lavoro meccanico può sempre essere trasformato in calore (per attrito, compressione ecc.).

Dalla termodinamica ci proviene la seguente relazione:

$$1 \text{ CV} = 632 \text{ Kcal/h} = 735 \text{ W}$$

La pressione e la temperatura del vapore vengono aumentate nella fase di compressione, entro il compressore.

Il lavoro richiesto per produrre questo effetto viene definito come lavoro di compressione ($E_D - E_F$).

7.2.6 - *Calore da smaltire*

Tutto il calore assorbito dal refrigerante (il calore dovuto all'effetto frigorifero più il lavoro di compressione) deve venire smaltito entro il condensatore.

In seguito a ciò il refrigerante torna allo stato liquido e può riprendere nuovamente il ciclo frigorifero.

Calore da smaltire = $E_D - E_A$ (senza sottoraffreddatore)

Calore da smaltire = $E_D - E_{A'}$ (con sottoraffreddatore)

7.2.7 - *Effetto utile del ciclo frigorifero*

E' il rapporto tra il calore utile sottratto per effetto frigorifero e l'equivalente termico del lavoro svolto dal compressore.

Naturalmente l'effetto utile del ciclo frigorifero varia con il variare delle temperature di evaporazione e di condensazione, ed è pure influenzato dalle perdite di resa di tipo meccanico nel circuito.

$$E_u = \frac{E_F - E_{B'}}{E_D - E_F}$$

7.3 - Il ciclo frigorifero ad assorbimento

L'effetto di refrigerazione può raggiungersi anche in modo diverso dal ciclo frigorifero a compressione, del quale abbiamo parlato nel precedente paragrafo.

Questo diverso sistema si traduce nel ciclo frigorifero ad assorbimento.

Intendiamoci, i principi fondamentali già esposti rimangono del tutto validi ed operanti anche in questo caso, solo che trovano una diversa applicazione.

Nel ciclo frigorifero ad assorbimento vi è comunque un refrigerante che sottrae calore da un luogo e lo smaltisce in un altro, ma questo refrigerante non è più fatto circolare dall'azione di un compressore; al suo posto troviamo due organi diversi: l'assorbitore ed il generatore.

Quest'ultimo, per il suo funzionamento, richiede la somministrazione dall'esterno di energia termica, ossia di calore.

Questa è la differenza fondamentale del ciclo frigorifero ad assorbimento rispetto a quello a compressione, la necessità di energia termica, anziché meccanica, per il mantenimento del ciclo stesso.

Il ciclo frigorifero ad assorbimento viene realizzato in due differenti sistemi fondamentali a seconda del refrigerante impiegato e della soluzione, così detta assorbente pure utilizzata:

- 1) refrigerante: ammoniaca;
assorbente: ammoniaca in soluzione acquosa
- 2) refrigerante: acqua;
assorbente: bromuro di litio in soluzione acquosa

Il ciclo frigorifero, le prestazioni e la necessaria sorgente di calore esterno, vengono a modificarsi, in pratica, a seconda del sistema adottato.

Per vedere in termini più completi il problema, possiamo anticipare che l'ammoniaca viene usata su piccole macchine, quali refrigeratori d'acqua con potenzialità fino a 50.000 frig/h.

Il ciclo frigorifero ad assorbimento con ammoniaca viene sfruttato anche per la realizzazione di frigoriferi domestici, fissi o per imbarcazioni e automezzi.

Per queste applicazioni il calore necessario per il mantenimento del ciclo frigorifero è ottenuto alimentando le macchine a gas (metano, GPL) che viene bruciato in un bruciatore nel corpo stesso della macchina (funzionante a fuoco diretto).

L'impiego del bromuro di litio avviene invece nelle grandi macchine refrigeratrici d'acqua per applicazioni nel condizionamento dell'aria o nella refrigerazione industriale con potenzialità comprese fra 300.000 frig/h e 4.000.000 frig/h e oltre.

In questo caso, l'energia termica per il mantenimento del ciclo, viene fornita sotto forma di acqua surriscaldata (107-150°C) o di vapore saturo a bassa pressione (0,5-1 Ate).

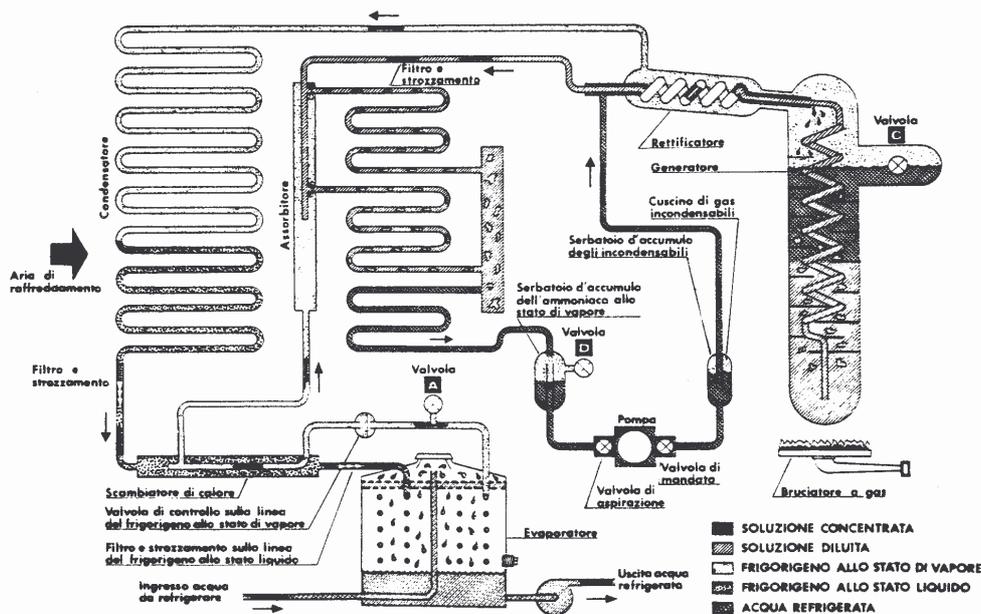
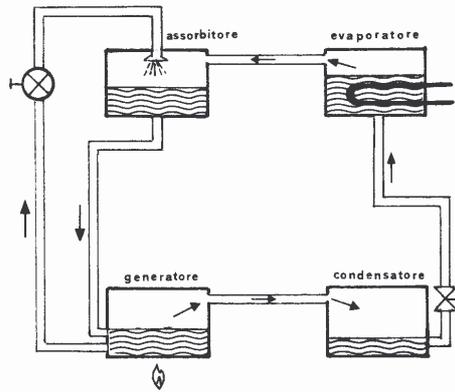
Non mancano macchine ad assorbimento a bromuro di litio, a fuoco diretto, con alimentazione perciò a gas metano o GPL, previste per potenzialità intermedie tra 40.000 e 150.000 frig/h.

Una caratteristica comune alle macchine funzionanti secondo il ciclo frigorifero ad assorbimento è l'assenza di parti mobili, tranne poche piccole pompe, che rende il funzionamento silenzioso e privo di vibrazioni.

Esaminiamo adesso da vicino i due diversi cicli frigoriferi ad assorbimento ai quali abbiamo accennato.

7.3.1 - Ciclo frigorifero ad assorbimento ammoniaca-acqua

Nella figura seguente è tracciato uno schema elementare di ciclo frigorifero ad assorbimento con refrigerante ad ammoniaca e assorbente a base di ammoniaca-acqua.



Schema di funzionamento di un ciclo frigorifero ad assorbimento ammoniacca-acqua

Sono presenti, oltre al condensatore e all'evaporatore, due nuovi organi, il generatore e l'assorbitore.

Nel generatore, dal quale facciamo iniziare il ciclo, è presente una soluzione molto concentrata di ammoniacca-acqua.

Per effetto del calore prodotto da un bruciatore a gas, una parte dell'ammoniaca evapora e giunge nel condensatore, che supponiamo sia raffreddato ad aria.

Dal generatore, la soluzione restante più diluita di ammoniaca-acqua che chiameremo *assorbente*, passa nell'assorbitore a mezzo di una pompa.

Frattanto nel condensatore, per effetto dell'aria di raffreddamento, l'ammoniaca condensa e passa allo stato liquido.

In tale stato l'ammoniaca passa nell'evaporatore dove assorbe calore dall'acqua da refrigerare che vi circola in un serpentino, raffreddandola, ed evapora passando allo stato di vapore.

Dall'evaporatore l'ammoniaca allo stato di vapore passa nell'assorbitore dove si combina con la soluzione diluita proveniente dal generatore, tornando allo stato iniziale.

Dall'assorbitore la soluzione concentrata ammoniaca-acqua ritorna nel generatore, da dove il ciclo ricomincia.

Come si vede, i concetti fondamentali già esposti, per quanto riguarda la produzione del freddo, non vengono alterati.

Vi è sempre un refrigerante, l'ammoniaca, che sfruttando il proprio elevato calore latente di vaporizzazione sottrae calore da un fluido (l'acqua da refrigerare) nell'evaporatore, e lo smaltisce in un altro fluido (l'aria di raffreddamento), nel condensatore.

In pratica, il generatore e l'assorbitore svolgono le funzioni del compressore.

Uno schema di ciclo frigorifero reale ad assorbimento ed ammoniaca è quello tracciato nella figura successiva.

Osserviamo che tra la batteria del condensatore e la batteria dell'evaporatore è interposta una valvola di strozzamento che ha la funzione di regolare il flusso di ammoniaca all'evaporatore e di ridurne la pressione.

La camera dell'assorbitore svolge, agli effetti del refrigerante allo stato di vapore proveniente dall'evaporatore, funzioni analoghe al lato di aspirazione di un compressore in un circuito alternativo.

Quando il vapore refrigerante e la soluzione diluita proveniente dal generatore giungono a contatto, il refrigerante viene rapidamente riassorbito e questo effetto è responsabile di una riduzione di pressione nell'assorbitore che mantiene il flusso di vapore refrigerante proveniente dall'evaporatore.

Allo scopo di accelerare il processo di assorbimento la soluzione diluita, *assorbente* viene spruzzata nell'assorbitore per aumentarne la superficie di contatto, mentre il refrigerante allo stato di vapore viene fatto fuoriuscire dal fondo dell'assorbitore, dove si accumula la soluzione diluita assorbente.

A mano a mano che la soluzione assorbente si combina con il refrigerante, la sua capacità di assorbimento diminuisce.

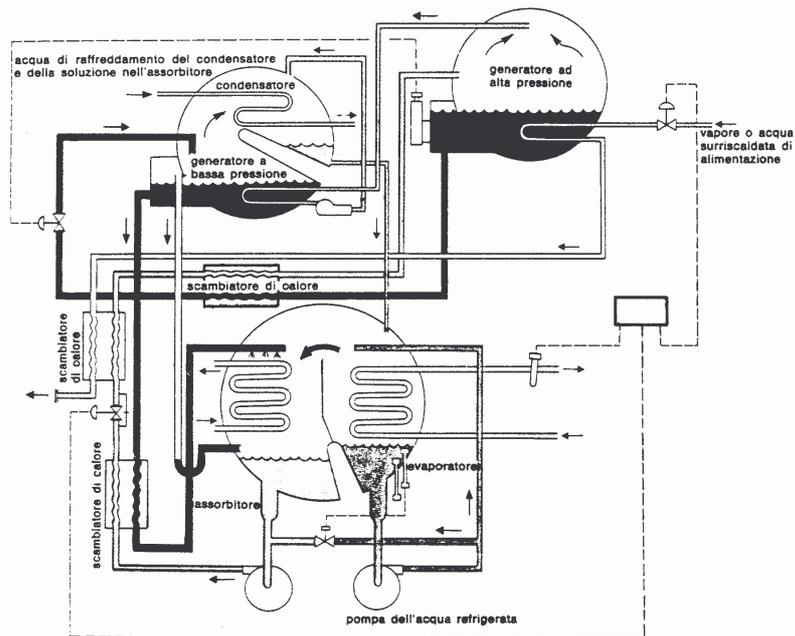
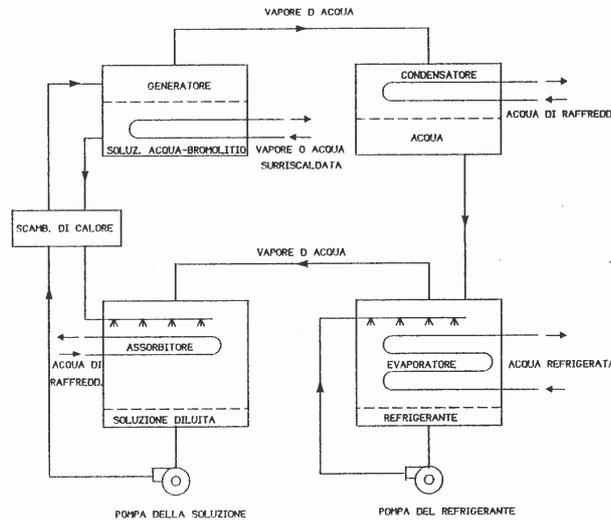
Una pompa riporta perciò con continuità la soluzione dall'assorbitore al generatore.

Nel generatore il calore prodotto dal bruciatore a gas eleva la temperatura della soluzione ammoniaca-acqua facendo sì che il refrigerante bolla e vaporizzi a pressione elevata.

Nel rettificatore il vapore caldo di ammoniaca si separa anche dalle più minute goccioline di acqua ed entra nel condensatore dove, per effetto dell'aria di raffreddamento, l'ammoniaca passa dallo stato di vapore a quello di liquido.

7.3.2 - Ciclo frigorifero ad assorbimento a bromuro di litio

Questo ciclo (vedi la figura seguente) è concettualmente simile al precedente, viene però mantenuto utilizzando acqua come refrigerante e sali di bromuro di litio in soluzione acquosa come assorbente.



Schema di funzionamento di un ciclo frigorifero ad assorbimento a bromuro di litio

Prima di iniziare ad esaminarne il funzionamento dobbiamo però introdurre una nozione basilare.

E' esperienza comune come il cloruro di sodio, il normale sale da cucina, assorba il vapore di acqua.

Nelle giornate molto umide il sale assorbe vapore d'acqua dall'aria; ebbene, i sali di bromuro di litio presentano anch'essi questa caratteristica in maniera spiccata, essi cioè tendono ad assorbire il vapore d'acqua.

In linguaggio chimico si dice che essi presentano affinità per il vapore d'acqua.

Ai fini pratici è come dire che lo assorbono, d'onde il nome *assorbente* ai sali di bromuro di litio in soluzione.

Per cominciare, immaginiamo di avere due vasi, nei quali si sia fatto il vuoto, chiusi e collegati tra loro.

In uno di essi, che chiameremo evaporatore, avremo posto dell'acqua, mentre nell'altro, che chiameremo assorbitore, avremo posto dei sali di bromuro di litio disciolti in acqua.

L'acqua a pressione ridotta bolle ed evapora a bassa temperatura.

Il vapore d'acqua, espandendosi, raggiungerà l'altro vaso dove verrà assorbito dalla soluzione di bromuro di litio con continuità; l'acqua nell'evaporatore pertanto continuerà ad evaporare.

Questa evaporazione continua fa sì che l'acqua rimasta si raffreddi, poiché l'evaporazione stessa avviene a spese di un certo quantitativo di calore.

Viene in tal modo a prodursi un *effetto di refrigerazione*.

Per sfruttare meglio questo effetto di refrigerazione i due vasi possono venire modificati come in figura.

Nell'evaporatore è aggiunta una serpentina entro la quale circola l'acqua da raffreddare.

Una pompa collegata a una rete ugelli situata al di sopra della serpentina prende l'acqua dal fondo dell'evaporatore per spruzzarla, aumentandone la superficie di scambio termico, sopra la serpentina.

Frattanto, il continuo assorbimento di vapore d'acqua da parte della soluzione assorbente fa sì che essa si diluisca eccessivamente perdendo il proprio potere di assorbimento.

Per ripristinare la concentrazione dell'assorbente al giusto valore viene aggiunto il generatore (vedi figura).

Dall'assorbitore la soluzione diluita viene pompata nel generatore.

Qui il calore fornito dall'esterno, mediante acqua surriscaldata o vapore saturo a bassa pressione in una apposita serpentina, provoca l'evaporazione del vapore d'acqua in eccesso dalla soluzione assorbente.

La soluzione di bromuro di litio, riportata così al giusto valore di concentrazione, viene rinviata nell'assorbitore.

Frattanto, il vapore d'acqua estratto dalla soluzione assorbente viene inviato nel condensatore (vedi figura).

Qui esso, per effetto dell'acqua di raffreddamento, condensa sotto forma d'acqua e viene fatto piovere nell'evaporatore per supplire al vapore d'acqua che viene man mano assorbito nell'assorbitore.

7.4 - Caratteristiche dei fluidi refrigeranti

Abbiamo ora un quadro abbastanza generale di quanto avviene in un circuito frigorifero reale e possiamo pertanto delineare le caratteristiche auspicabili che deve avere un fluido refrigerante ottimale.

Operiamo innanzitutto una distinzione tra proprietà termodinamiche e proprietà fisiche.

7.4.1 - Proprietà termodinamiche

- 1) Le pressioni corrispondenti alle temperature di evaporazione comuni, per la maggior parte delle applicazioni devono essere al di sopra della pressione atmosferica, onde evitare ingressi d'aria o di vapore d'acqua nel circuito frigorifero in seguito a perdite.
- 2) E' auspicabile che il refrigerante disponga di un elevato calore latente di vaporizzazione, in modo che la necessaria asportazione di calore possa avvenire con la minima quantità di refrigerante.
- 3) Il refrigerante allo stato di vapore deve disporre di un ridotto volume specifico, poiché è in base ad esso che viene stabilita la cilindrata del compressore.
- 4) Le pressioni corrispondenti alle temperature disponibili dai comuni fluidi impiegati per la condensazione (aria o acqua) devono risultare relativamente ridotte, onde evitare la necessità di costruzioni eccessivamente pesanti.
- 5) Il fluido refrigerante allo stato liquido deve avere un ridotto calore specifico.

In questo modo per portare il liquido alla temperatura di condensazione all'evaporatore, si richiederà l'asportazione di una ridotta quantità di calore.

Questa fase avviene nella valvola di regolazione per evaporazione di una parte di frigorifero, con conseguente raffreddamento del frigorifero liquido a monte della valvola stessa.

Naturalmente il raffreddamento del refrigerante liquido va a discapito della potenzialità frigorifera ottenibile.

Pertanto quanto più è ridotto il calore specifico del liquido refrigerante, tanto minore sarà il quantitativo di liquido che dovrà evaporare, per il raffreddamento del liquido restante, e perciò tanto maggiore sarà la potenza frigorifera fornita.

7.4.2 - Proprietà fisiche

- 1) I refrigeranti dovrebbero essere non infiammabili e non tossici.
- 2) Essi devono essere compatibili con i normali olii lubrificanti, e non dovrebbero limitare l'efficacia dei lubrificanti stessi.
- 3) I refrigeranti dovrebbero essere di basso costo, facilmente maneggiabili e di agevole disponibilità.
- 4) Essi non devono essere corrosivi per i metalli utilizzati normalmente nei circuiti frigoriferi.
- 5) Infine devono poter essere facilmente rilevabili, per consentire l'individuazione di eventuali perdite nei circuiti frigoriferi.

7.5 - I refrigeranti piu' comuni

Ammoniaca

L'ammoniaca è uno dei refrigeranti di più vecchia applicazione.

E'ancora tutt'oggi molto usata nella refrigerazione industriale, a causa delle sue elevate caratteristiche d'impiego.

L'ammoniaca ha un ridotto volume specifico, un calore latente di vaporizzazione relativamente elevato e un costo contenuto.

Tuttavia, a scapito di queste buone proprietà, l'ammoniaca è limitata al settore industriale ed esclusa da applicazioni di condizionamento per scopi di benessere poiché essa è tossica e infiammabile.

Essa presenta inoltre un odore particolarmente penetrante.

Secondo la classifica *ASHRAE* l'ammoniaca è indicata come R-717.

Anidride carbonica

L'anidride carbonica è un gas inerte, incolore, inodore.

Non è tossico nè infiammabile, ma richiede elevate pressioni di lavoro.

Questa condizione unitamente all'apprezzabile potenza richiesta per il compressore ne hanno limitato l'impiego.

Secondo la classifica *ASHRAE*, l'anidride carbonica è indicata come R-744.

Refrigeranti alogenati

I refrigeranti alogenati sono oggi i più ampiamente usati.

Essi sono inodori in concentrazione fino al 20% di volume nell'aria mentre, a concentrazioni maggiori, l'odore rassomiglia all'etere, ma meno intenso.

I vapori di questi refrigeranti sono non irritanti e atossici.

I vapori ed i liquidi di questi refrigeranti non sono infiammabili e combustibili, poiché non contengono elementi che possono alimentare la combustione.

Essi non risultano corrosivi per i metalli normalmente impiegati nelle macchine di refrigerazione, fintanto che i refrigeranti rimangono liberi da vapore d'acqua.

In presenza di vapore d'acqua questi refrigeranti possono divenire abbastanza corrosivi.

Essi svolgono una spiccata azione solvente sulla gomma naturale, ma non sui prodotti sintetici, che possono pertanto venire usati in modo soddisfacente.

Sia allo stato liquido, sia allo stato di vapore, questi refrigeranti non alterano l'odore, il sapore, il colore e la struttura dei prodotti raffreddati, come nel caso di alimenti freschi: carni, ortofruttili, ecc.

Nella tabella della figura seguente sono elencate le caratteristiche essenziali dei refrigeranti più comuni.

Refrigeranti e loro proprietà

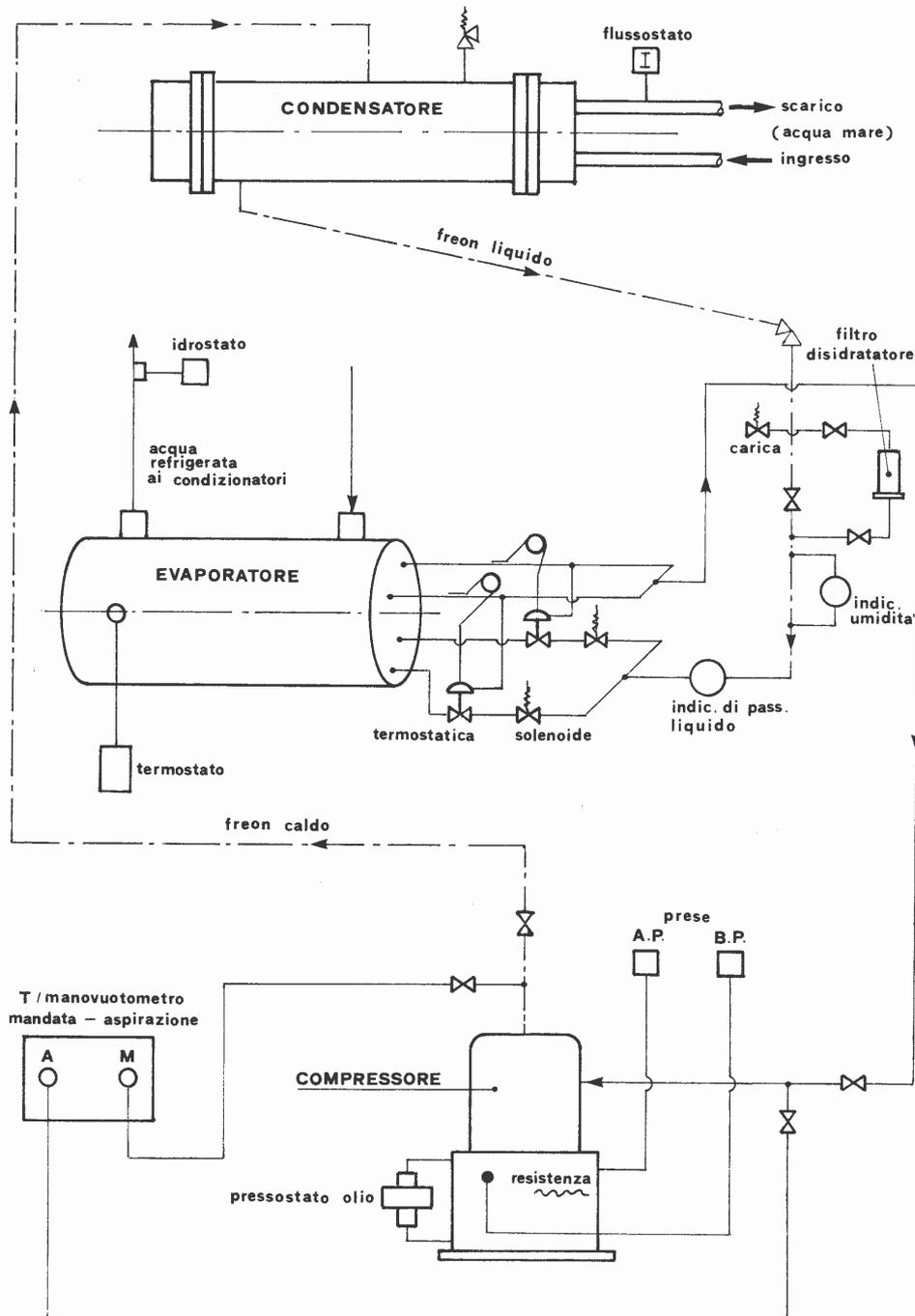
Gruppo	Numero Refrigerante R o F	NOME CHIMICO	Formula Chimica	Peso Molecolare	Costante R del gas	Punto di ebollizione a 1 atm.	Punto di solidificazione a 1 atm.	Temperatura critica	Pressione critica assoluta	Temperatura di ignizione
					$\frac{\text{Kgf} \cdot \text{m}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	Kgf / cm^2	$^\circ\text{C}$
1	11	Triclorofluorometano	CCl_3F	137,4	6,17	23,8	- 111	198	44,6	—
	12	Diclorodifluorometano	CCl_2F_2	120,9	7,01	29,8	- 158	112	42,0	—
	13	Clorotrifluorometano	CClF_3	104,5	8,12	- 81,5	- 181	28,8	39,4	—
	1381	Bromotrifluorometano	CBrF_3	148,9	5,7	- 58	- 168	67	40,4	—
	21	Diclorofluorometano	CHCl_2F	102,9	8,24	8,92	- 135	- 178,3	52,7	—
	22	Clorodifluorometano	CHClF_2	86,5	9,81	- 40,8	- 160	96	50,3	—
	113	Triclorotrifluoroetano	$\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$	187,4	4,53	47,7	- 35	214,1	34,8	—
	114	Diclorotetrafluoroetano	$\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4$	170,9	4,96	3,5	- 94	145,7	33,4	—
	115	Cloropentafluoroetano	C_2ClF_5	154,5	5,49	- 38,7	- 106	80	31,8	—
	C318	Octofluorociclobutano	C_4F_8	200,0	4,24	- 5,9	- 41,4	115	28,4	—
	500	R 12(73,8%) + R 152(26,2%)	$\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{C}_2\text{H}_4\text{F}_2$	99,3	8,54	- 28	- 159	105	44,3	—
	502	R 22(48,8%) + R 115(51,2%)	$\text{CHClF}_2/\text{C}_2\text{ClF}_3$	111,6	7,60	- 45,6	—	90	43,5	—
		Anidride carbonica	CO_2	44	19,27	- 78,5	- 56,6	31	75,2	—
2	30	Ammoniaca	NH_3	17	49,79	- 33,3	- 77,9	132,4	115,2	651
	40	Diclorometano (cloruro di metilene)	CH_2Cl_2	84,9	9,98	40,1	- 96,7	250	47,0	—
		Cloruro di metilene	CH_3Cl	50,5	16,80	- 24	- 97,6	143	68,1	632
		Formato di metilene	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	60	14,13	31,2	- 104,4	214	61,2	456
		Anidride solforosa	SO_2	64	13,24	- 10,0	- 75,5	157,5	80,4	—
	160	Cloruro di etilene	$\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$	64,5	13,15	12,5	- 138,7	187,2	53,7	519
	1130	Dicloroetilene	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$	96,9	8,75	48,5	- 56,7	243	54,4	458
3	170	Etano	C_2H_6	30	28,20	- 88,6	- 183	- 32,1	50	580
	290	Propano	C_3H_8	44	19,23	- 42,8	- 188	96,8	43,4	525
	600	Butano	C_4H_{10}	58,1	14,60	0,5	- 136	152,8	36,2	500
	601	Isobutano	$(\text{CH}_3)_2\text{CH}$	58,1	14,60	- 10,2	- 145	133,7	37,7	530
	1150	Etilene	C_2H_4	28	30,20	-103,7	- 169,4	9,5	51,6	540

Secondo la classifica *ASHRAE* i refrigeranti alogenati più comuni sono indicati come: R-12, R-22, R-500, R-502.

CAP.8 - COMPONENTI PRINCIPALI DI UN IMPIANTO FRIGORIFERO

8.1 - Introduzione

Lo schema completo di una centrale frigorifera per condizionamento di bordo è rappresentato nella figura seguente.



Schema di centrale frigorifera

Essa comprende i seguenti elementi fondamentali: compressore, condensatore, evaporatore e dispositivi di regolazione del fluido refrigerante.

E' molto importante perciò esaminarli da vicino e conoscerne le caratteristiche fondamentali.

8.2 - Il compressore

Il compressore costituisce il cuore del circuito frigorifero; esso mantiene la circolazione del fluido refrigerante nel circuito.

Si può dire pertanto che la funzione del compressore è di prelevare il vapore refrigerante a bassa pressione e a bassa temperatura per portarlo a valori più elevati di pressione e temperatura.

Come conseguenza si hanno i seguenti due effetti:

- 1) Nell'evaporatore si verifica un abbassamento della pressione e della temperatura del fluido refrigerante. In questo modo il refrigerante può assorbire calore dall'ambiente circostante.
- 2) Nel condensatore si verifica un aumento della pressione e della temperatura del fluido refrigerante. In questo modo il refrigerante può cedere calore al fluido di raffreddamento (acqua o aria) disponibile.

Questa differenza di pressione tra il lato di ingresso (aspirazione) e il lato di uscita (mandata) del compressore, mantiene la circolazione del fluido refrigerante nel circuito frigorifero.

Esistono diversi tipi di compressori, classificabili come segue:

a) compressori alternativi:

- di tipo aperto
- di tipo semiermetico
- di tipo ermetico

b) compressori a vite

c) compressori rotativi

d) compressori centrifughi

- di tipo aperto
- di tipo ermetico

Oggi, i compressori di gran lunga più diffusi, sono quelli alternativi.

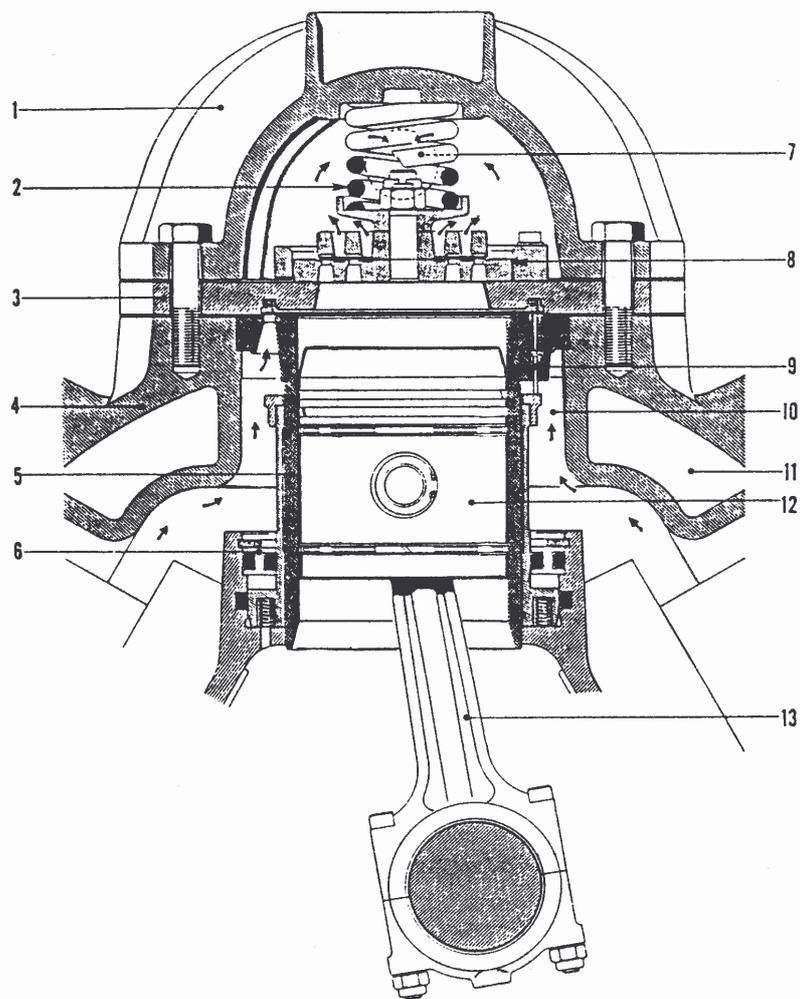
Trovano un crescente interesse, peraltro, i compressori a vite.

I compressori rotativi, di tipo ermetico, si ritrovano talvolta su apparecchi di ridotta potenzialità.

I compressori centrifughi fanno parte dei gruppi refrigeratori di grande potenzialità.

8.2.1 - Compressori alternativi

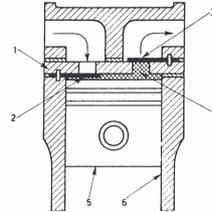
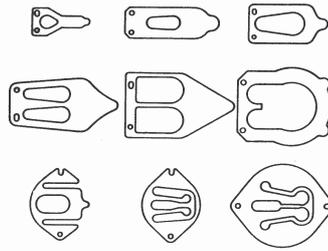
Nei compressori alternativi, uno o più pistoni scorrono all'interno di un cilindro, similmente a quanto avviene nel motore di un'automobile, effettuando l'aspirazione e la compressione del fluido refrigerante (vedi la figura seguente).



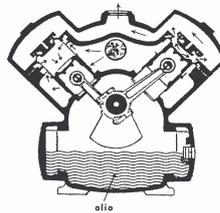
- 1 - TESTATA
- 2 - MOLLE DI SPINTA PER LA VALVOLA DI MANDATA
- 3 - PIASTRA VALVOLE
- 4 - INCASTELLATURA
- 5 - CAMICIA
- 6 - DISPOSITIVO ALZAVALVOLE
- 7 - CONDOTTO DI MANDATA
- 8 - VALVOLA DI MANDATA
- 9 - SPILLI ALZAVALVOLE
- 10 - CAMERA DI ASPIRAZIONE
- 11 - CAVITA' DI CIRCOLAZIONE DELL'ACQUA DI RAFFREDDAMENTO
- 12 - STANTUFFO
- 13 - BIELLA

Sezione di un cilindro di un compressore alternativo

Ciascun cilindro dispone di una valvola di aspirazione del gas refrigerante (attraverso la quale il fluido accede nel cilindro durante la fase di aspirazione) e di una valvola di mandata (attraverso la quale il fluido refrigerante viene scaricato verso il condensatore dopo essere stato compresso) del tipo mostrato nella figura seguente:

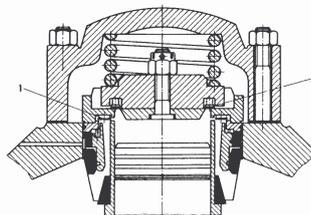


Disposizione valvole sulla testata del cilindro.
 1, piastra valvole; 2, valvola di aspirazione; 3, valvola di mandata; 4, spazio nocivo;
 5, pistone; 6, cilindro.

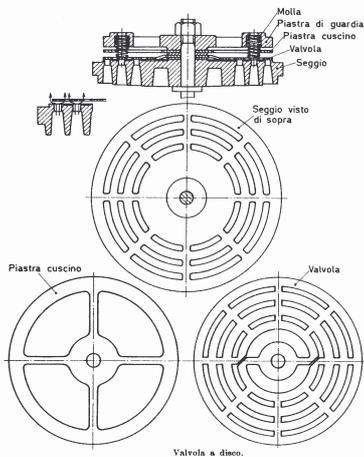


Flusso del frigorigeno in un compressore alternativo

e del tipo mostrato nella figura seguente:



Valvole ad anello.
 1, valvola di aspirazione; 2, valvola di mandata.



I compressori alternativi vengono detti aperti quando un'estremità dell'albero a gomiti sporge all'esterno del carter.

Il motore di trascinamento di questi compressori può essere un motore elettrico (come si verifica nella maggior parte delle applicazioni fisse) o un motore a combustione interna nel caso di applicazioni mobili.

I compressori aperti possono venire accoppiati fondamentalmente in due modi diversi al motore elettrico di trascinamento: mediante pulegge e cinghie o in modo diretto mediante giunto elastico.

Con l'accoppiamento mediante pulegge e cinghie si riesce ad ottenere qualsiasi velocità di rotazione voluta per il compressore, semplicemente variando i rapporti tra i diametri delle due pulegge.

Con l'accoppiamento diretto il compressore viene trascinato alla stessa velocità del motore elettrico, la quale dipende dalla frequenza della tensione di alimentazione.

I compressori alternativi vengono detti semiermetici quando sia il compressore vero e proprio, sia il relativo motore elettrico di trascinamento, sono contenuti in un medesimo involucro ispezionabile per la manutenzione.

Le testate dei cilindri rimangono normalmente accessibili per la manutenzione.

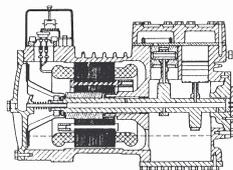
E' importante notare che l'albero motore e l'albero a gomiti del compressore costituiscono un tutto unico.

In questi compressori, il gas refrigerante a bassa temperatura aspirato dall'evaporatore, ha il compito di raffreddare gli avvolgimenti del motore prima di subire la fase di compressione.

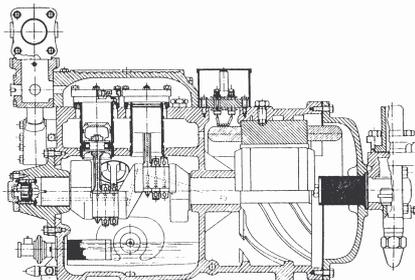
I compressori semiermetici trovano oggi un ampio campo di applicazioni, sia nelle macchine di condizionamento sia nei gruppi refrigeratori di acqua.

La loro costruzione è tale da impedire l'ingresso d'aria e di polveri; d'altra parte la possibilità di accesso per il servizio consente di intervenire liberamente nel caso di guasti o anomalie.

I compressori alternativi vengono detti ermetici quando motore e compressore vero e proprio sono racchiusi in un medesimo involucro saldato e sigillato (vedi la figura seguente).



Sezione di un compressore ermetico accessibile con albero ad eccentrici



Sezione di un compressore ermetico accessibile con albero a gomiti

In questo modo non vi è possibilità di accesso alle parti interne per il servizio.

Anche nei compressori ermetici l'albero motore e l'albero a gomiti costituiscono un insieme unico.

Il fluido refrigerante aspirato raffredda anche qui gli avvolgimenti del motore, prima di venire compresso.

I compressori ermetici sono oggi ampiamente usati: frigoriferi e congelatori domestici, condizionatori d'ambiente, unità di condizionamento di media potenzialità e gruppi refrigeratori d'acqua, costituiscono altrettante applicazioni per questi apparecchi.

8.2.2 - Controllo della capacità frigorifera nei compressori alternativi

Nella maggior parte delle applicazioni i carichi termici variano in modo piuttosto ampio durante il normale esercizio.

In mancanza di un adeguato dispositivo di controllo della capacità frigorifera del compressore, al ridursi dei carichi termici avremmo un abbassamento della pressione di aspirazione (abbiamo già visto come questa sia una condizione da evitare) e per intervento di un apposito dispositivo di protezione, il compressore viene escluso dal servizio.

Successivamente, all'aumentare del carico termico, il compressore viene fatto ripartire.

Tuttavia, questa non è una condizione favorevole, nè al fine del soddisfacimento dei carichi termici, nè al fine del buon funzionamento del compressore, costretto a frequenti arresti ed avvii.

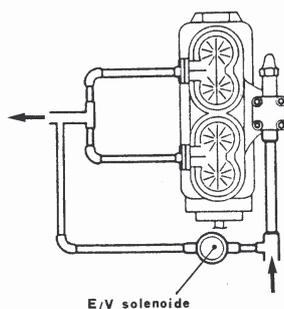
Allo scopo di ottimizzare sia il trattamento dei carichi termici, sia il funzionamento del compressore, si è studiata una serie di dispositivi in grado di variare la capacità frigorifera del compressore entro margini anche molto ampi, consentendo al tempo stesso un funzionamento quanto più uniforme.

I metodi oggi più comunemente impiegati sono quattro:

- 1) impiego di motori elettrici di trascinamento a velocità variabile
- 2) by-pass del gas di mandata verso l'aspirazione
- 3) by-pass di una testata di cilindri
- 4) parzializzazione di uno o più cilindri

L'impiego di motori elettrici a velocità variabile è attualmente limitato ad applicazioni speciali, dato l'alto costo di questa soluzione.

Un circuito di by-pass del gas caldo di mandata verso l'aspirazione del compressore è schematizzato nella figura seguente.



Come si può vedere sulla mandata del compressore è realizzata una linea di by-pass che ritorna al lato di aspirazione.

La linea risulta normalmente chiusa da una valvola a solenoide (si tratta di una normale valvola tutto/niente ad azione elettromagnetica).

Quando la richiesta di potenzialità frigorifera diminuisce la valvola si apre ed una parte del gas caldo di mandata torna al lato di aspirazione del compressore.

In questo modo, l'effettiva capacità del compressore viene ridotta in proporzione al volume di gas by-passato.

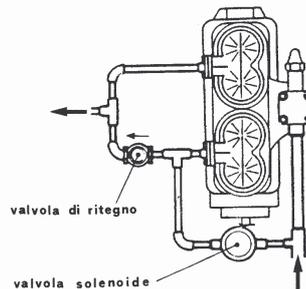
La valvola a solenoide può venire controllata da dispositivi sensibili alla pressione o alla temperatura, secondo il tipo di applicazione.

Questo sistema di controllo di capacità, sebbene riduca la potenza frigorifera resa dal compressore, non comporta apprezzabili riduzioni della potenza elettrica assorbita dal motore, infatti i volumi di gas aspirati e compressi non subiscono riduzioni.

Sicchè, tanto a pieno carico quanto a carico ridotto, il consumo elettrico risulterà praticamente il medesimo.

Il by-pass di una testata di cilindri viene effettuato in modo non molto dissimile dal sistema precedentemente descritto, ma ne costituisce un notevole perfezionamento ed è oggi ampiamente applicato nell'industria del condizionamento.

Nella figura seguente è riportato uno schema di principio di funzionamento di questo sistema.



Quando la richiesta di potenzialità frigorifera si riduce, si apre la valvola solenoide (o pressostatica) e il gas di mandata da una testata di cilindri viene by-passato alla presa di aspirazione.

La valvola di ritegno impedisce che la pressione di mandata degli altri cilindri si trasmetta sulla testata isolata.

In questo modo, per effetto del by-pass, le pressioni di mandata e di aspirazione nei cilindri controllati vengono ad equipararsi.

I pistoni cessano pertanto di compiere lavoro utile.

Con questo metodo, la potenza assorbita dal motore diminuisce in modo quasi direttamente proporzionale alla riduzione della capacità frigorifera.

Questo sistema di controllo di capacità viene applicato in larga misura sui compressori di tipo semiermetico.

Il sistema di parzializzazione dei cilindri costituisce un ulteriore metodo per effettuare il controllo della capacità frigorifera dei compressori.

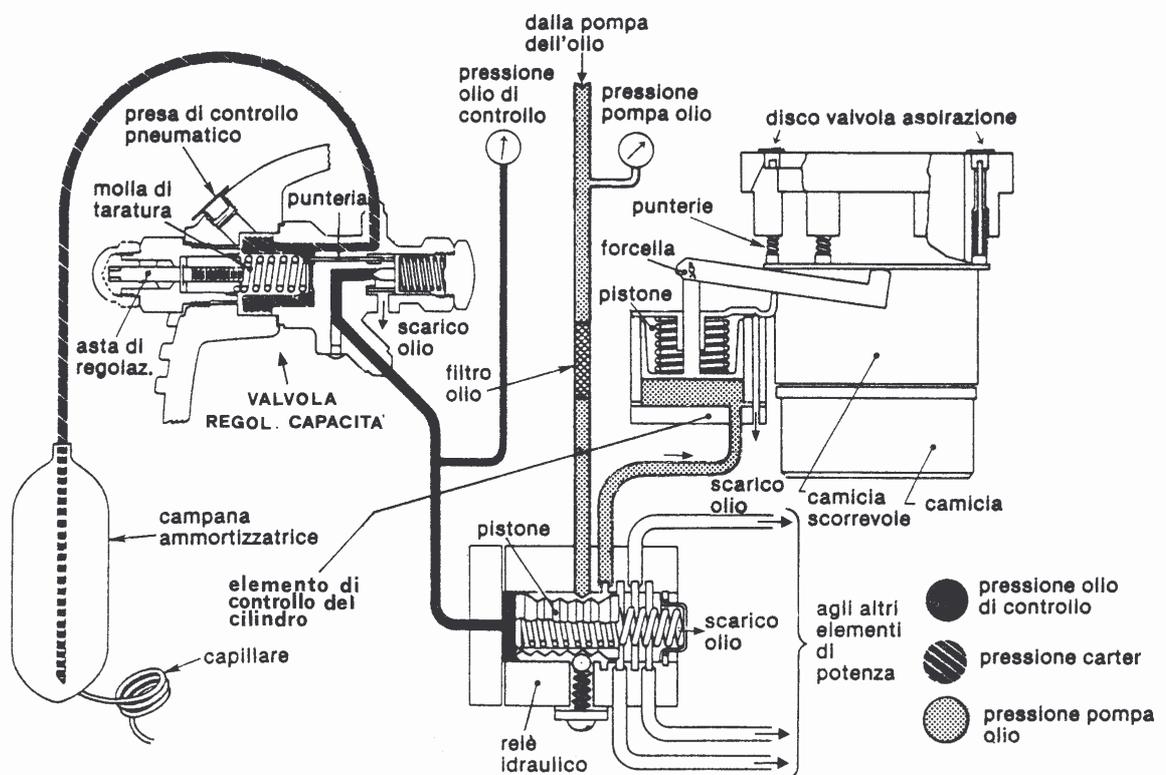
Esso si basa fondamentalmente sul mantenimento in posizione di apertura della valvola di aspirazione del cilindro controllato, impedendo così la compressione del gas refrigerante.

In questo modo, il pistone pur muovendosi entro il cilindro non riesce a comprimere gas, che viene aspirato e sfogato sempre attraverso la valvola di aspirazione, mantenuta costantemente aperta.

E' possibile disporre di tanti gradini di parzializzazione, nel funzionamento del compressore, pari al numero totale dei cilindri, poiché ogni cilindro può venire controllato.

Anche con questo sistema, la potenza assorbita dal motore di trascinamento viene a ridursi in proporzione alla riduzione della capacità frigorifera.

Nella figura seguente è riportato lo schema di funzionamento di un dispositivo di parzializzazione dei cilindri in un compressore alternativo aperto.



Schema del circuito di controllo della capacità frigorifera mediante sistema alzavalvole dell'aspirazione di un compressore alternativo

Questo dispositivo si compone essenzialmente di tre elementi distinti: La valvola di controllo di capacità, il relè idraulico e l'elemento di controllo del cilindro mediante comando delle valvole di aspirazione.

La valvola di controllo di capacità, può venire comandata dalla pressione esistente nella linea di aspirazione, che risulta proporzionale alla capacità frigorifera richiesta.

Con l'aumentare o il diminuire della pressione, la valvola di controllo di capacità aumenta o diminuisce (rispettivamente) la pressione dell'olio di controllo al relè idraulico.

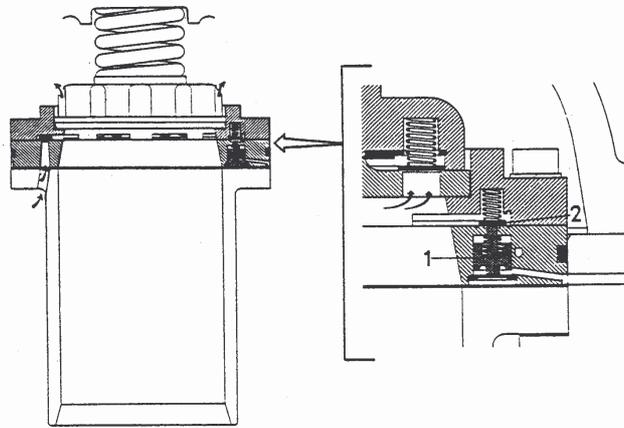
Il relè idraulico, a propria volta, trasmetterà o meno la pressione dell'olio (generalmente prelevata dalla pompa dell'olio del compressore) all'elemento di controllo del cilindro.

Quando all'elemento di controllo del cilindro perviene la piena pressione dell'olio, esso alzerà il pistone di comando della forcella, la quale chiuderà le valvole di aspirazione caricando il compressore.

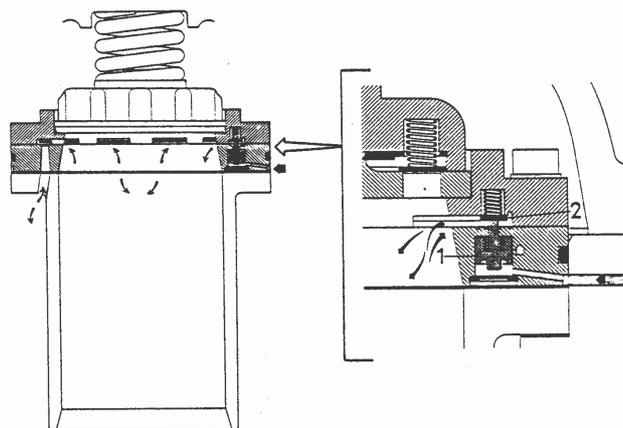
Viceversa, quando all'elemento di controllo la pressione dell'olio è nulla, il pistone si abbasserà alzando le valvole di aspirazione e scaricando così il compressore.

Questa soluzione permette anche di realizzare l'avviamento a vuoto del compressore in quanto durante i primi giri la pressione dell'olio elaborata dalla pompa di lubrificazione è praticamente nulla.

In questo modo la corrente di spunto all'avviamento viene mantenuta a valori accettabili. Nella figura seguente è rappresentato un'altro esempio di parzializzazione dei cilindri.



A - Il circuito del gas non è in pressione e il dispositivo alzavalvole 1 consente al disco della valvola di aspirazione 2 di funzionare liberamente determinando il funzionamento del compressore.



B - Il circuito del gas è in pressione e determina il sollevamento dei pistoncini alzavalvole 1 che, sollevando l'anello della valvola 2, determinano il funzionamento a vuoto dello stantuffo.

Esempio di sistema di parzializzazione mediante alzivalvole

8.2.3 - Compressori a vite

I compressori a vite sono apparsi relativamente di recente e risultano contraddistinti da un principio di funzionamento diverso rispetto alle macchine alternative.

Il gas refrigerante viene aspirato e compresso con continuità entro le sedi filettate di due rotori ingrananti l'uno nell'altro.

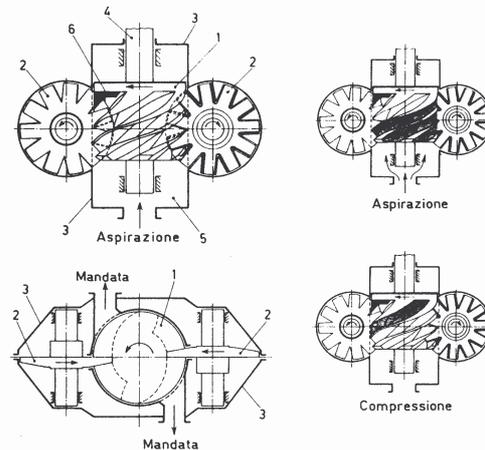
In questo modo l'aspirazione del gas refrigerante avviene da una delle due estremità del blocco rotori, il lato d'inizio del moto, la dove i rotori dei due lobi si presentano a sezioni libere, prima di iniziare il mutuo inserimento.

La compressione del gas avviene per effetto del progressivo inserimento dei lobi l'uno nell'altro che provoca la riduzione del volume occupato dal gas.

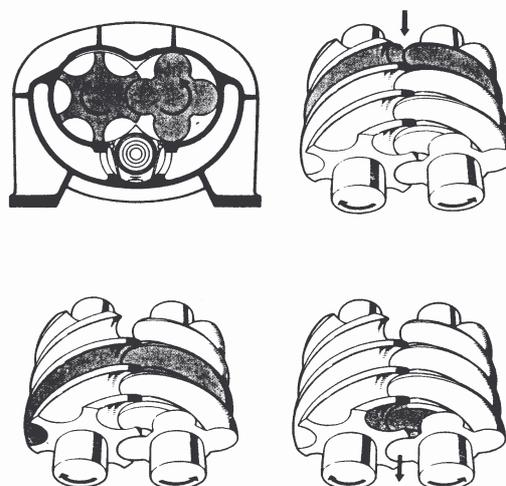
La compressione ha termine all'estremità opposta del corpo rotori, quando il gas, raggiunto il valore di pressione prestabilito, incontra la luce di scarico e fuoriesce dal compressore.

Un esempio di compressore a vite è il compressore Grasso-Monoscrew.

Esiste qui un solo rotore cilindrico, filettato elicoidalmente, nel quale ingranano due pignoni identici e opposti, situati sullo stesso piano che attraversa l'asse del rotore (vedi figura seguente).



Compressore monovite globoidale. Schema di funzionamento.
 1, vite globoidale; 2, ruote di separazione; 3, corpo compressore; 4, asse rotore;
 5, camera di aspirazione; 6, luce di mandata.



Il rotore ed i pignoni sono situati entro un opportuno carter.

Il gioco dei pignoni con il rotore è estremamente limitato, il rotore stesso viene mantenuto in rotazione da un motore elettrico esterno e trasmette un moto rotativo ai due pignoni.

Un problema cui bisogna porre particolare attenzione nei compressori a vite riguarda l'olio di lubrificazione.

Nei compressori alternativi infatti, i quantitativi d'olio che lasciano il compressore sono relativamente ridotti, le fascie raschia olio dei pistoni tendono a impedire che quantità eccessive d'olio fuggano mischiate al gas refrigerante di mandata.

D'altro canto l'olio migrato viene riportato al compressore per trascinamento meccanico dal gas di aspirazione e in questo modo il bilancio è ripristinato.

Nei compressori a vite, invece, le cose stanno in modo sensibilmente diverso; l'olio qui deve effettuare molteplici funzioni.

Deve innanzitutto assicurare la lubrificazione tra le scanalature dei rotori che ingranano tra loro, deve altresì mantenere la tenuta per rendere possibile la compressione del gas, e deve effettuare una forma di raffreddamento.

L'olio perciò viene emesso con continuità dal compressore a vite, insieme al gas refrigerante ad alta temperatura.

Vi è quindi la necessità di effettuare all'uscita del compressore una efficace separazione dell'olio dal gas refrigerante (che per taluni refrigeranti come l'R-22 può risultare difficile), quindi, raffreddare l'olio e reimmetterlo nel compressore.

Questa esigenza comporta per i compressori a vite la necessità di prevedere opportuni dispositivi che svolgano le funzioni descritte.

Questa condizione inevitabilmente comporta dei problemi di costo.

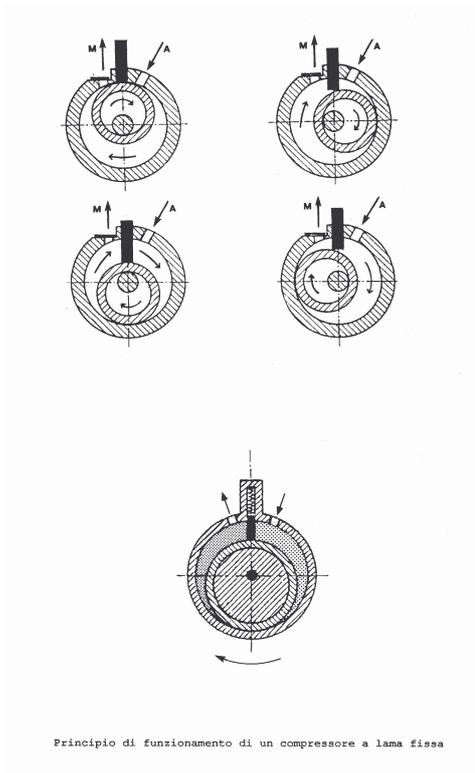
8.2.4 - Compressori rotativi

Il principio di funzionamento di questo tipo di compressori è basato fondamentalmente sulla rotazione di un rotore all'interno di un cilindro, in modo che il rotore stesso venga a trovarsi in posizione tangente in un punto del cilindro, fisso o corrente sulla intera circonferenza del cilindro stesso.

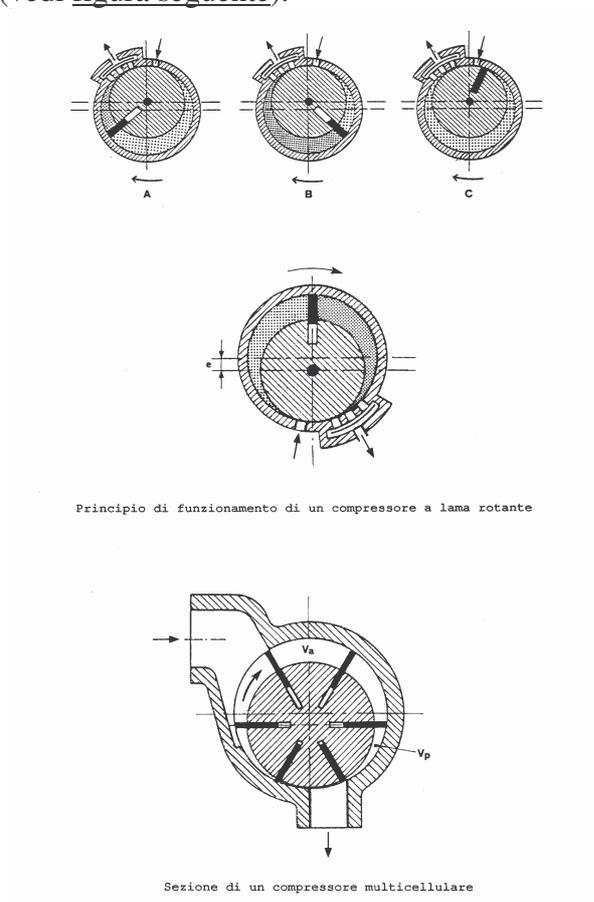
Vediamo di chiarire il concetto introducendo i due tipi fondamentali di compressori rotativi.

Questi infatti possono distinguersi come segue:

- 1) compressori nei quali il centro di rotazione del rotore (che non coincide con il suo centro geometrico) coincide con il centro del cilindro. Questi compressori vengono detti a lama fissa (vedi figura seguente).



- 2) compressori nei quali il centro di rotazione del rotore (che coincide con il suo centro geometrico) non coincide con il centro del cilindro. Questi compressori vengono anche detti a lame rotanti (vedi figura seguente).



Nei compressori a lama fissa il punto di tangenza tra il rotore e la camicia del cilindro si sposta continuamente sulla circonferenza di quest'ultimo, in senso corrispondente alla rotazione.

La lama fissa che aderisce al rotore per effetto di una molla, e che pertanto può avanzare e arretrare, separa le due zone di aspirazione e di compressione del gas refrigerante.

Il rotore nel suo movimento, come si è detto, sposta continuamente il proprio punto di tangenza sulla circonferenza del cilindro, comprimendo, da un lato, il gas e, dall'altro, aspirandolo.

I compressori a lame rotanti possono comprendere due o più lame situate entro il corpo stesso del rotore, che aderiscono per effetto di molle alla camicia del cilindro.

Il rotore, come si è detto, è eccentrico rispetto al cilindro e il suo punto di contatto con esso rimane fisso.

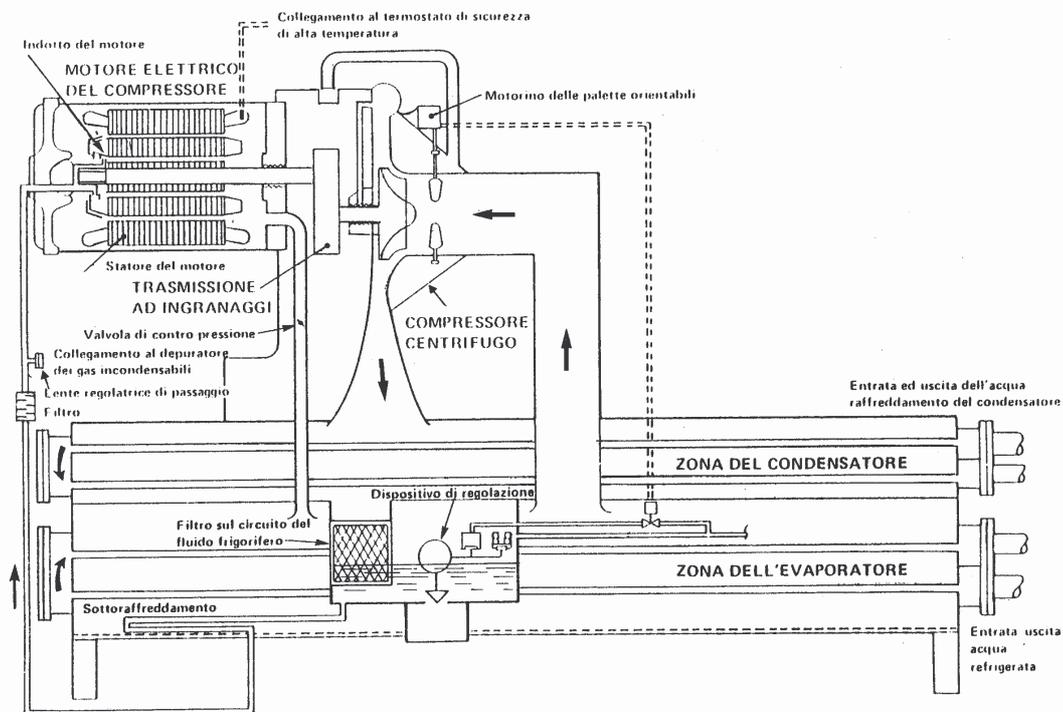
Sono in tal modo le lame che contribuiscono in modo fondamentale allo svolgimento delle fasi di aspirazione e compressione.

I compressori rotativi non hanno trovato finora una grande diffusione.

Essi, pur essendo disponibili in un campo di potenzialità abbastanza ampio, si ritrovano soprattutto sotto forma di unità ermetiche su apparecchi di piccola e media potenzialità.

8.2.5 - Compressori centrifughi

E' per la verità più esatto parlare di macchine frigorifere equipaggiate con compressori centrifughi, poichè questi non si trovano disponibili singolarmente (vedi figura seguente).



Schema di un impianto frigorifero con compressore centrifugo monostadio

Le macchine equipaggiate con compressore centrifugo sono realizzate per sviluppare grandi e grandissime potenzialità frigorifere.

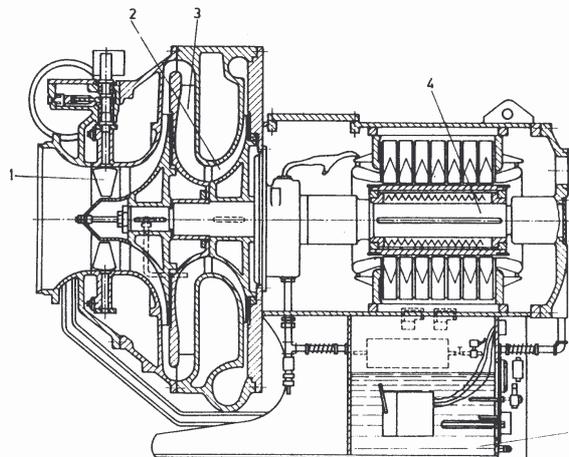
I compressori centrifughi sono costituiti essenzialmente da una girante situata all'interno di una opportuna camera, accoppiata ad un motore di trascinamento.

La girante viene fatta ruotare ad alta velocità; le palette della girante imprimono al gas refrigerante una energia cinetica elevata, sospingendolo attraverso la ristretta luce di mandata, aumentandone così la pressione.

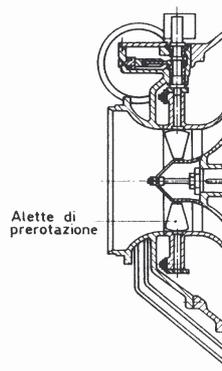
I compressori centrifughi trattano normalmente elevati volumi di gas refrigerante con ridotti rapporti di compressione.

I rapporti di compressione possono tuttavia venire elevati aumentando il numero delle giranti sull'asse di rotazione.

Nella figura seguente è rappresentato un compressore centrifugo a due stadi.



Compressore centrifugo a due stadi semiermetico Carrier.
1, alette di prerotazione per la riduzione della potenza; 2, girante; 3, diffusore; 4, motore;
5, serbatoio olio.



Compressore centrifugo.
Particolare alette di prerotazione.

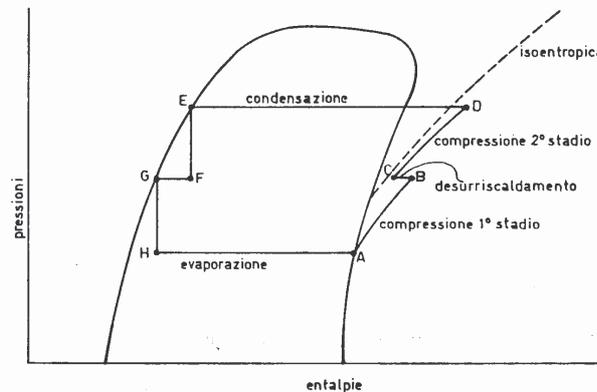
In tali impianti frigoriferi si può osservare talvolta la presenza di un elemento nuovo: *l'economizzatore*.

La sua funzione si spiega facilmente; nel passaggio dal condensatore all'evaporatore una parte del liquido refrigerante normalmente evapora raffreddando il liquido restante.

Il gas così evaporato viene addotto alla girante del secondo stadio del compressore, dove si miscela con il gas caldo proveniente dalla girante del primo stadio, raffreddandolo.

Così miscelato il gas viene poi compresso dalla girante del secondo stadio e inviato nel condensatore.

Il risultato di questo processo possiamo constatarlo sul diagramma pressioni entalpie della figura seguente.



Il gas refrigerante proveniente dall'evaporatore viene compresso e surriscaldato dalla girante del primo stadio, nel tratto AB.

Nel punto B esso però incontra il gas freddo proveniente dall'economizzatore, dal quale viene de-surriscaldato, nel tratto BC.

Il gas de-surriscaldato, viene compresso dalla girante del secondo stadio, nel tratto CD.

La fase di condensazione si protrae per il tratto DE, quindi il liquido refrigerante passa nell'economizzatore, dove una frazione del liquido refrigerante evapora, tratto EF.

Per effetto dell'evaporazione, il refrigerante liquido rimasto viene raffreddato, tratto FG, e passa all'evaporatore in condizione di liquido freddo, tratto GH.

Entro l'evaporatore si compie la evaporazione del refrigerante liquido, tratto HA.

L'economizzatore, quindi, realizza due diversi effetti:

- 1) riduce il lavoro del compressore centrifugo per il fatto che una parte del gas refrigerante passa direttamente alla girante del secondo stadio e desurriscalda il gas proveniente dalla girante del primo stadio;
- 2) aumenta l'effetto frigorifero poichè sposta il punto d'inizio dell'evaporazione del liquido refrigerante più a sinistra sul digramma pressioni-entalpie.

L'aumento di rendimento che ne consegue è intorno all'8-10%.

Il costo maggiore dovuto alla presenza dell'economizzatore è compensato dalla più elevata potenzialità resa disponibile.

I compressori centrifughi vengono realizzati in due tipi fondamentali:

- a) compressori centrifughi aperti;
- b) compressori centrifughi ermetici.

I compressori centrifughi aperti richiedono un motore esterno.

Viceversa, i compressori ermetici, dispongono di un motore elettrico incorporato, direttamente accoppiato alle giranti del compressore.

Il motore viene raffreddato dal refrigerante liquido fatto vaporizzare.

8.3 - Il condensatore

Il condensatore nel circuito frigorifero svolge la funzione di smaltire il calore assorbito dal refrigerante attraverso un fluido (acqua o aria).

Ricordiamo che il calore assorbito dal refrigerante è dato dalla somma del calore assorbito nell'evaporatore e dell'equivalente termico del calore di compressione.

Il fluido refrigerante giunge all'evaporatore in condizione di vapore surriscaldato, condensa cedendo il proprio calore al fluido di raffreddamento e ne esce in condizioni di liquido, spesso sottoraffreddato.

I condensatori si possono classificare in base al fluido di raffreddamento utilizzato.

Si hanno così attualmente tre tipi fondamentali di condensatori:

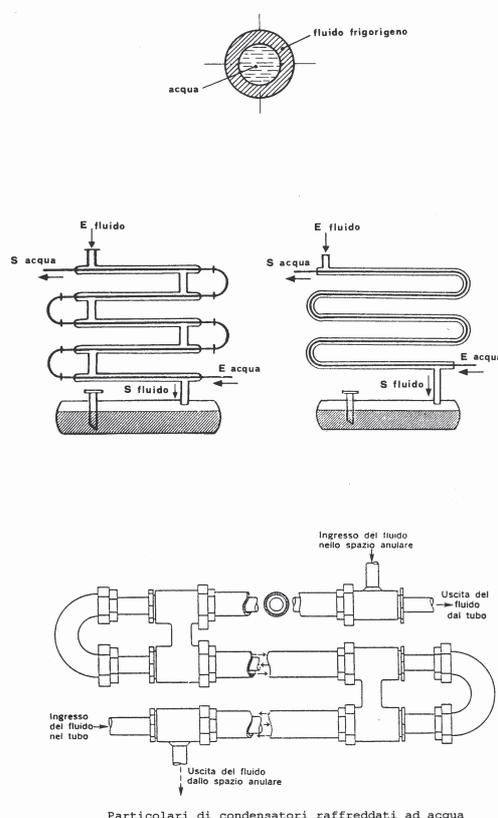
- raffreddati ad acqua;
- raffreddati ad aria;
- evaporativi (nei quali il raffreddamento è effettuato da una miscela acqua-aria).

Esaminiamone da vicino le rispettive caratteristiche.

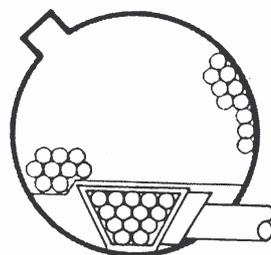
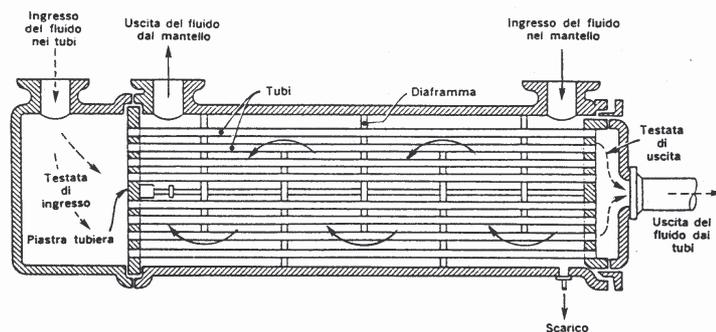
8.3.1 - Condensatori raffreddati ad acqua

I condensatori raffreddati ad acqua vengono realizzati in tre differenti versioni costruttive:

- tipo tubo dentro tubo (vedi la figura seguente);
- tipo a serpentina (anche detto shell and coil) – vedi sempre la figura seguente;



- tipo a fascio tubiero (anche detto shell and tube) – vedi la figura seguente.



Sezione schematica di un condensatore a fascio tubiero. Il gruppo di tubi sul fondo, separato da quelli soprastanti da supporti setti, costituisce il sottoraffreddatore del refrigerante liquido (Carrier).

Sezioni di condensatore a fascio tubiero

Un aspetto comune a tutti i tipi di condensatori raffreddati ad acqua è dato dalla progressiva incrostazione che subiscono le vie d'acqua per effetto della "durezza" dell'acqua stessa (quantità di sali minerali in essa disciolti) o per la sua fangosità.

L'incrostazione dei tubi riduce il rendimento del processo di scambio termico tra refrigerante ed acqua.

E' necessario perciò prevedere la periodica disincrostazione dei tubi di passaggio dell'acqua.

I condensatori di tipo **tubo dentro tubo** sono costituiti da due tubi di differente diametro inseriti l'uno dentro l'altro ed avvolti a spirale.

Il fluido refrigerante scorre nel tubo più interno (generalmente di rame) mentre l'acqua di raffreddamento scorre nel tubo più esterno (generalmente d'acciaio).

I due fluidi vengono fatti scorrere controcorrente fra loro in modo da ottimizzare il processo di scambio termico.

I condensatori di tipo a serpentina (shell and coil) sono costituiti da una serpentina di tubi di rame, inseriti entro un mantello d'acciaio sul quale sono saldate le due testate di estremità di tipo bombato; su una delle testate sono presenti gli attacchi per l'ingresso e l'uscita del fluido refrigerante e per l'ingresso e l'uscita dell'acqua di raffreddamento.

L'acqua scorre entro la serpentina di tubo di rame, che presenta la superficie esterna alettata allo scopo di aumentare il rendimento del processo di scambio termico.

Nei condensatori di tipo a serpentina il refrigerante, dopo il passaggio allo stato liquido, si raccoglie sul fondo del condensatore stesso, che si comporta così anche come ricevitore del liquido.

I condensatori a serpentina sono economici e agevoli da realizzare, d'onde l'impiego su unità di condizionamento di piccola potenzialità.

I condensatori ad acqua più diffusi sono quelli di tipo a *fascio tubiero* (shell and tube).

Essi sono costituiti da un mantello d'acciaio sulle cui estremità sono applicate due piastre tubiere entro le quali vengono mandrinati i tubi di passaggio dell'acqua.

Sopra le piastre tubiere sono imbullonate le testate, una delle quali porta gli attacchi d'ingresso e d'uscita dell'acqua.

Con la presenza di opportuni setti entro le testate si ottiene che l'acqua possa compiere diversi passaggi entro il condensatore aumentando in definitiva il rendimento.

I tubi di passaggio dell'acqua sono normalmente realizzati in rame, con alettatura integrale, per aumentare il rendimento del processo di scambio termico.

Nei condensatori a fascio tubiero, il refrigerante allo stato di vapore surriscaldato entra attraverso un attacco sul mantello del condensatore, in alto.

Il gas surriscaldato lambisce i tubi attraversati dall'acqua, si raffredda e quindi inizia a condensare raccogliendosi in forma di liquido sulla parte inferiore del mantello.

In alcune applicazioni, sul fondo del condensatore, un circuito di tubi è destinato ad effettuare il sottoraffreddamento del liquido refrigerante.

Il sottoraffreddatore comporta un aumento nel costo iniziale dell'impianto, ma aumenta il rendimento di funzionamento, riducendo così i costi di esercizio dell'impianto stesso.

L'aumento di capacità frigorifera che si può conseguire è intorno all'1% per ciascun grado centigrado di sottoraffreddamento.

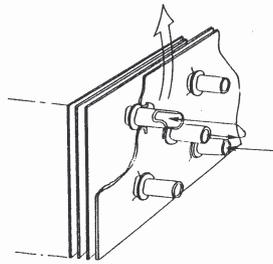
Il liquido sottoraffreddato esce dal fondo del condensatore attraverso un attacco presente sul mantello.

I condensatori a fascio tubiero sono idonei a smaltire anche quantità di calore molto elevate e trovano perciò applicazione su unità di condizionamento di grande potenzialità.

8.3.2 - Condensatori raffreddati ad aria

Attualmente il condensatore raffreddato ad aria viene realizzato secondo una sola tendenza costruttiva che si identifica nel cosiddetto *tipo a pacco*.

Il condensatore è infatti costituito da un pacco di lamierini di alluminio, regolarmente spazati tra loro, attraversato per l'intera lunghezza da una serie di tubi di rame (vedi la figura seguente).



I tubi, che possono costituire sia un circuito unico, sia più circuiti indipendenti, attraversano più volte il pacco di lamierini, sia nel senso della lunghezza che in quello della profondità.

Costruttivamente, i tubi dritti di rame sono collegati tra loro, sulle due estremità del condensatore, da opportune curve.

Il refrigerante surriscaldato entra nella parte alta del condensatore e il liquido esce dal basso.

Anche il condensatore raffreddato ad aria può disporre normalmente di un circuito di sottoraffreddamento del liquido refrigerante.

Esso è alimentato in serie dal circuito di condensazione e in esso perviene il liquido refrigerante condensato.

L'aria di raffreddamento viene spinta sul condensatore mediante elettroventilatori.

I condensatori ad aria lavorano con temperature di condensazione superiori a quelle dei condensatori ad acqua.

Questa temperatura è in genere di 10-20°C al di sopra della temperatura di bulbo asciutto dell'aria esterna utilizzata per il raffreddamento.

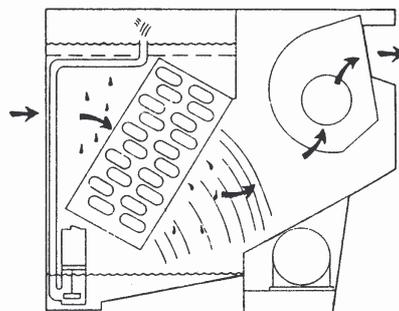
Si ottengono così temperature di lavoro intorno a 45-50°C e oltre.

Come abbiamo visto, con l'aumentare della temperatura di condensazione, a parità di altre condizioni, si verifica un aumento della potenza elettrica assorbita e quindi dei costi di esercizio.

8.3.3 - Condensatore evaporativo

Il condensatore evaporativo riunisce in se aspetti propri del condensatore raffreddato ad acqua e di quello raffreddato ad aria.

Il condensatore evaporativo (vedi la figura seguente), è costituito da un fascio tubiero entro il quale scorre il refrigerante.



Sul fascio tubiero, da una rete ugelli, viene spruzzata dell'acqua che, a contatto delle superfici calde dei tubi, evapora sottraendo calore.

Contemporaneamente sul fascio tubiero viene soffiata dell'aria da parte di ventilatori.

In questo modo, l'aria esterna rimuove continuamente la miscela di aria-acqua attorno al fascio tubiero aumentando il rendimento del processo di scambio termico.

Nel condensatore evaporativo, l'acqua spruzzata sul fascio tubiero si raccoglie sul fondo dell'apparecchio (dove è presente un'apposito raccoglitore) e viene successivamente ripresa e rimessa in ciclo.

8.4 - L'evaporatore

L'evaporatore svolge la funzione di sottrarre il calore dal fluido da trattare (aria o acqua).

L'evaporatore costituisce perciò lo scambiatore tramite il quale viene asportato il calore in eccesso dall'aria ambiente o dall'acqua da refrigerare.

Il fluido refrigerante giunge all'evaporatore dal condensatore in condizioni di liquido sottoraffreddato.

Nel passaggio attraverso il dispositivo di regolazione, per effetto della differenza di pressione esistente tra condensatore ed evaporatore, una piccola parte di liquido evapora raffreddando il liquido restante.

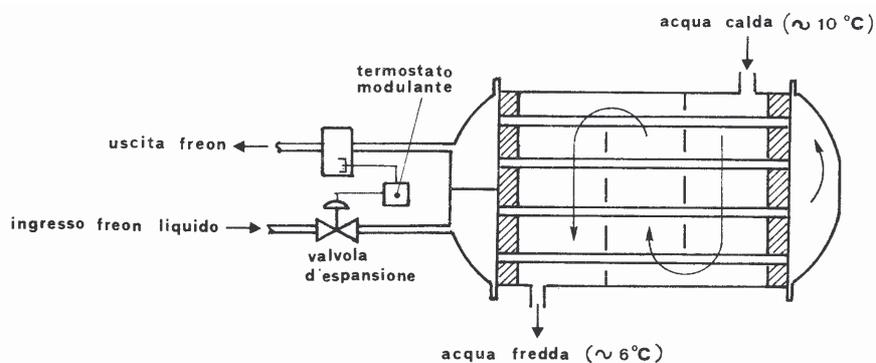
Il liquido refrigerante a temperatura ridotta, entra così nell'evaporatore, dove per effetto della ridotta pressione ivi esistente e della elevata temperatura del fluido circostante, evapora con conseguente sottrazione di calore dal fluido da trattare.

Due sono le soluzioni basilari nel progetto degli evaporatori:

- a) evaporatori ad espansione diretta
- b) evaporatori di tipo allagato

8.4.1 - Gli evaporatori ad espansione diretta

Il fluido refrigerante circola all'interno di una serpentina di tubi immersa entro un opportuno involucro nel quale viene fatta circolare l'acqua da refrigerare (vedi figura seguente).



L'acqua, a contatto con la superficie fredda dei tubi, cede il proprio calore con conseguente riduzione di temperatura ed evaporazione del fluido refrigerante.

All'interno degli evaporatori a espansione diretta per la refrigerazione dell'acqua vengono posti in opera opportuni setti sui percorsi dell'acqua per ottimizzare lo scambio termico acqua-refrigerante.

Un numero limitato di setti consente elevate portate d'acqua con ridotte perdite di carico.

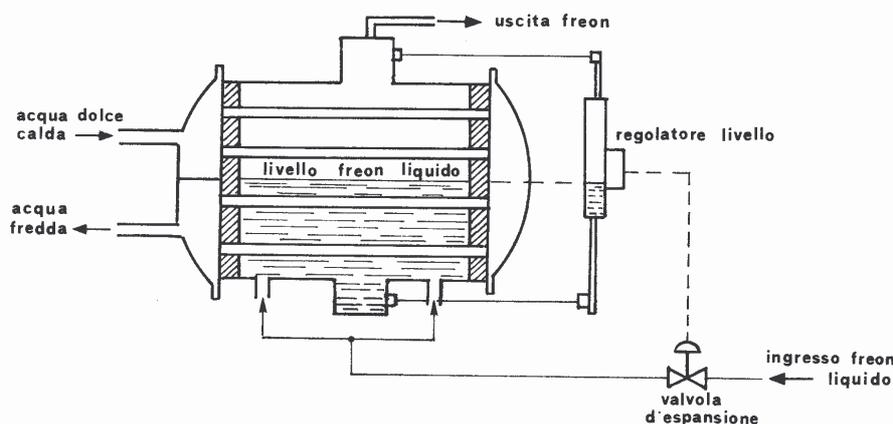
Un numero elevato di setti consente il massimo effetto di scambio termico, ma con perdite di carico più elevate.

Questo è tipo di evaporatore maggiormente utilizzato a bordo.

8.4.2 - Gli evaporatori di tipo allagato

La caratteristica fondamentale degli evaporatori di tipo allagato è che in essi esiste sempre un preciso livello di demarcazione tra refrigerante allo stato liquido e allo stato di vapore.

Nella figura seguente è riportato uno schema funzionale di evaporatore di tipo allagato.



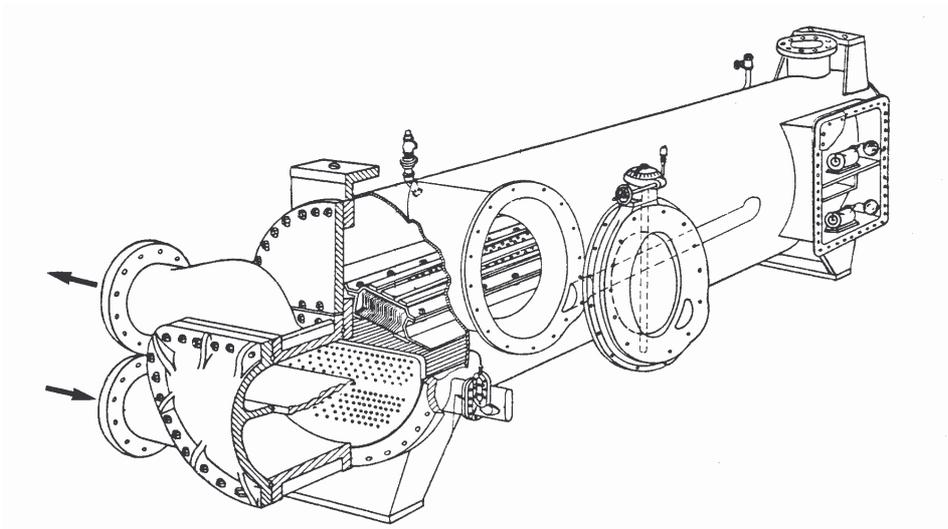
Il refrigerante liquido, attraverso un dispositivo di regolazione, entra e riempie parzialmente il condensatore.

All'interno del fascio tubiero scorre l'acqua da raffreddare che cede calore al refrigerante liquido che evapora.

Negli evaporatori di tipo allagato, controllando il livello del liquido e riciclando il liquido non evaporato, si ha praticamente la certezza di inviare sempre il refrigerante liquido nella serpentina sotto qualsiasi condizione di carico termico.

Gli evaporatori di tipo allagato vengono applicati laddove le potenze in gioco risultano notevoli, come è il caso di gruppi refrigeratori di acqua di tipo centrifugo.

Nella figura seguente è rappresentato uno spaccato di un'evaporatore di questo tipo montato su un gruppo refrigeratore d'acqua di tipo centrifugo.



Entro i tubi, nella parte inferiore dell'evaporatore, circola l'acqua da refrigerare.

All'esterno di essi vi è il fluido refrigerante, che riempie letteralmente la parte inferiore dell'evaporatore.

Il liquido refrigerante che a mano a mano evapora viene aspirato verso il compressore, passando attraverso una serie di separatori di gocce che intercettano le possibili goccioline di liquido trascinate.

Il livello del refrigerante liquido nell'evaporatore è mantenuto costante mediante valvole a galleggiante o altri analoghi dispositivi di regolazione.

Ci si può chiedere quale sia il criterio che guida all'adozione di un evaporatore ad espansione diretta piuttosto che di tipo allagato.

Praticamente il motivo principale è il seguente: negli evaporatori ad espansione diretta il refrigerante circola *all'interno* dei tubi; questa condizione comporta necessariamente delle perdite di carico che possono risultare sensibili.

I soli compressori che possono accettare delle perdite di carico di una certa entità sono i compressori alternativi e quelli a vite.

Questo è il motivo fondamentale per cui tutte le macchine equipaggiate con questi tipi di compressori montano generalmente evaporatori del tipo ad espansione diretta.

Negli evaporatori del tipo allagato invece il fluido refrigerante non circola all'interno dei tubi, bensì *all'esterno*, e si ottengono così delle perdite di carico sensibilmente ridotte.

Questa è la condizione preferibile per i compressori di tipo centrifugo che lavorano con differenze di pressione molto ridotte e non potrebbero accettare penalizzazioni per effetto di elevate perdite di carico.

8.5 - I dispositivi di regolazione del fluido refrigerante

Nel circuito frigorifero, come lo abbiamo esaminato finora, è richiesto un dispositivo che effettui una regolazione del fluido refrigerante diretto verso l'evaporatore.

I dispositivi oggi disponibili per tale scopo sono realizzati su principi diversi e possono venire comandati da variabili differenti, quali la temperatura o la pressione, ma la loro funzione è comunque la medesima: *controllare il passaggio del refrigerante liquido verso l'evaporatore*.

I dispositivi di regolazione del fluido refrigerante oggi più estesamente applicati possono venire elencati come segue:

- 1) valvola di espansione manuale
- 2) valvola a galleggiante - lato bassa pressione
- 3) valvola a galleggiante - lato alta pressione
- 4) valvola di espansione barostatica
- 5) valvola di espansione termostatica

Per introdurre la teoria dei dispositivi di regolazione del refrigerante, ci riferiamo ad un dispositivo molto semplice: una valvola di espansione manuale.

Si tratta in sostanza di un rubinetto con il quale si comanda manualmente il maggiore o minore afflusso di refrigerante verso l'evaporatore.

8.5.1 - Valvola di espansione manuale

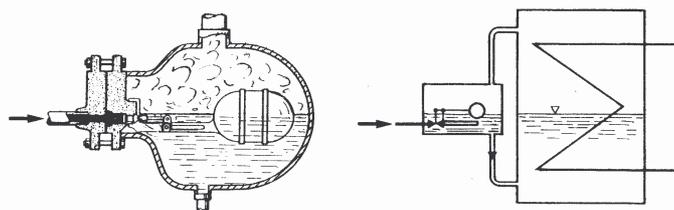
Questo dispositivo costituisce praticamente un rubinetto; esso dispone di una filettatura molto fine e di uno stelo ad ago per consentire una regolazione fine.

L'impiego di tale dispositivo avviene generalmente su grandi impianti, dove il carico si mantiene costante.

La sua regolazione è affidata al tecnico conduttore dell'impianto.

8.5.2 - Valvola a galleggiante - lato bassa pressione

Questo tipo di valvola è applicato sul lato a bassa pressione dell'impianto, cioè sull'evaporatore (vedi figura seguente).



La valvola può venire posizionata materialmente all'interno dell'evaporatore o in una camera all'esterno.

In questo secondo caso, sia la parte inferiore della camera, sia la parte superiore, devono venire collegate all'evaporatore in modo che il livello del liquido, in entrambi rimanga lo stesso.

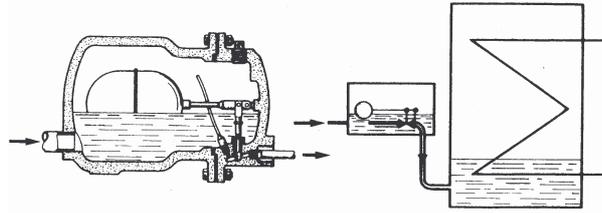
Con l'aumentare del carico termico una maggiore quantità di refrigerante liquido nell'evaporatore viene evaporata ed il livello si abbassa.

La valvola allora si apre e consente l'ingresso di liquido refrigerante dal lato alta pressione.

Questo tipo di valvola offre una eccellente regolazione sugli impianti con evaporatori di tipo allagato, come si ritrovano sui gruppi di tipo centrifugo.

8.5.3 - Valvola a galleggiante - lato alta pressione

Questa valvola è situata nel lato ad alta pressione dell'impianto, ed è immersa nel refrigerante liquido ad alta pressione (vedi figura seguente).



Questo tipo di valvola può lavorare solo su impianti dove la carica di refrigerante sia effettuata con valori piuttosto precisi.

In pratica questa valvola regola il passaggio di refrigerante liquido all'evaporatore nella stessa misura con cui il refrigerante condensa entro il condensatore.

Infatti, con l'aumentare del livello del liquido nella camera, la valvola apre consentendo l'uscita di liquido verso l'evaporatore.

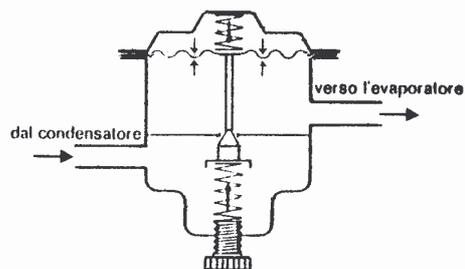
L'impiego di queste valvole è previsto sui gruppi refrigeratori di tipo centrifugo.

8.5.4 - Valvola di espansione automatica

La valvola d'espansione automatica funziona secondo il principio di una valvola riduttrice di pressione.

Essa mantiene costante la pressione nell'evaporatore indipendentemente dalle condizioni esterne durante il funzionamento dell'impianto, e si chiude all'arresto del compressore per l'aumento di pressione che ne consegue.

La figura seguente indica le parti essenziali di una valvola automatica.



L'organo di comando è costituito da una membrana, oppure da un soffiello, sulle cui facce superiore e inferiore agiscono rispettivamente in coppia:

- la pressione atmosferica e quella della molla di contropressione, entrambe praticamente costanti
- la pressione di evaporazione del refrigerante e quella della molla di regolazione.

Se per una data regolazione della molla avviene che la pressione di evaporazione diminuisca, la membrana si inflette verso il basso costringendo l'ago ad aprire la luce di passaggio.

Ciò consente alla pressione di evaporazione di risalire e di riportare la membrana alla sua posizione iniziale.

Più la tensione della molla di regolazione è ridotta più il valore della pressione di evaporazione risulta elevato, e viceversa.

La valvola non ha pertanto la possibilità di adattare l'alimentazione alle variazioni di carico termico sull'evaporatore, per cui quest'ultimo risulta di volta in volta più o meno sottoalimentato oppure sovralimentato.

La valvola si presta quindi ad essere utilizzata solo dove non sia necessario rispettare un rapporto tra le temperature di evaporazione e la temperatura ambiente, e dove il rendimento sia di poca importanza.

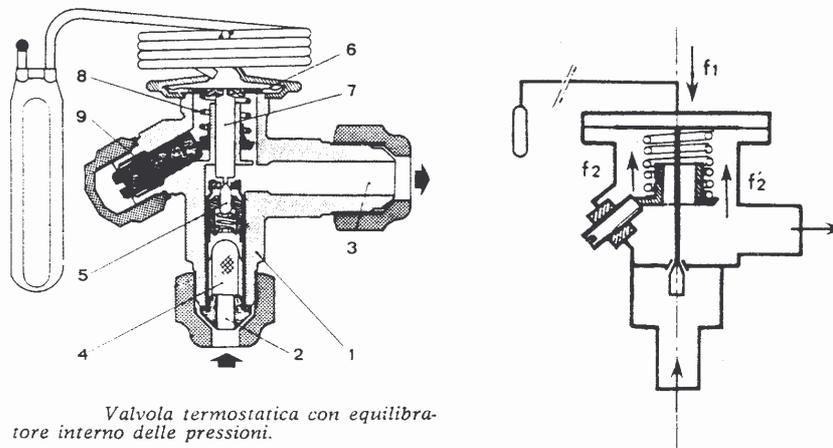
8.5.5 - La valvola termostatica

Utilizzata negli impianti con evaporatore ad espansione diretta, riesce ad adattare entro limiti ragionevoli la resa dell'impianto alle variazioni del carico termico.

Essa vincola l'alimentazione del refrigerante ad un surriscaldamento costante del vapore in uscita dall'evaporatore rendendo così attiva in ogni condizione di funzionamento l'intera superficie di scambio dell'apparecchio, ed impedendo nel contempo che il liquido non vaporizzato ritorni al compressore.

(a) La valvola con equilibratore interno delle pressioni

L'organo di comando è costituito da un diaframma sulla cui faccia superiore agisce in senso favorevole all'apertura della valvola la pressione f_1 esercitata dal bulbo sensibile (vedi figura seguente).

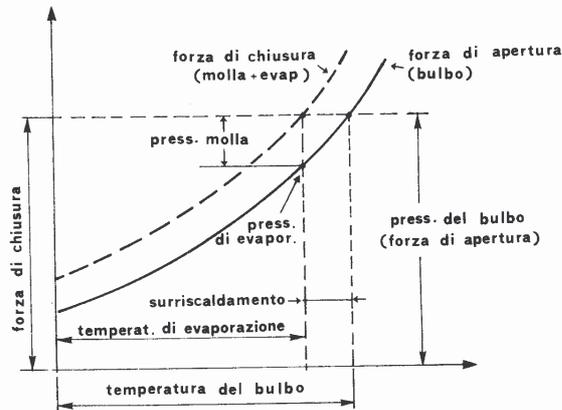


Questo, caricato da una miscela di liquido e vapore dello stesso refrigerante circolante nell'impianto oppure da gas assorbito in varia proporzione da una sostanza assorbente, è mantenuto a stretto contatto con la tubazione d'uscita dall'evaporatore, così da assumere la stessa temperatura del vapore aspirato.

Sulla faccia inferiore del diaframma in senso contrario alla f_1 agiscono la pressione f_2' del refrigerante nell'evaporatore e quella f_2 della molla di regolazione.

Per una data regolazione della molla la valvola trova il suo punto di equilibrio allorchè l'afflusso di liquido che essa consente assicura al vapore aspirato un grado di surriscaldamento tale che la pressione del bulbo sia pari alla somma delle pressioni f_2 ed f_2' .

La figura seguente illustra il funzionamento della valvola termostatica quando è usato lo stesso fluido tanto nel bulbo sensibile che nel circuito frigorifero.



Si può osservare che, se in una data condizione di carico della valvola non permette un adeguato passaggio di liquido, la pressione del bulbo aumenta in seguito all'aumento del grado di surriscaldamento del vapore aspirato.

Ciò si traduce in una maggiore apertura della valvola e quindi in un incremento dell'afflusso di liquido così da ristabilire l'equilibrio tra le tre pressioni.

Se viceversa la valvola permette un eccessivo passaggio di refrigerante la pressione del bulbo diminuisce consentendo alla punteria di strozzare la luce di passaggio e di ribilanciare in tal modo la pressione del bulbo, della molla e dell'evaporatore.

Se il carico termico sull'evaporatore cresce, il refrigerante termina prima di evaporare e pressione e temperatura si innalzano.

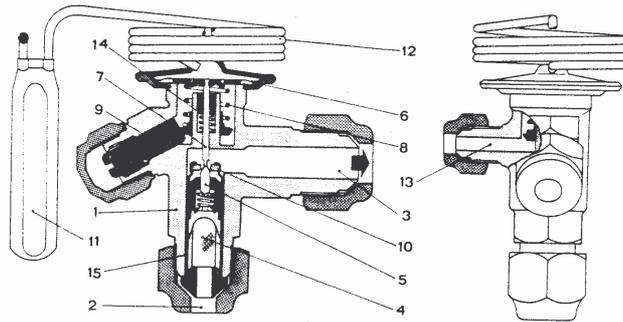
Contemporaneamente si verifica però un aumento della temperatura e quindi della pressione esercitata dal bulbo, per cui in definitiva gli aumenti della pressione f_1 ed f_2' si annullano a vicenda e la valvola si adatta facilmente alla nuova condizione di carico con una trascurabile variazione del grado di surriscaldamento.

Normalmente la molla è regolata per un grado di surriscaldamento da 5°C a 7°C a seconda che l'evaporatore serva alla refrigerazione di liquidi oppure di aria.

(b) La valvola con equilibratore esterno della pressione

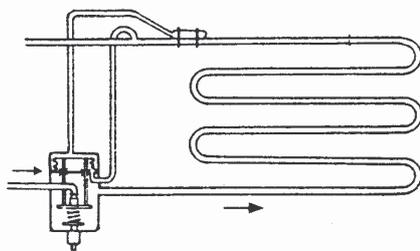
Si può dimostrare che in presenza di sensibili cadute di pressione lungo gli evaporatori la valvola con equilibratore interno delle pressioni lavora con surriscaldamenti eccessivi che limitano la resa degli evaporatori stessi.

Per ovviare all'inconveniente si ricorre in questi casi alla valvola con equilibratore esterno delle pressioni (vedi figura seguente).

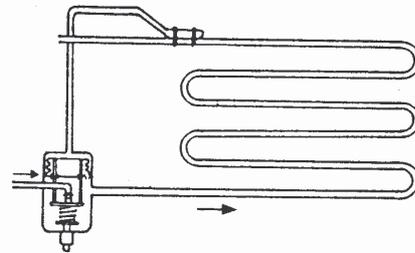


Valvola termostatica con equilibratore esterno della pressione.
 1) Corpo valvola; 2) Raccordo d'ingresso; 3) Raccordo d'uscita; 4) Filtro; 5) Otturatore; 6) Diaframma; 7) Asse di comando; 8) Molla di regolazione; 9) Vite di regolazione; 10) Ugetlo; 11) Bulbo; 12) Capillare; 13) Raccordo con equilibratore esterno della pressione; 14) Tenuta.

In questo modo la pressione che agisce sotto il diaframma non sarà la pressione di entrata ma quella dell'uscita del refrigerante dall'evaporatore (vedi le due diverse sistemazioni nella figura seguente).



Sistemazione di valvola termost. con equilibratore esterno



Sistemazione di valvola termost. con equilibratore interno

Con ciò viene eliminata l'influenza della caduta di pressione interna dell'evaporatore ed il surriscaldamento ricondotto nei limiti normali.

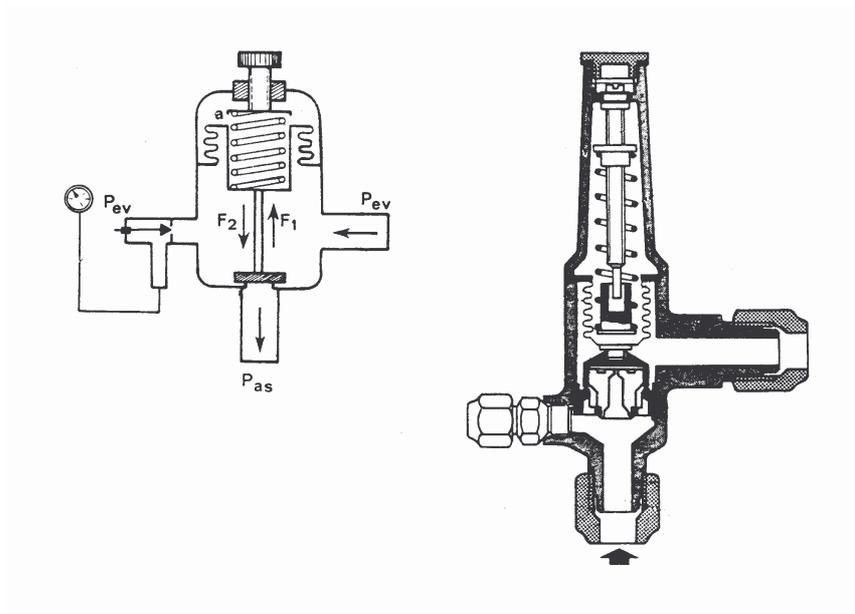
8.5.6 - La valvola barostatica

La valvola barostatica serve ad impedire che la pressione di evaporazione scenda al di sotto di un valore prestabilito.

Essa trova applicazione negli impianti ad evaporatore unico, per evitare ad esempio la formazione di gelo in un refrigeratore d'acqua o di brina in una batteria ad espansione diretta nel condizionamento dell'aria.

Risulta inoltre particolarmente indicata negli impianti centralizzati, che servono punti da refrigerare a temperature diverse, in quanto consente di mantenere nelle celle meno fredde temperature di evaporazione superiori a quelle delle celle più fredde.

La valvola barostatica è essenzialmente costituita da un soffiutto e da un piattello solidale con esso (vedi la figura seguente).



Sul soffietto agiscono la spinta F_2 esercitata dalla molla di regolazione in senso favorevole alla chiusura, e quella F_1 dovuta alla pressione di evaporazione p_{ev} diretta in senso contrario alla precedente.

La valvola chiude se, per una data taratura della molla di regolazione, si verifica al diminuire della pressione di evaporazione la seguente condizione:

$$F_2 > F_1$$

La valvola barostatica è munita di uno speciale raccordo che rende possibile montare e smontare un manometro senza che si verifichino fughe di gas (vedi sempre la [figura precedente](#)).

CAP.9 - IMPIANTI DI TRATTAMENTO E DI DISTRIBUZIONE DELL'ARIA

9.1 - Impianti di trattamento dell'aria

9.1.1 - Generalità

Come abbiamo già visto nel terzo capitolo, il condizionamento dell'aria di un ambiente si ottiene aggiungendo o sottraendo calore ed umidità all'ambiente stesso in modo da mantenervi una data temperatura e una data umidità relativa.

Nella stagione estiva, il calore da sottrarre, può provenire dall'esterno, attraverso le pareti del locale o da sorgenti interne (illuminazione, presenza di persone, ecc.).

Nella stagione invernale, la temperatura esterna e l'umidità sono più basse di quelle che si vogliono mantenere nell'ambiente e quindi bisogna somministrare calore per compensare le perdite attraverso le pareti e spesso anche l'umidità per portarla ad un valore di gradimento per la traspirazione.

Nel caso si voglia condizionare un locale in cui l'aria va continuamente viziandosi (per la presenza di persone o per altro motivo), occorre che tutta o parte dell'aria trattata ed immessa nel locale, sia successivamente estratta e rimandata all'esterno.

Nel caso di assenza nel locale di cause di inquinamento, basta ritrattare l'aria del locale stesso senza prelevare nulla o quasi dall'esterno.

In questo ultimo caso, diremo che si effettua un condizionamento a circuito chiuso.

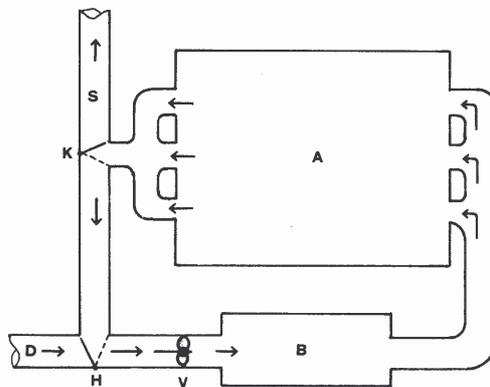
Nel caso invece che tutta l'aria venga presa dall'esterno, si dice che si effettua un condizionamento a circuito aperto.

Quando l'aria da trattare viene presa parte dall'esterno e parte dall'interno del locale, diremo che si effettua un condizionamento a circuito semiaperto.

Se indichiamo con V il volume del locale e con V_1 il volume di aria presa dall'esterno in un'ora, avremo che il numero di ricambi del locale è dato da:

$$n = \frac{V_1}{V}$$

Nella figura seguente, A è l'ambiente condizionato, B il condizionatore nel quale l'aria subisce il necessario trattamento (termico e igrometrico) prima di essere immessa nel locale condizionato.



Il ventilatore V serve a far circolare l'aria: la aspira dal condotto D, la spinge nella camera B dalla quale passa nell'ambiente condizionato A e da questo infine passa nel condotto S che la riversa tutta o in parte all'esterno o tutta o in parte nel condotto D.

Il circuito chiuso, semiaperto o aperto si effettua con l'opportuno orientamento delle serrande K e H.

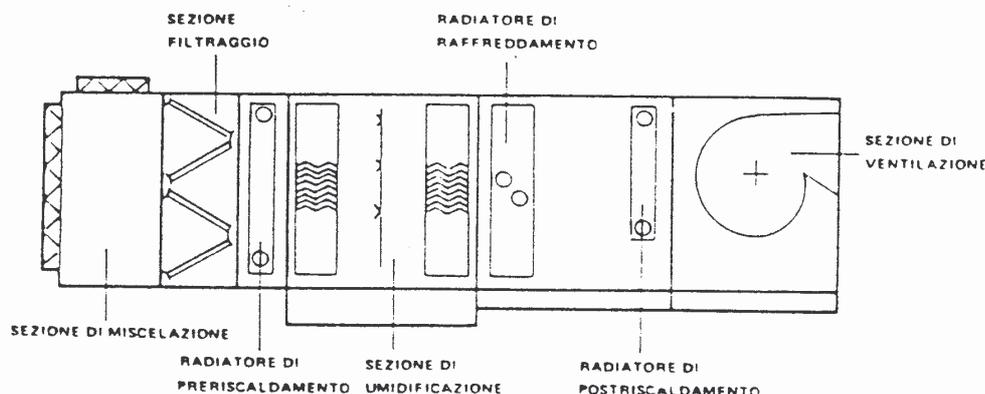
Gli organi che provvedono al trattamento dell'aria a bordo sono:

- condizionatori;
- mobiletti integratori;

9.1.2 - Il condizionatore dell'aria

Lo schema generale di un impianto di condizionamento dell'aria prevede una o più sedi di trattamento dell'aria da immettere negli spazi condizionati; tali sedi sono propriamente dette condizionatori.

Le parti costituenti un condizionatore completo sono (vedi figura seguente):



- a) presa dell'aria esterna con relativa serranda di proporzionamento della portata.
- b) presa dell'aria di ricircolo con relativa serranda di proporzionamento (quasi sempre collegata alla precedente e con movimento opposto, nel senso che quando una serranda chiude, l'altra apre mantenendo costante la portata totale dell'aria).
- c) zona di miscelamento fra aria esterna e aria interna
- d) sezione di filtri per trattenere le impurità solide dell'aria
- e) batteria di raffreddamento nella quale l'aria viene raffreddata e deumidificata mediante la condensazione della umidità eccedente il livello necessario
- f) ugelli deumidificatori, mediante i quali, l'aria riceve, in inverno, la necessaria quantità di acqua.
- g) separatore delle gocce d'acqua dall'aria.
- h) batteria di riscaldamento, nella quale durante l'inverno, la temperatura dell'aria raggiunge il livello finale necessario (oppure durante l'estate, effettua il post-riscaldamento).
- i) serranda di by-pass che è in grado di permettere, ad una certa quantità di aria aspirata, di non attraversare le batterie di trattamento ma di miscelarsi alla parte di aria trattata in prossimità del ventilatore.

9.1.3 – I mobiletti integratori

Questi mobiletti sono dei semplici integratori, generalmente del freddo, che vengono sistemati in alcuni locali già condizionati, per poter eliminare il calore proveniente da apparecchiature elettriche o elettroniche a funzionamento non continuativo.

In pratica, il condizionamento centralizzato è sufficiente da solo, con le apparecchiature ferme, a mantenere nel locale, le richieste condizioni di temperatura ed umidità.

I mobiletti integratori funzionano a circuito aperto col locale e sono sostanzialmente costituiti da uno scambiatore di calore e da un ventilatore.

Va notato che questi mobiletti vanno dimensionati in modo che, nelle condizioni standard di progetto, l'aria da essi trattata non superi il punto di rugiada.

Se ciò accadesse, le condizioni igrometriche interne del locale varierebbero e ciò non sempre è desiderabile.

Ovviamente, allontanandoci dalle condizioni standard, vedremo che questi integratori sottraggono parte dell'acqua all'ambiente e ne abbassano l'umidità relativa.

I locali che hanno bisogno di questi integratori, sono mediamente i locali operativi (C.O.C., RT., D.T., RADAR, A.S., C.P., i quadri elettrici, ECG ed il locale girobussola).

In alcuni locali, come per esempio in C.O.C., si possono trovare più mobiletti integratori ed il loro dimensionamento è fatto in funzione delle apparecchiature in moto nei diversi assetti della nave.

9.2 – Impianti di distribuzione dell'aria

9.2.1 - Generalità

Gli impianti di distribuzione dell'aria trattata sono fondamentalmente di due tipi:

- 1) impianti ad espansione diretta;
- 2) impianti centralizzati.

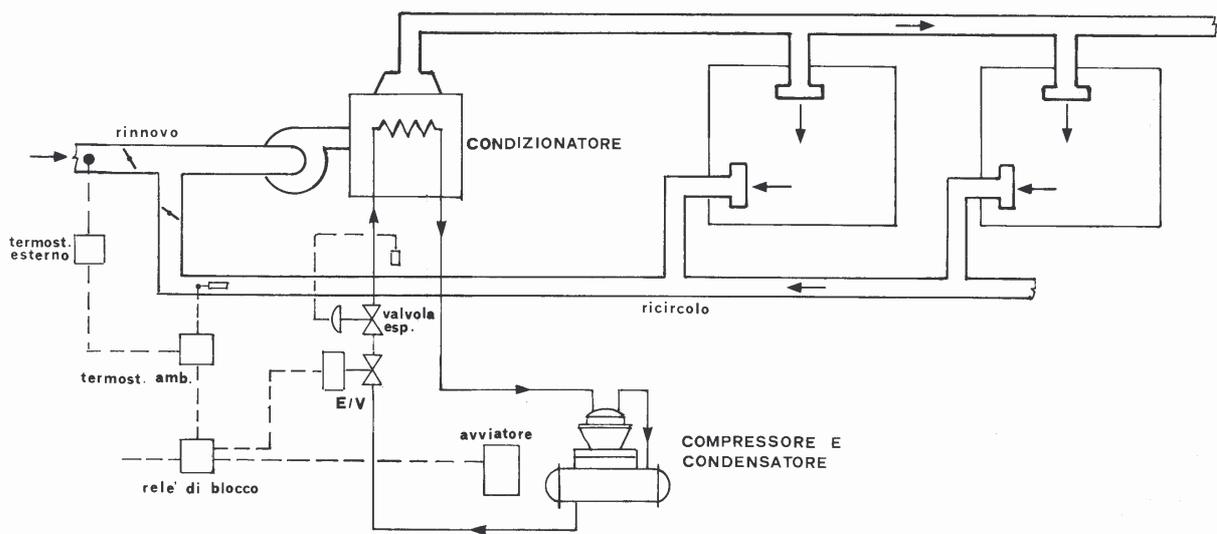
Vediamo adesso in particolare questi due tipi di impianto.

9.2.2 - Impianto ad espansione diretta

Qualche volta può risultare agevole e conveniente installare degli impianti di refrigerazione del tipo ad espansione diretta.

Questo è il caso, per esempio, di navi a bordo delle quali non sia disponibile molto spazio per installare una grossa centrale frigotermica, oppure è il caso di navi a bordo delle quali il condizionamento si riduce ad una o due zone.

In questo tipo di impianti il condizionatore contiene l'evaporatore che realizza l'espansione del freon, costituito da una serpentina alettata dove avviene lo scambio termico direttamente tra aria e freon (vedi figura seguente).



Impianto di condizionamento ad espansione diretta

Il condizionatore ad espansione diretta realizza un condizionamento dell'aria di tipo estivo, ma può essere reso del tipo tutto l'anno con l'aggiunta di resistenze di riscaldamento od una serpentina ad acqua calda.

La regolazione della temperatura della batteria refrigerante può essere attuata in diversi modi.

Il sistema più semplice è quello di adottare una regolazione a due posizioni: un termostato compensato, posto sul ricircolo, comanda l'avviamento e l'arresto del compressore, nonché l'apertura e la chiusura della valvola d'intercettazione sulla linea del freon liquido.

Contemporaneamente una valvola di espansione regola la potenzialità frigorifera in funzione del carico.

Ad evitare i continui arresti-avviamenti da parte del compressore, il differenziale del termostato deve essere fissato in modo sufficientemente ampio.

Un tale sistema di regolazione non è tale di impedire sensibili sbalzi di temperatura ed umidità relativa.

Per impianti di una certa potenza si può realizzare la parzializzazione dell'espansione e cioè realizzare la batteria del freddo a più serpentine, con altrettante valvole di alimentazione del freon, regolate in sequenza da un termostato.

La chiusura dell'ultima valvola, in tal caso, provocherà anche l'arresto del compressore.

Altri sistemi di regolazione possono prevedere l'impiego di un compressore a più velocità.

In tal caso un termostato ambiente provvede, in sequenza, a far marciare il compressore sull'alta velocità, sulla bassa velocità od a fermarlo.

I vantaggi di questo sistema sono:

- il compressore del condizionamento con relativo condensatore può essere agevolmente sistemato, in quanto il suo ingombro è limitato.

- Il rendimento del sistema è elevato in quanto lo scambio termico avviene una sola volta (manca in tale sistema il veicolo delle frigoriferie intermedio costituito generalmente da acqua).

Gli svantaggi sono:

- Occorrono tanti gruppi frigoriferi quante sono le unità di condizionamento;
- Occorre una potenza frigorifera installata globalmente maggiore rispetto agli impianti centralizzati;
- La regolazione, al variare del carico, sia che venga attuata mediante parzializzazione che fermando e avviando il compressore, comporta una non facile regolazione della temperatura dell'aria trattata.

9.2.3 - Impianti centralizzati

Della massa d'aria totale trattata dai condizionatori, viene prelevata dall'esterno solo la quantità minima indispensabile per mantenere buone condizioni di purezza all'interno dei locali, mentre la parte restante, necessaria per mantenere nell'ambiente le desiderate condizioni climatiche, viene prelevata dall'ambiente stesso.

L'aria può essere inviata nei locali a bassa o ad alta velocità e questa scelta è condizionata dall'esigenza di contenere entro certi limiti la rumorosità e realizzare una economia delle condotte di ventilazione (economia in peso ed in volume).

Negli impianti a bassa velocità, l'aria può essere spinta dal ventilatore a circa 10-20 m/s (circa 40-50 mm di colonna d'acqua di contropressione).

Con questa velocità, le condotte di ventilazione risultano voluminose e pesanti.

Per ridurre volume e peso, si è resa necessaria l'adozione di impianti ad alta velocità (20-40 m/s con una contropressione di circa 150 mm di colonna d'acqua).

Questa esigenza ha richiesto la necessità di sistemare apparecchiature idonee all'attenuazione della rumorosità ed ha portato ad un aumento della potenza assorbita dai ventilatori.

Questa potenza è stata successivamente ridotta, abbassando la temperatura dell'aria trattata, quindi diminuendo la portata d'aria da inviare nei locali a parità di condizioni richieste; in tal caso bisogna sistemare nei locali degli opportuni mobiletti ad induzione dell'aria entro i quali avviene una miscelazione dell'aria trattata con l'aria dell'ambiente, in modo da avere all'uscita una temperatura non troppo bassa che sarebbe dannosa per le persone, oppure prevedere un post-riscaldamento dell'aria che permetta una regolazione fine della temperatura finale.

Nel caso di impianti centralizzati nelle serpentine dei condizionatori circola, in estate, acqua fredda a circa 4-6°C ed, in inverno, acqua calda a circa 60-80°C.

Il condizionamento centralizzato è preferibile al condizionamento ad espansione diretta, anche se impone un doppio scambio di calore, (freon-acqua nella centrale frigorifera, acqua-aria nel condizionatore), perchè consente di limitare il circuito del freon alla sola centrale frigorifera con minori pericoli di perdite e con minore quantità di freon in circuito.

Occorre quindi avere una o due centrali frigorifere, nelle quali si refrigera acqua dolce che viene poi inviata alle diverse batterie in tutta la nave.

Quando i locali da condizionare, rispetto a tutti i locali della nave sono pochi, (alloggi, mense e locali operativi come nel caso di navi logistiche) può convenire, invece, sistemare un certo numero (tre o quattro) condizionatori ad espansione diretta.

I sistemi usati per conseguire il trattamento dell'aria condizionata, da inviare nei locali, sono di vario tipo in dipendenza dei criteri adottati nell'inseguire la scelta delle numerose variabili in gioco.

A bordo delle navi, i vincoli entro i quali si muove la scelta del progettista e gli scopi che egli deve, in linea di massima proporsi, sono:

- realizzare un impianto di basso peso e limitato ingombro avente la massima funzionalità insieme alla massima semplicità delle sistemazioni
- una marcia sicura in tutte le condizioni di carico
- bassi costi di esercizio

Come sempre l'opera risulterà il frutto di un compromesso al fine di conciliare fra loro esigenze di carattere opposto.

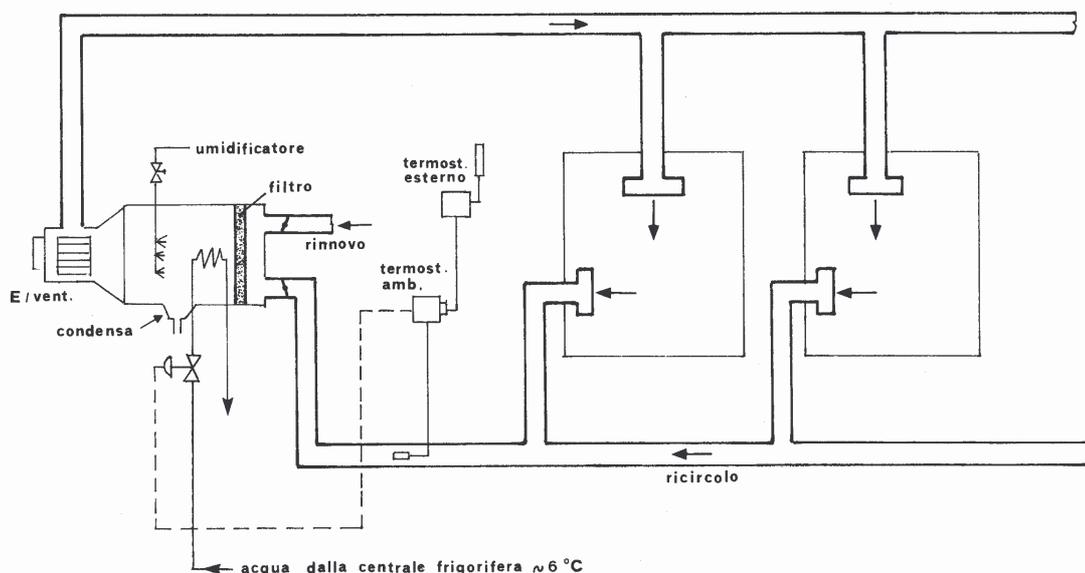
Sulle navi militari possiamo trovare i seguenti schemi fondamentali:

- Impianto centralizzato a condotto unico*
- Impianto centralizzato a doppio condotto*
- Impianto centralizzato con post-riscaldamento*

9.2.3.1 - Impianto centralizzato a condotto unico

Tutta la nave viene suddivisa in zone, nelle quali vengono conglobati locali con esigenze affini.

Ciascuna zona è servita da un gruppo di condizionamento realizzato secondo lo schema della figura seguente.



Impianto di condizionamento a condotto unico con ricircolo

Ovviamente, per avere in tutti i locali lo stesso regime, occorre che questi abbiano lo stesso fattore termico:

E' chiaro che a parità di fattore termico i Q_s dei vari locali potranno essere diversi tra loro e quindi, in sede di progetto si dimensioneranno le condotte di adduzione dell'aria, in modo che, nel locale 1 si abbia una portata di aria secca pari a:

$$\text{nel locale 1: } V_1 = \frac{Q_{s_1}}{0,29(t_1 - t_B)}$$

$$\text{nel locale 2: } V_2 = \frac{Q_{s_2}}{0,29(t_2 - t_B)}$$

$$\text{nel locale 3: } V_3 = \frac{Q_{s_3}}{0,29(t_3 - t_B)}$$

avendo indicato con t_B la temperatura dell'aria trattata dal condizionatore e determinata sulla base del valore del fattore termico comune.

Tutto ciò è realizzabile, quando la temperatura esterna e l'umidità non variano e cioè per una certa condizione standard.

Poichè si vuole invece mantenere all'interno dei locali un certo stato di regime alle diverse condizioni esterne, bisogna che si scelga un certo campo di variazione di queste condizioni interne, al mutare dello stato dell'aria esterna, entro un limite statistico alle nostre latitudini.

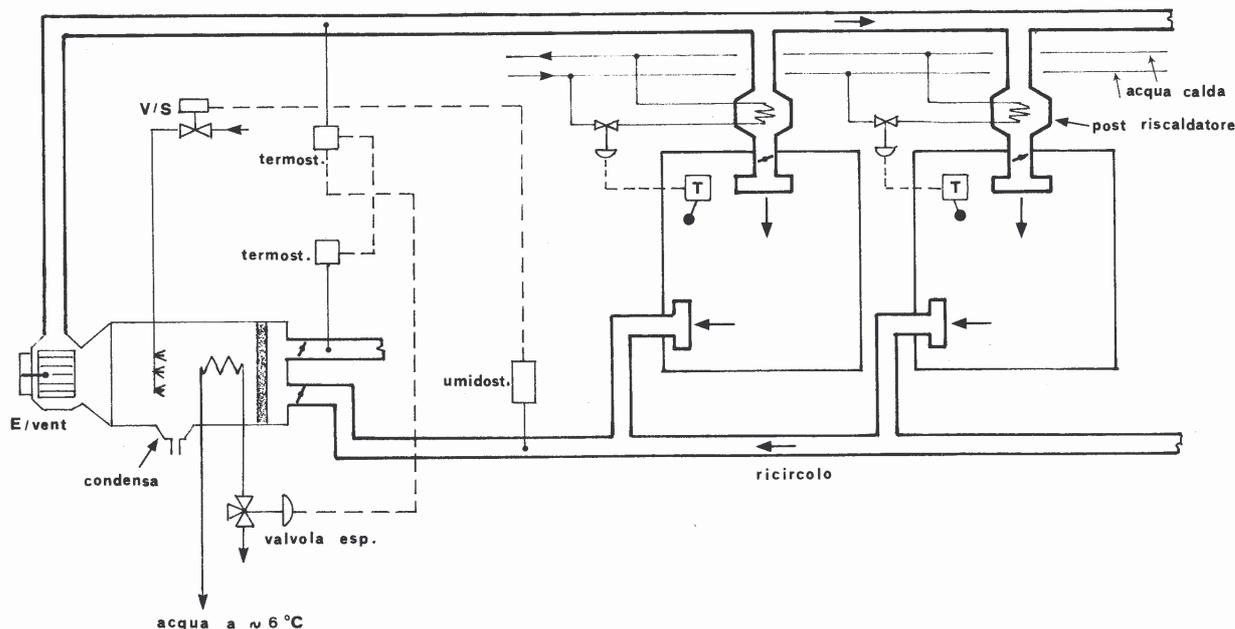
Inoltre, occorre legare mediante un opportuno controllo automatico a ciclo chiuso, le condizioni interne a quelle esterne variabili.

La Marina Militare richiede, come normativa, che la differenza fra la temperatura esterna ed interna non sia superiore a 7-8°C e che l'umidità relativa interna, per le condizioni standard di progetto, sia compresa fra 40% e 50%.

9.2.3.2 - Impianto centralizzato con post-riscaldamento

Anche con questo sistema, la nave è suddivisa in zone, ciascuna delle quali comprende locali simili tra loro per esigenze di condizionamento.

Ciascuna zona è servita da un condizionatore, secondo lo schema della figura seguente.



Impianto di condizionamento con post-riscaldamento

Rispetto al sistema del paragrafo precedente, notiamo la presenza all'ingresso dell'aria trattata nei locali di uno scambiatore di calore attraversato da acqua calda, il cui flusso viene regolato da un termostato "trasduttore-regolatore" con set-point regolabile dal personale che abita il locale.

Inoltre, l'elemento sensibile del termostato, in questo sistema, è posizionato entro la condotta di mandata del condizionatore e quindi, il suo scopo è quello di mantenere una certa legge di proporzionalità fra la temperatura dell'aria esterna e la temperatura dell'aria trattata.

Nei locali operativi delle Unità della M.M. vengono sistemati anche dei mobiletti integratori che entrano in funzione quando sono in moto le apparecchiature elettroniche.

Quindi, il condizionatore centrale serve soltanto ad assicurare le prescritte condizioni di umidità e temperatura con apparecchiature ferme e con tutto il personale previsto in primo grado di approntamento presente nei locali.

La scelta di questo impianto permette di inviare nelle condotte aria molto fredda, che poi verrà post-riscaldata, con l'evidente vantaggio prima menzionato, di poter ridurre le sezioni delle condotte e la potenza dei ventilatori.

9.2.4 - Impianto centralizzato a doppio condotto

E' una variante dell'analogo impianto a condotto unico, nel quale la regolazione della temperatura finale dell'aria immessa nei locali è realizzata regolando le portate di aria calda e aria fredda prodotte nello stesso condizionatore; in questo una parte dell'aria inviata dal ventilatore viene riscaldata attraverso uno scambiatore nel quale circola acqua calda e l'altra parte viene raffreddata attraverso uno scambiatore dove circola acqua fredda.

CAP.10 - IMPIANTO CELLE VIVERI

10.1 - Generalità

Per ogni nave risulta essenziale conservare a bordo viveri freschi o congelati per una alimentazione corretta dell'equipaggio.

Per una nave militare questa esigenza è condizionata sia dall'elevato numero dei membri dell'equipaggio, sia dal fatto che non sempre è certa la data del successivo rifornimento.

Per ogni classe di Unità esiste una tabella che prevede la quantità di viveri da conservare basata sul numero di persone e sul numero di giorni previsti per la missione tipo.

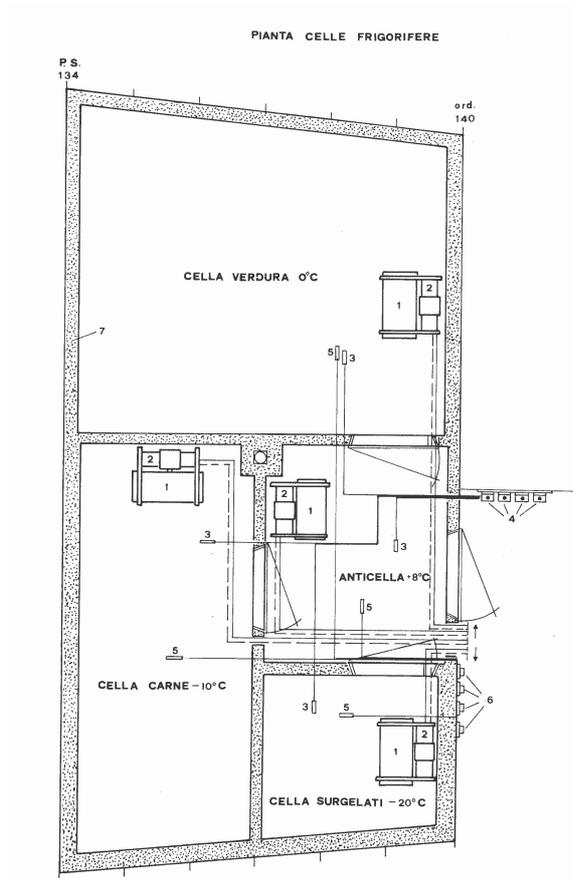
Normalmente per viveri freschi si intende frutta e verdura mentre la carne viene conservata congelata.

Vi sono inoltre altri viveri, come il pesce, da conservare a temperature molto basse ed allora si parla di viveri surgelati.

E' quindi necessario disporre a bordo di più celle viveri a diverse temperature e più precisamente:

- una cella surgelati da mantenere alla temperatura $T = -20^{\circ}\text{C}$
- una cella carne da mantenere alla temperatura $T = -10^{\circ}\text{C}$
- una cella verdura da mantenere alla temperatura $T = 0^{\circ}\text{C}$
- una anticella da mantenere alla temperatura $T = +8^{\circ}\text{C}$

Normalmente vi è anche l'esigenza di produrre del ghiaccio per vari usi di bordo (nella figura seguente una pianta delle celle frigorifere di una moderna Unità).



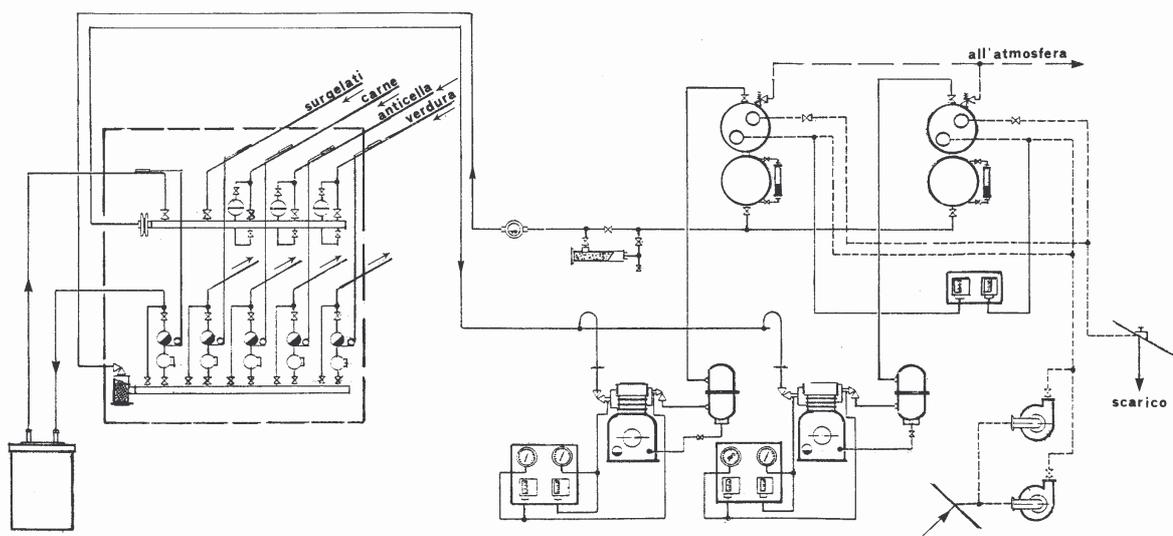
Un impianto celle viveri "tipo" per Unità militare ha quindi le seguenti caratteristiche:

- L'impianto è a funzionamento automatico ad espansione diretta di gas freon 12; dispone di due gruppi frigoriferi uno di riserva all'altro.
- Tutte le celle sono refrigerate a mezzo di aereorefrigeranti
- Lo sbrinamento degli aereorefrigeranti avviene mediante resistenze elettriche.
- L'impianto è previsto per funzionamento in modo completamente automatico per tutte le celle e quando l'ultima di esse raggiunge la temperatura di regime, il relativo termostato scatterà e provocherà la fermata del compressore.
- Ciascuna cella ha una regolazione delle temperature indipendente, comprendente valvole termostatiche per l'autoregolazione del flusso del fluido frigorifero e valvole a solenoide per l'intercettazione dello stesso.
- Per il controllo della temperatura nelle celle sono sistemati lontantermometri.

10.2 - Descrizione funzionale dell'impianto

La centrale frigorifera delle celle viveri è alimentata da due gruppi compressori con possibilità di impiego contemporaneo (messa in funzione dell'impianto) oppure singolo (funzionamento normale).

Il funzionamento ad espansione diretta è realizzato nel modo di seguito descritto (vedi la figura seguente).



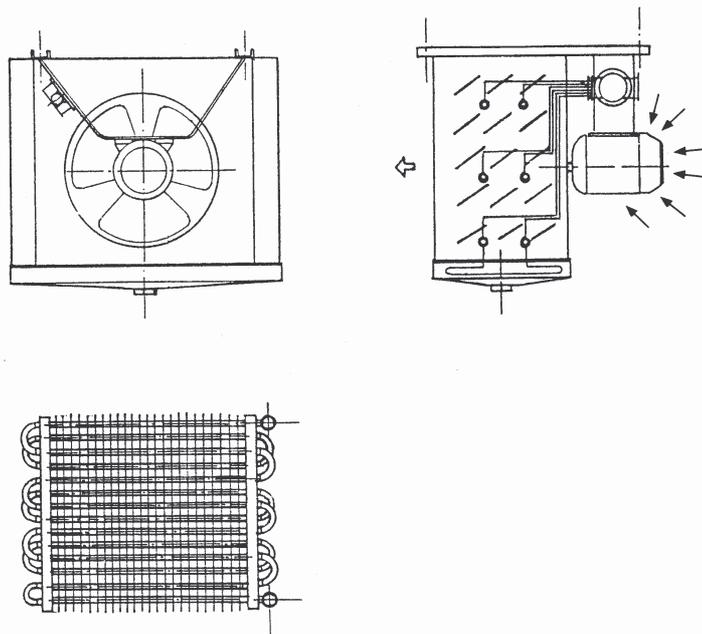
Schema di impianto frigorifero per celle viveri

Il gas freon 12, saturo secco, viene aspirato dal compressore ed inviato al condensatore nel quale è reso liquido per effetto della circolazione dell'acqua di mare, passa quindi attraverso il filtro disidratatore e, completamente essiccato, viene inviato al collettore di mandata.

La circolazione dell'acqua di mare di raffreddamento ai condensatori, viene effettuata per mezzo di due elettropompe centrifughe; una elettropompa è normalmente in moto mentre l'altra è ferma di riserva.

In caso di avaria di entrambe le elettropompe si potrà provvedere al raffreddamento dei condensatori alimentando gli stessi con acqua di mare dal servizio incendio, per mezzo di valvole e tubolature di by-pass, preventivamente installate.

Dal collettore di mandata, attraverso le valvole di intercettazione, le valvole solenoidi e le valvole termostatiche, il freon, sempre liquido, viene inviato agli utilizzatori (aerorefrigeranti, vedi la figura seguente) nei quali, vaporizzando a spese del calore delle celle, ritorna gassoso al collettore di aspirazione e, attraverso le valvole di intercettazione, è nuovamente aspirato dal compressore.



Sezione di aerorefrigeratore

Per maggior sicurezza il gas freon 12, reso liquido nel condensatore, prima di essere inviato al collettore di mandata passa attraverso un filtro sottilissimo in modo da evitare che impurità vadano alle valvole termostatiche.

In caso di inceppamento di valvole termostatiche e solenoidi si provvederà mediante regolatrici manuali.

Vediamo adesso il funzionamento della valvola termostatica.

Quando, per effetto di una diminuzione del carico frigorifero dentro una qualsiasi cella, tende a ritornare al collettore di aspirazione non più gas saturo secco ma del liquido ancora non vaporizzato, la valvola termostatica chiude maggiormente l'orifizio di immissione del freon proveniente dal collettore di mandata adeguando così la quantità necessaria alle nuove condizioni e ristabilendo il nuovo equilibrio.

Ad evitare moto pendolare del compressore tutti i termostati sono collegati elettricamente in parallelo.

In particolare la cella verdura e l'anticella sono provviste di termostato a doppio contatto in modo che a raggiungimento della temperatura di regime, esso intercetta la corrispondente valvola solenoide e quindi il passaggio del freon a quell'utente arrestandone il funzionamento.

Quando in tutte le celle saranno raggiunte le temperature di regime i termostati avranno chiuso tutte le valvole solenoidi e quindi verranno ad essere intercettati tutti i circuiti di mandata ai singoli utenti.

In tal caso il compressore, continuando a marciare, non farà altro che aspirare dagli aerorefrigeranti il gas in essi contenuto ed inviarlo al condensatore.

Questa operazione comporta, dopo un certo tempo, una diminuzione di pressione sul circuito di aspirazione, diminuzione che, quando raggiunge un certo valore, fa intervenire il pressostato di bassa pressione, il quale arresta il funzionamento del compressore e della pompa.

Quando in una qualsiasi cella la temperatura, per effetto di dispersione, supera il valore di taratura il termostato apre la valvola solenoide corrispondente a quella cella.

In tal modo si ha un passaggio rapido di gas dal circuito premente a quello aspirante che fa salire la pressione sull'aspirazione del compressore e quindi il pressostato di bassa pressione fa ripartire la pompa dell'acqua mare.

Il passaggio dell'acqua di mare nel condensatore fa a sua volta partire il compressore.

Questa soluzione viene adottata perchè, in caso di mancanza d'acqua al condensatore, l'impianto risulti fermo.

PARTE 4[^] - IMPIANTI DI GOVERNO NAVE ED IMPIANTI DI STABILIZZAZIONE

CAP.11 - I SISTEMI DI CONTROLLO IDRAULICI

11.1 - Generalita'

La necessità di effettuare spostamenti, specialmente trasversali o assiali, di parti meccaniche, in tempi molto brevi, ha spinto i progettisti di sistemi di controllo verso l'impiego di sistemi idraulici.

Il pistone idraulico, comandato da elettrovalvole ad alta velocità, permette infatti di realizzare degli attuatori che raggiungono accelerazioni teoriche di gran lunga superiori a quelle ottenibili con sistemi elettromeccanici.

Attuatori idraulici sono stati anche utilizzati per trasmettere movimenti di tipo rotatorio.

Si impiega di solito in questo caso una pompa idraulica volumetrica accoppiata ad un motore idraulico pure di tipo volumetrico.

Un adeguato sistema elettromeccanico permette di variare la portata della pompa, che può anche invertirsi di segno, in modo da ottenere un complesso a velocità variabile nei due sensi.

I sistemi idraulici hanno avuto un periodo di enorme successo specialmente negli anni successivi all'ultima guerra ed hanno trovato applicazione in tutti i sistemi di controllo nei quali erano richieste contemporaneamente delle alte prestazioni in termini di velocità di risposta e potenze finali piuttosto considerevoli (superiori alle centinaia di Watt fino a diversi Kilowatt).

I sistemi idraulici soffrono d'altra parte di alcuni inconvenienti piuttosto sostanziali.

Il primo e il più importante è che le caratteristiche degli attuatori, essendo fortemente dipendenti dalle condizioni nelle quali si trova il fluido impiegato (viscosità, contenuto di impurezze, di aria ecc.), presentano delle funzioni di trasmissione variabili a seconda delle condizioni operative ed ambientali e durante la vita degli attuatori stessi.

Un altro inconveniente di un certo rilievo è la poca flessibilità dei sistemi idraulici, ed in particolare l'impossibilità di avere lunghe connessioni idrauliche senza introdurre delle intollerabili costanti di tempo, o ritardi, dovuti sia all'elasticità dei condotti che alla relativamente bassa velocità di propagazione del segnale nel condotto stesso.

Un ulteriore inconveniente di un certo rilievo, specialmente sentito per le apparecchiature idrauliche con prestazioni elevate, è dato dalle stringenti tolleranze meccaniche con le quali gli attuatori devono essere costruiti, tolleranze che comportano non solo un elevato costo di fabbricazione, ma anche una variazione abbastanza considerevole delle caratteristiche a causa dei naturali fenomeni di usura.

I sistemi di controllo idraulici possono essere raggruppati in due tipi base:

- **sistemi controllati mediante pompe**

- **sistemi controllati mediante servovalvole**

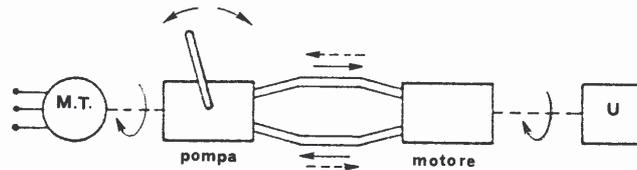
Nel primo caso il controllo dell'attuatore impiegato (di solito un motore idraulico di tipo rotante, ma in certi casi anche un attuatore lineare) si effettua variando la portata inviata dalla pompa (che è del tipo volumetrico a portata regolabile) all'attuatore stesso.

Nel secondo caso, invece, l'attuatore che è del tipo a moto lineare (un cilindro idraulico) viene comandato variando, mediante l'apertura degli orifizi di una servovalvola, il flusso di olio all'attuatore.

In questo caso quindi la potenza fornita dall'alimentatore viene trasferita in uscita, modulata dalla servovalvola impiegata.

11.2 - Sistemi controllati mediante pompa

Lo schema fondamentale di un sistema idraulico controllato mediante pompa è mostrato nella figura seguente.



Una pompa a portata variabile è mossa da un motore asincrono trifase che gira a velocità costante; il controllo della portata della pompa si effettua regolando, con mezzi opportuni, la posizione della leva; la portata fornita dalla pompa alimenta direttamente il motore idraulico la cui velocità varierà in funzione della portata della pompa stessa.

Come si può osservare dalla figura la leva può essere mossa in un senso o nell'altro rispetto alla posizione neutra e dunque il motore ruoterà conseguentemente in un senso o nel senso opposto.

Si ritiene utile far notare che nella letteratura anglosassone il complesso pompa-motore ora descritto prende il nome rispettivamente di "A e B ends".

La potenza massima di una pompa a stantuffo (e anche di un motore) viene calcolata per mezzo della seguente formula:

$$N_{\max} = p \cdot Q_{\max} \quad (\text{Kgm/s})$$

dove Q_{\max} è la portata in volume misurata in m^3/s e p è la pressione espressa in Kg/m^2 .

Esplicitando la portata si ha :

$$Q_{\max} = \frac{V_{\max} n}{60} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

dove:

- V_{\max} è il volume (cilindrata), misurato in m^3 , generato in condizioni di massima inclinazione a della coppa;
- n è il numero di giri al minuto della pompa (del motore elettrico)

Sostituendo, l'espressione della potenza della pompa (o del motore) diventa:

$$N_{\max} = \frac{V_{\max} p n}{60} = K \cdot p \cdot n \quad (\text{Kgm/s})$$

dove $K = V_{\max}/60$ è una costante, essendo la cilindrata V_{\max} una caratteristica costruttiva di ciascun tipo di pompa (o motore).

Da quest'ultima formula si vede che un aumento di potenza può essere conseguito aumentando solo la pressione di lavoro o il numero di giri.

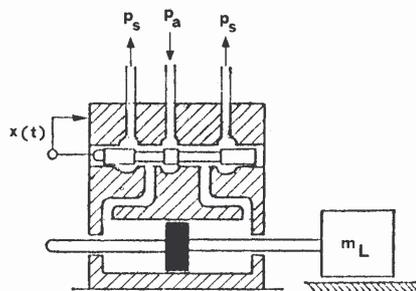
Mentre l'aumento della pressione richiede la soluzione di problemi costruttivi e tecnologici quali la più favorevole conformazione dei vari membri costituenti pompa e motore e l'alta resistenza e rigidità dei materiali impiegati, con l'aumento del numero dei giri insorgono invece problemi di tenuta idrodinamica non sempre risolvibili e che limitano superiormente il parametro in esame.

Infatti, con l'aumentare del numero di giri aumenta la velocità dello stantuffo, ed una aspirazione automatica della pompa non è più possibile perchè sul fondo dello stantuffo e dei canali di aspirazione compaiono fenomeni di cavitazione che peggiorano sensibilmente il rendimento ed influiscono sfavorevolmente sul rendimento.

Tale fenomeno può essere in parte evitato se l'olio viene immesso alla pressione di alcune atmosfere nella pompa a mezzo di una pompa ad ingranaggi.

11.3 - I sistemi controllati mediante servovalvole

Si prenda in considerazione un tipico sistema idraulico, controllato mediante servovalvole, come quella rappresentato nella figura seguente.



Tale sistema è essenzialmente da una servovalvola che controlla l'alimentazione di un cilindro idraulico.

Nella figura non è indicato il sistema che fornisce il fluido, alla pressione di alimentazione p_a (che supporremo costante), e che riceve il fluido di scarico; è questa evidentemente la sorgente di energia dell'intero sistema idraulico in esame.

La posizione $x(t)$ della servovalvola è controllata mediante un "Torque motor" non indicato in figura; si presuppone che il cilindro idraulico azioni un carico costituito da una pura massa m_L .

Quando la parte mobile della servovalvola (cursore) è in posizione centrata, l'apertura di adduzione del fluido alla pressione p_a risulta chiusa (dal rochetto centrale ricavato dal cursore): in queste condizioni pertanto il cilindro idraulico, non alimentato, non eserciterà alcuna forza sul carico.

Supponiamo adesso di spostare il cursore in un senso o nell'altro dalla sua posizione centrale: il fluido in pressione viene così messo in comunicazione con un lato o l'altro del pistone contenuto nel cilindro idraulico.

Il pistone eserciterà sul carico, in queste condizioni, una forza F data dal prodotto della differenza di pressione, esistente tra i due lati del pistone, per l'area effettiva di quest'ultimo.

Sotto l'azione di tale forza il carico si muoverà con la legge del moto $F = m \cdot a$ dove m è la massa totale del sistema in moto ed a la sua accelerazione.

La pressione che agisce sul pistone sarà uguale alla pressione di alimentazione meno la caduta di pressione nella servovalvola, caduta che varierà con la portata effluente.

Si noti che le funzioni di una servovalvola, completa del suo torque motor, sono quelle di un amplificatore (le servovalvole sono anche note come amplificatori idraulici); infatti la potenza di entrata (per il comando del torque motor) è senz'altro bassa, e lo stesso accade ovviamente per la potenza necessaria per il movimento del cursore, visto che si tratta di piccoli spostamenti fatti vincendo forze non grandi, mentre la potenza idraulica fornita all'attuatore, e modulata dal movimento della valvola, assume spesso valori notevoli.

CAP.12 - POMPE E MOTORI PER SISTEMI IDRAULICI

12.1 - Introduzione

Il componente fondamentale di molti circuiti idraulici di bordo è la pompa a portata variabile che quindi converrà conoscere in dettaglio.

Abbiamo visto che questa può essere a pistoni radiali, a palette o a pistoni assiali.

Esaminiamo in particolare quest'ultimo tipo che, opportunamente modificata, può funzionare anche da motore idraulico.

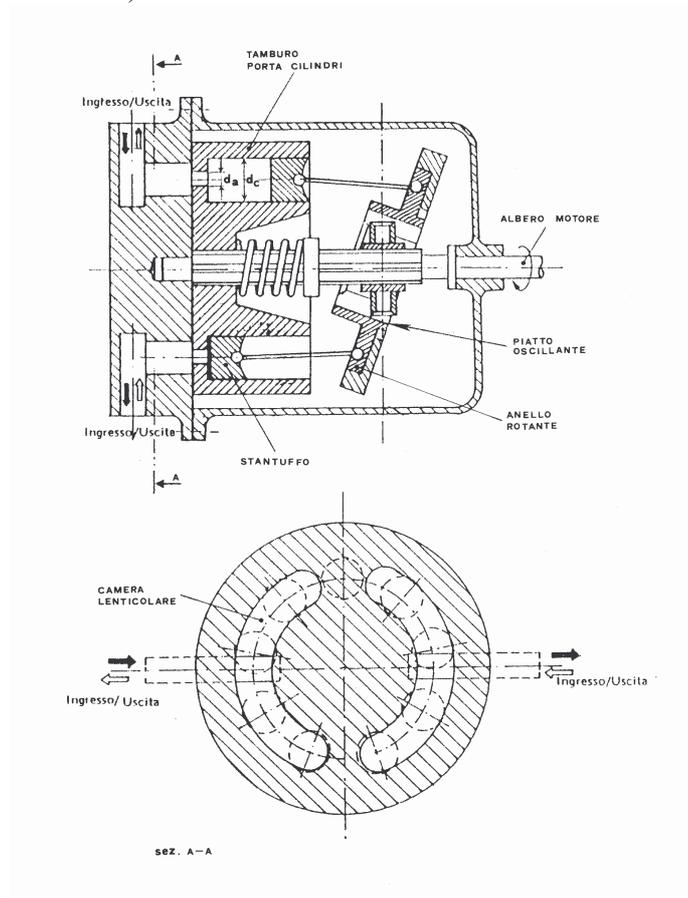
12.2 - Pompa idraulica a stantuffi assiali

12.2.1 - Descrizione

Le pompe idrauliche a stantuffo possono essere di due tipi: a stantuffi radiali e a stantuffi assiali, a seconda della posizione dell'asse dei cilindri rispetto all'asse di rotazione della parte mobile.

Qui di seguito sarà descritto solo il tipo a stantuffi assiali che è quello generalmente impiegato nelle applicazioni della M.M.

Nella figura seguente è riportato uno schema di principio della classica pompa a stantuffi assiali, tipo JANNEY, il cui albero viene mosso da un motore primo che ruota a a numero di giri costante (generalmente un motore elettrico).



Tutte le parti lavoranti sono racchiuse in una cassa, la quale è chiusa ad una estremità dalla piastra delle valvole.

Alcuni tiranti stringono la guarnizione tra piastra e cassa assicurando una perfetta tenuta.

L'altra estremità della cassa porta l'alloggio per il cuscinetto dell'albero principale, che trascina nel moto tutta la parte della pompa.

La faccia interna della piastra delle valvole, su cui è premuto il tamburo porta cilindri, ha la superficie lucidata e vi sono ricavate due camere a forma di cavità lenticolari simmetricamente disposte rispetto al piano della sezione verticale contenente l'asse dell'albero motore.

Queste camere, con una variazione graduale di forma, si raccordano ai tubi di aspirazione e di mandata dell'olio.

Il gruppo rotante è costituito dall'albero motore che trascina nel suo moto, mediante giunti cardanici, il tamburo portacilindri e l'anello rotante.

I cilindri hanno l'asse parallelo a quello dell'albero motore; per assicurare tenuta, il contatto tra tamburo e piastra è mantenuto da una molla.

Durante le fasi di compressione la tenuta è assicurata, oltre che dalla molla, anche dalla pressione esercitata dagli stantuffi (dovuta alla differenza di area fra cilindro e apertura sul fondo).

Tale forza, con le notazioni figura vale, per ciascun cilindro in pressione:

$$F = \frac{\pi}{4} (d_c^2 - d_a^2) p$$

La coppia oscillante ha la funzione di comandare la portata della pompa.

detta coppa viene comandata dall'esterno mediante una leva la quale viene a sua volta azionata da un servomotore a cassetto che sarà descritto più avanti.

Internamente alla coppa oscillante ruota un anello che comanda le bielle degli stantuffi tramite giunti sferici.

Tutta la cassa è piena di olio ed è quindi certa un perfetta lubrificazione del gruppo rotante: poiché l'olio è in pressione, il gruppo rotante subisce automaticamente una lubrificazione forzata.

12.2.2 - Principio di funzionamento

Il principio su cui si basa il funzionamento della pompa consiste essenzialmente nella trasformazione del moto rotatorio irreversibile di un motore elettrico a regime di giri costante in moto alternato a corsa variabile.

La trasformazione del moto sopra menzionata si attua nel seguente modo: l'albero motore trascina in moto rotatorio, attraverso giunti cardanici, il tamburo portacilindri, gli stantuffi, le bielle e l'anello che le comanda.

Quando la coppa oscillante viene inclinata rispetto all'asse di rotazione del tamburo, l'anello rotante nella coppa imprime un moto alternativo, attraverso le bielle agli stantuffi del tamburo portacilindri.

Le posizioni delle due camere semicircolari sulla piastra, sono tali che i cilindri rotanti con gli stantuffi in moto in un senso comunicano con una camera lenticolare e i cilindri con gli stantuffi in corsa opposta comunicano con l'altra camera.

Ne consegue che le variazioni dell'inclinazione A della coppa oscillante, se contenute entro determinati limiti (max $\pm 25^\circ$), determinano variazioni della corsa degli stantuffi e quindi della portata della pompa ad essa proporzionali, mentre l'inversione del segno dell'inclinazione, rispetto alla posizione neutra, determina lo scambio dell'aspirazione con la mandata e viceversa.

Riassumendo, se la coppa è in posizione verticale rispetto all'albero motore (posizione neutra), il gruppo rotante gira con l'albero motore ma non si ha alcun moto alternativo degli stantuffi, cioè la pompa marcia folle senza aspirare né comprimere il fluido idraulico.

Se si inclina la coppa, in aggiunta al moto rotatorio viene provocato un moto alternativo degli stantuffi per cui la pompa comincia a funzionare: la portata varia evidentemente al variare dell'inclinazione della coppa che comanda la corsa degli stantuffi.

A seconda del verso in cui si inclina la coppa rispetto alla posizione neutra, la pompa aspira e comprime in una direzione o nell'altra.

Concludendo la caratteristica fondamentale della pompa è quella di poter marciare folle o pompare il fluido idraulico in un senso o nell'altro dell'inclinazione della coppa con una portata che varia senza scosse e senza discontinuità proporzionalmente all'inclinazione stessa.

12.3 - Servomotore idraulico

Anche i motori a stantuffo, come le pompe, possono suddividersi in motori a stantuffi assiali e in motori a stantuffi radiali.

Qui di seguito sarà fatto un breve cenno sui motori a stantuffo assiali che sono quelli più frequentemente impiegati nelle applicazioni della M.M.

La struttura del motore è uguale a quella della pompa.

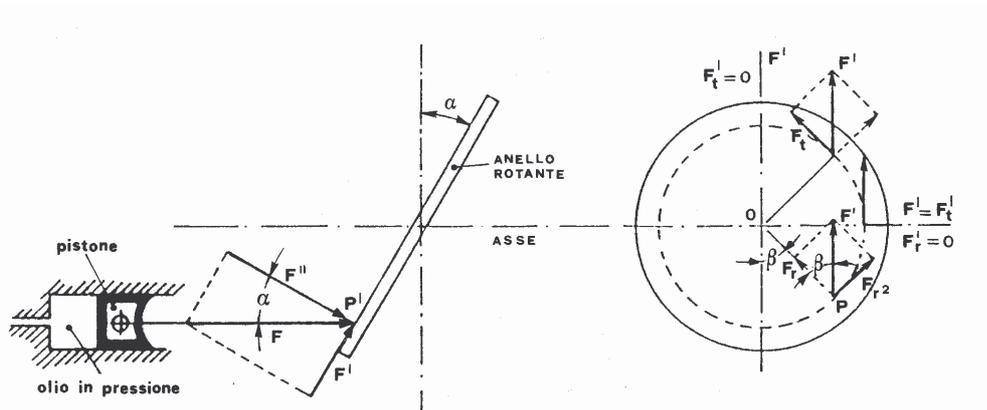
In ciascun cilindro si trova uno stantuffo la cui biella è collegata all'anello rotante.

Il piano della coppa, e quindi quello dell'anello rotante, è però inclinato dell'angolo fisso α rispetto al piano neutro.

Il tamburo portacilindri è collegato sull'albero di uscita, mentre l'anello rotante entro la coppa è collegato allo stesso albero ma mediante un giunto cardanico.

Per quanto riguarda il funzionamento del motore, occorre rendersi conto di come l'olio ad alta pressione, introdotto nei cilindri attraverso una delle due cavità lenticolari della piastra di distribuzione, determini la rotazione dell'anello della coppa, e di conseguenza dell'albero di uscita.

Come si vede nella figura seguente, considerando un solo stantuffo, la forza F , trasmessa dalla biella all'anello rotante, può essere scomposta secondo due direzioni: normale e tangente all'anello stesso.



La componente F'' , normale all'anello è assorbita dai cuscinetti reggispinta (tipo Mitchel); la componente tangente all'anello rotante, che vale:

$$F' = F \operatorname{sen} \alpha$$

può a sua volta essere scomposta secondo due direzioni giacenti sull'anello rotante stesso: una radiale ed una tangenziale (componente attiva) che indicheremo con F'_t .

Detta componente è quella che genera il movimento di rotazione dell'anello e vale, chiamando β l'angolo che la forza F' forma con la congiungente il piede P di biella (punto di applicazione di F') con il centro O dell'anello rotante (vedi figura):

$$F'_t = F' \operatorname{sen} \beta = F \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \beta$$

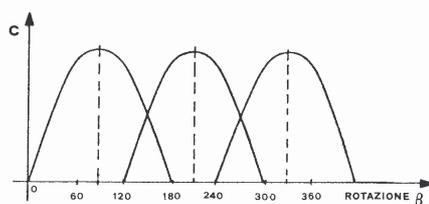
L'espressione della coppia motrice C, per ogni stantuffo, risulta:

$$C = R F'_t = R F \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \beta = K \operatorname{sen} \beta$$

essendo la forza F (per una determinata pressione di lavoro) e la rotazione a costanti.

Utilizzando tre stantuffi si ha la certezza che il motore, una volta alimentato, si porrà in rotazione qualunque sia la posizione iniziale del tamburo portacilindri rispetto alla piastra delle valvole, in quanto uno stantuffo almeno risulterà attivo, cioè in grado di sviluppare la coppia motrice espressa dalla relazione precedente.

L'andamento della coppia motrice in funzione della rotazione dell'albero motore è però fortemente ondulato come si può vedere nella figura seguente.



In tal caso, l'ampiezza della variazione percentuale subita dalla coppia motrice C , espressa dalla formula:

$$\varepsilon\% = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max}} 100$$

è pari a circa il 21%.

Utilizzando, come in effetti si fa, un numero di stantuffi maggiore, detta ondulazione può essere molto ridotta.

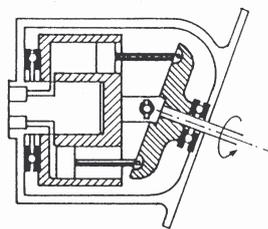
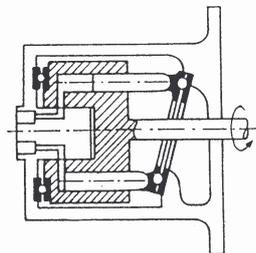
Infatti con un motore che abbia 11 stantuffi, la variazione percentuale della coppia motrice scende al 2,2%.

Il numero di stantuffi, e quindi di cilindri, è sempre dispari per quanto sopra detto ma anche perché il fenomeno dell'ondulazione è minore per un numero dispari che per un numero pari.

A seconda della giacitura dei pistoni rispetto all'asse di uscita, i motori idraulici a stantuffi assiali possono essere suddivisi nelle seguenti due categorie principali:

- *motori ad anello rotante inclinato*, nei quali gli stantuffi rotanti con il tamburo portacilindri poggiano su un anello ad inclinazione fissa rispetto all'asse di uscita:
- *motori a tamburo portacilindri inclinato* (rispetto all'asse di uscita):

Questa seconda soluzione è quella più frequentemente adottata (vedi figura seguente).



Si noti che in questi ultimi due casi entrambi i motori sono alimentati tramite un distributore cilindrico, anziché frontale come indicato nel caso dell'esempio iniziale.

Nella distribuzione realizzata attraverso una piastra distributrice frontale, le perdite idrodinamiche sono ridotte al minimo, ma si è obbligati a tenere il motore aderente alla piastra con una spinta proporzionale alla pressione di lavoro, il che provoca una perdita meccanica per attrito fra i due elementi in moto relativo.

Nella distribuzione realizzata attraverso un distributore cilindrico, le sopracitate perdite meccaniche diminuiscono, ma il fluido idraulico è costretto a percorrere vie più tormentate con frequenti variazioni di sezione e direzione, il che dà luogo, specialmente per gruppi raccolti quali sono quelli impiegati dalla M.M. con elevato rapporto potenza/peso, a perdite idrodinamiche assai consistenti.

La distribuzione a piastra frontale è pertanto complessivamente vantaggiosa e viene normalmente preferita.

CAP.13 - IMPIANTI IDRAULICI CONTROLLATI MEDIANTE POMPE

13.1 - Timonerie

13.1.1-Generalita'

Per inclinare il timone di un certo angolo e mantenervelo, occorre esercitare sull'asse del timone il momento torcente necessario.

Tale momento viene creato per mezzo di varie apparecchiature che, nel loro insieme, prendono il nome di "timoneria".

Queste apparecchiature sono, in sintesi:

- un motore che utilizza una certa forma di energia disponibile a bordo e la trasforma in energia meccanica; esso prende il nome di "servomotore";
- un meccanismo che trasforma l'energia meccanica prodotta dal servomotore in movimento di rotazione dell'asse del timone e che prende il nome di "agghiaccio";
- un meccanismo che serve a controllare il timone a distanza, cioè il "telecomando".

Questa serie di apparecchiature deve essere capace di:

- fornire all'asse del timone il momento torcente necessario per tenerlo inclinato;
- ruotare il timone da un estremo all'altro in un determinato tempo;
- arrestare il moto di rotazione del timone una volta raggiunto l'angolo di barra desiderato;

I servomotori e gli agghiacci sono oggi, a parte casi particolari, tutti di tipo idraulico; ciò significa che la forma di energia disponibile a bordo, l'energia elettrica, viene trasformata in energia idraulica sotto forma di olio in pressione da apposite pompe idrauliche e tale olio in pressione viene inviato in idonei agghiacci dove tale energia viene trasformata in momento torcente sull'asse del timone ottenendone la rotazione.

Prima di passare ad esaminare il servomotore vediamo quali sono i più diffusi agghiacci idraulici; essi sono:

- agghiacci a torchi;
- agghiacci a palmole.

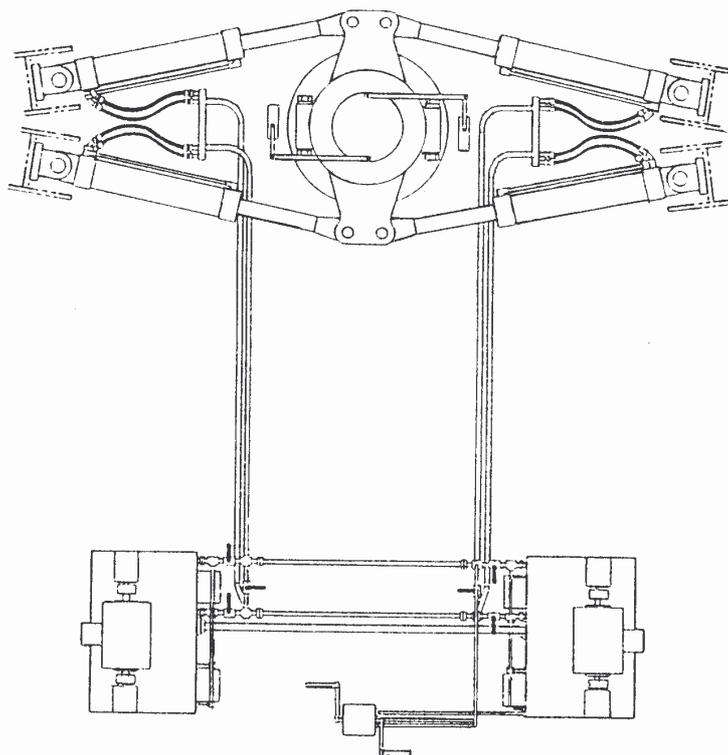
13.1.2 - Agghiaccio a torchi

L'agghiaccio idraulico a torchi è costituito da una o due coppie di cilindri nei quali scorrono altrettanti stantuffi collegati alla traversa del timone.

Tali cilindri, ricevendo o scaricando alternativamente l'olio in pressione, provocano la corsa degli stantuffi e conseguentemente la rotazione della barra del timone.

Per evitare fenomeni di ovalizzazione dei cilindri, dovendosi convertire il moto rettilineo degli stantuffi in moto rotatorio dell'asse del timone, viene spesso sistemato un sistema pattino-guida che, come i più noti testa-croce dei motori diesel due tempi, assorbono la componente trasversale della spinta.

Esaminiamo piu' dettagliatamente un agghiaccio idraulico a quattro torchi (vedi figura seguente).



Come si puo' vedere dalla figura si tratta dunque di due coppie di cilindri opposti, normalmente disposti per chiglia,.

In ogni coppia di cilindri possono scorrere due stantuffi a semplice effetto collegati tra loro da una guida che ha moto rettilineo e che porta una articolazione entro la quale puo' scorrere ciascuna delle estremita' della traversa del timone.

Ogni cilindro e' provvisto di tubazioni che lo collegano ai servomotori, costituiti da pompe a portata variabile.

E' chiaro che, inviando fluido in pressione in due cilindri diagonalmente opposti ed aspirando dagli altri due, o viceversa, gli stantuffi, per mezzo delle guide, obbligheranno la traversa a ruotare in un senso o nell'altro.

Essendo gli assi dei cilindri fissi, il collegamento tra le guide, che hanno moto rettilineo, e le estremita' della traversa, che hanno moto circolare, deve essere scorrevole.

Il circuito idraulico delle timonerie e' realizzato in modo da poter garantire le seguenti condizioni di funzionamento:

- 1) **Funzionamento normale**, con i quattro cilindri tutti in funzione e una qualunque delle due pompe in moto;
- 2) **Funzionamento di emergenza**, con una sola coppia di cilindri in funzione ed una qualunque delle pompe in moto; e' ovvioche con una sola coppia di cilindri in funzione, a parita' di pressione massima disponibile, l'agghiaccio sara' in grado di fornire al timone un momento torcente pari alla meta' di quello di esercizio.

3) **Funzionamento di emergenza per mancata alimentazione**, con due oppure quattro cilindri in funzione; questo tipo di funzionamento si realizza quando entrambe le elettropompe sono in avaria oppure quando manca energia elettrica.

Esso prevede l'impiego di una pompa a mano volumetrica ad ingranaggi comandata da una o più ruote a cavigliache, aspirando olio da due cilindri diagonalmente opposti, lo invia agli altri due, e viceversa in quanto mandata e aspirazione si possono invertire semplicemente invertendo il senso di rotazione della pompa.

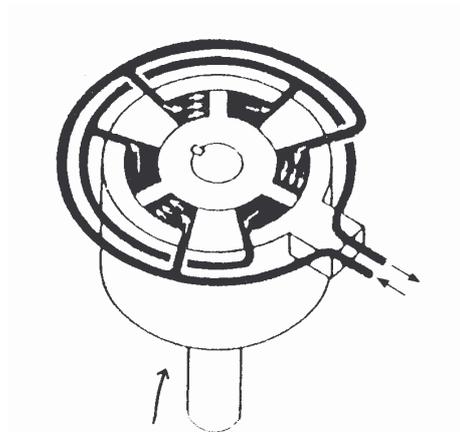
Tutto l'impianto è sotto battente tramite una cassa o serbatoio d'olio, che è la stessa che alimenta anche le elettropompe.

Con questo sistema, la cui potenza è limitata e dipende dal lavoro umano, le velocità di rotazione del timone risultano molto basse. esse dipendono anche dalla velocità della nave e dall'angolo di barra raggiunto.

Nelle navi più grandi, ove lo sforzo da compiere sarebbe maggiore, la pompa ad ingranaggi è mossa da un motore diesel, il cui funzionamento è quindi indipendente dalle sorgenti di energia di bordo.

13.1.3 - Agghiacci a palmole

Un altro tipo di agghiaccio di tipo idraulico più moderno è il cosiddetto "agghiaccio a palmole" (vedi figura seguente).



Esso permette di realizzare direttamente sull'asse del timone il momento torcente mediante un movimento di rotazione, senza passare attraverso un movimento lineare.

L'agghiaccio a palmole è in definitiva un motore idraulico il cui statore è fissato allo scafo ed il rotore all'asse del timone; consiste in un rotore centrale calettato e inchiodato sull'asse del timone e dotato di due o tre alette radiali o **palmole**, che possono ruotare a tenuta in una cassa o camicia cilindrica fissa divisa in tante camere quante sono le palmole a mezzo di alette fisse.

La tenuta è realizzata per mezzo di apposite guarnizioni di gomma o altro materiale analogo, anulari o a segmenti rettilinei.

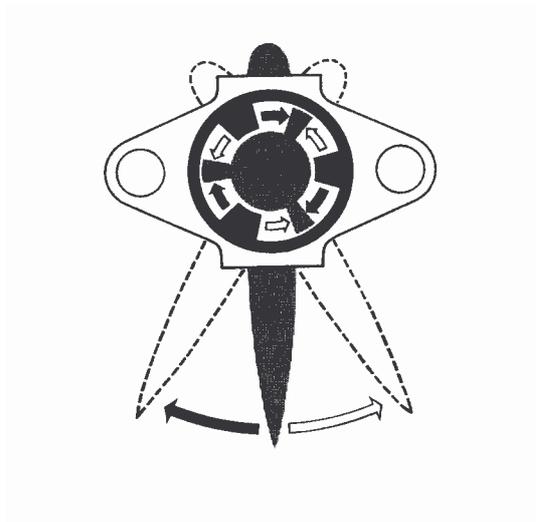
La camicia esterna, o statore, e' fissata alle fondazioni dello scafo mediante ammortizzatori, allo scopo di ridurre le vibrazioni e di permettere una leggera liberta' di movimento all'asse del timone in quanto il timone puo' essere sollecitato da forze esterne variabili ed improvvise.

Le camere tra le alette fisse e le alette mobili, dette anche "camere di pressione", sono collegate alternativamente a due condotti anulari, a loro volta collegati alle elettropompe costituenti i servomotori; tali condotti sono in genere ricavati uno nella parte superiore ed uno in quella inferiore dello statore.

Collegando un collettore con la *mandata* e l'altro con l'*aspirazione* della pompa, il timone, per effetto della spinta generata dalla pressione dell'olio sulle alette mobili ruota in un senso e nell'altro; sul collettore sono inoltre sistemate apposite valvole di intercettazione, di sicurezza e di alimentazione.

Il numero delle palmole e' legato all'angolo massimo che si vuole ottenere sull'asse del timone ed al momento torcente da realizzare; e' ovvio che, a parita' di momento torcente da realizzare e di pressione disponibile, l'ingombro dell'agghiaccio e' legato alla superficie totale delle palmole e quindi anche al loro numero.

In genere vengono utilizzati impianti con 3 camere di pressione, in quanto normalmente l'angolo massimo di inclinazione del timone e' di 35-40 gradi per parte, cioe' 70-80 gradi in totale (vedi figura seguente).



Con 3 camere di pressione sono necessari quindi 210-240 gradi di rotazione, che lasciano un ampio margine per lo spessore delle 3 alette fisse e delle 3 alette mobili ($\frac{360-240}{6} = 20$ gradi).

13.1.4 - Servomotore idraulico

Per far funzionare un agghiaccio idraulico, sia esso a torchi che a palmole, e' necessario alimentarlo con un opportuno fluido in pressione.

Occorre quindi una pompa per fornire detto fluido all'agghiaccio, cioe' per far ruotare il timone; per tale scopo viene ormai comunemente adottato sulle navi un particolare tipo di pompa a portata variabile (*tipo Janney*) che abbiamo gia' incontrato.

Si tratta, come abbiamo visto, di una pompa in grado di assicurare ad un sistema oleodinamico ricevente la condizione di *stallo*, cioè di arresto bloccato in una posizione qualunque ed una serie continua di condizioni di funzionamento caratterizzate da mandate ed aspirazioni *invertibili* e da portate *variabili* da zero ad un valore massimo, pur essendo trascinata dal motore primo ad un numero di giri costante ed in un solo senso di rotazione.

Nella timoneria elettroidraulica quindi, una volta messo in moto il motore elettrico, esso ruota a numero di giri costante, assorbendo una maggiore o minore quantità di corrente a seconda delle portate richieste.

Oltre agli organi essenziali per il funzionamento della pompa ne esistono altri, complementari, che adesso esamineremo.

Poiché i cilindri si trovano alternativamente in fase di mandata e di aspirazione, una metà di essi contiene sempre olio in fase di spinta verso l'organo utilizzatore e quindi in pressione; ne consegue che esiste una forte spinta relativa tra blocco cilindri ed i relativi pistoni e quindi, attraverso le bielle, tra il blocco cilindri e l'anello portabielle.

Quest'ultimo è così spinto contro il piatto oscillante; proprio per questo occorrono cuscinetti reggispinta tra l'anello inclinabile ruotante ed il suo supporto solo inclinabile; non essendo inoltre le spinte centrate, occorrono anche adeguati spallamenti laterali.

Il blocco cilindri invece preme sulla piastra distributrice, e la spinta che esso esercita assicura l'aderenza tra le due parti, evitando perdite di fluido in pressione; la lubrificazione è assicurata dal flusso continuo di olio.

Poiché la mandata è ciclicamente uguale all'aspirazione, non dovrebbe essere necessario aggiungere olio al circuito; in pratica, per le piccole perdite che si possono avere nella pompa ed in corrispondenza dell'agghiaccio (per esempio sulle tenute tra i pistoni ed i cilindri dei torchi idraulici), si ha invece la necessità di un periodico rifornimento.

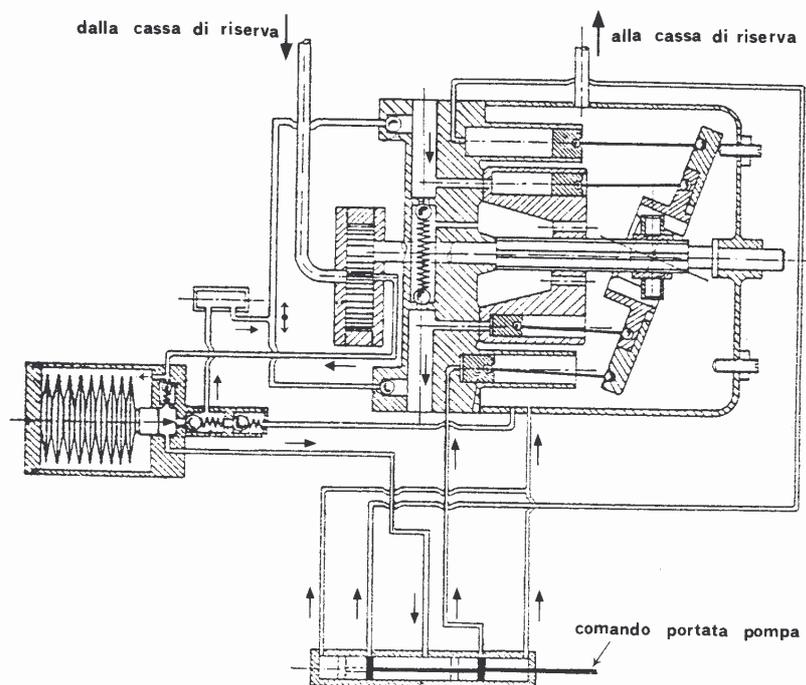
Questo rifornimento lo si realizza per mezzo delle valvole di riempimento, in genere alloggiato nella testata, che consentono il passaggio di olio dall'esterno all'interno del circuito principale, quando nel ramo di aspirazione la pressione scende al di sotto di un determinato valore; tali valvole sono del tipo a sfera e possono aspirare direttamente dal corpo pompa o dal circuito ausiliario.

Potendo trovarsi ciascun ramo del circuito idraulico principale indifferentemente in fase di aspirazione o di mandata, è necessario disporre una valvola di riempimento su entrambi i condotti della pompa; analogamente si hanno due valvole di sicurezza.

Queste ultime hanno la funzione di sorpassare (by-pass) i collettori principali della pompa, quando la pressione del ramo in mandata supera un certo valore, che si può fissare tarando opportune molle.

Raramente il piatto oscillante è comandato meccanicamente da una apposita leva che fuoriesce dalla pompa; normalmente esso invece viene comandato idraulicamente mediante quattro pistoni, scorrevoli in appositi cilindri, ad esso collegati con bielle come mostrato nella figura seguente

(ricordiamo che il piatto si inclina ma non ruota per cui anche tali cilindri e pistoni di comando sono fissi).



I cilindri sono controllati, a due a due, da un apposito cassetto di distribuzione; e' ovvio che, in questo caso, occorre un circuito idraulico ausiliario di asservimento, esso e' in genere alimentato da una piccola pompa a portata costante trascinata dall'asse della pompa principale.

L'involucro esterno della pompa a portata variabile e' stagno ed ha la funzione di assicurare l'immersione di tutti gli organi meccanici della stessa pompa nel fluido idraulico e quindi la loro lubrificazione; esso e' collegato ad un serbatoio di riserva che lo alimenta quando necessario.

Inoltre, per fenomeni di attrito fluido o meccanico all'interno e per sbattimento di olio da parte di organi rotanti, nella pompa si genera una certa quantita' di calore che e' necessario asportare con continuita'; a tale scopo e' prevista una adeguata circolazione tra il serbatoio di riserva ed il corpo della pompa.

Infatti la pompetta ausiliaria aspira dalla cassa di riserva e alimenta il cassetto di distribuzione che scarica nel corpo della pompa dove, attraverso una valvola, scarica anche l'eccesso di portata della pompetta.

Il corpo della pompetta contiene anche gli organi meccanici di fine corsa dell'inclinazione del piatto oscillante.

In genere il progettista fissa l'inclinazione massima in relazione alla pressione prevedibile necessaria all'utilizzatore del circuito idraulico; e' chiaro infatti che, a parita' di potenza disponibile, quanto piu' elevata e' la pressione di funzionamento della pompa, tanto minore dovra' essere la portata, cioe' l'inclinazione del piatto.

La portata massima teorica di una pompa Janney, corrispondente alla massima inclinazione del piatto (circa 15-20 gradi) varia, sulle nostre Unità militari, da 200 a 600 lt/min; tale portata è legata anche alla velocità di rotazione della pompa (pari a circa 700 giri/min.).

In genere comunque la portata della pompa viene sfruttata solo in parte (circa la metà di quella massima), riducendo l'angolo di inclinazione del piatto a valori inferiori ai 10 gradi; la pressione massima di esercizio varia dai 100 ai 200 bar.

13.1.5 - Telecomandi

Abbiamo visto in precedenza che per controllare il timone a distanza è necessario un telecomando.

Esso consiste essenzialmente in un sistema di *"teletrasmissione di posizioni"* e in un *"asservimento"*.

Il primo permette di ripetere in locale agghiaccio l'esatta posizione della ruota del timone, manovrata dal timoniere nella stazione di governo in Plancia, e consiste in un teletrasmettitore ed in un telericevitore opportunamente collegati.

Il secondo permette di fermare il timone quando questo raggiunge la posizione voluta e consiste in un dispositivo che comanda il servomotore in funzione della differenza tra l'ordine impartito e la posizione effettiva del timone; è chiaro che, mancando l'asservimento, ogni manovra del timoniere, anche molto piccola, provocherebbe la generazione di una certa portata da parte della pompa e la rotazione indefinita del timone fin sugli scontri.

I telecomandi sono, in definitiva, dei sistemi di controllo a distanza; i più diffusi sono quelli di tipo elettrico, idraulico o misto, la scelta da parte del progettista dipende, ovviamente, dalla particolare applicazione da realizzare.

I sistemi elettrici presentano molti vantaggi su quelli idraulici, quali la grande semplicità costruttiva, la sicurezza di esercizio, la flessibilità e la possibilità di ottenere notevoli amplificazioni dei segnali; hanno però lo svantaggio, per quanto riguarda i controlli di posizione, di avere il rapporto coppia su inerzia relativamente basso e pertanto non permettono di realizzare grandi accelerazioni.

Questo non accade per i sistemi idraulici, che però sono più complessi e richiedono maggiori manutenzioni; questi impiegano fluidi incompressibili (olio o liquidi speciali) e la loro efficienza si riduce rapidamente in caso di perdite anche lievi.

Nelle timonerie oggi si usano telecomandi prevalentemente elettrici per quanto riguarda la teletrasmissione di posizione e telecomandi meccanici per quanto riguarda l'asservimento.

Esamineremo meglio in seguito gli organi citati; vediamo invece adesso alcune generalità sugli impianti di telecomando.

L'angolo impostato dal timoniere nella macchina del timone si chiama *"angolo di assiometro"*, mentre quello effettivamente raggiunto dal timone si chiama *"angolo di barra"*.

Tali angoli sono rilevabili su appositi *indicatori di assiometro* e *indicatori di barra*, il primo dei quali si muove in sincronismo con la ruota di governo, il secondo ripete la posizione del timone e permette quindi di controllare il ritardo della timoneria nell'eseguire la manovra ordinata.

Il timoniere, nel governare la nave, deve tener presente che la facilità di manovra della ruota di governo non è in relazione con le caratteristiche della macchina del timone, il cui servomotore idraulico consente l'escursione del timone da banda a banda in circa 30 secondi.

È quindi inutile imprimere alla ruota di governo velocità ed accelerazioni elevate che si traducono in sollecitazioni inutili dei telecomandi, senza rendere più rapida la rotazione del timone.

In pratica, poiché il piatto oscillante della pompa a portata variabile raggiunge la massima inclinazione per una differenza tra angolo di assiometro e angolo di barra di circa 15 gradi, è inutile anticipare l'angolo di assiometro oltre questo valore.

Esaminiamo adesso brevemente le varie possibilità di governo sulle nostre navi.

Si ha il *governo normale* quando si controlla la macchina del timone dalla Plancia con una qualsiasi delle due linee di governo, quella di dritta o quella di sinistra, commutabili dalla Plancia.

Si ha il *governo di emergenza* quando si controlla la macchina del timone dalla stazione di governo ausiliaria mediante un telecomando meccanico od idraulico, oppure quando si controlla meccanicamente la macchina del timone dallo stesso locale agghiaccio.

Sia dalla Plancia che dalla stazione di governo ausiliaria si possono trasmettere ordini di barra in locale agghiaccio mediante una rete di teletrasmissione di posizione.

Ovviamente trascuriamo qui la manovra di emergenza con pompa a mano in quanto essa non prevede telecomando.

Sulle Unità più recenti gli impianti di teletrasmissione di posizione sono tutti elettrici; tali dispositivi sono comunemente denominati *syncro*.

13.1.6 - I syncro

L'affidabilità e la riproducibilità del segnale in uscita di un trasduttore sono ormai elementi primari che ne influenzano la scelta.

Dopo svariati tentativi dei costruttori di impianti di automazione di trasportare le informazioni all'unità centrale dell'impianto usufruendo di sistemi pneumatici, potenziometrici o comunque in tensione, si è visto che a causa degli errori intrinseci nel sistema di trasmissione impiegato, le informazioni che giungono all'unità centrale dell'impianto sono del tutto inadeguate allo standard raggiunto oggi dai sistemi di controllo.

A tutt'oggi, uno dei sistemi di trasmissione che garantisce la migliore riproducibilità del segnale al variare della tensione e della frequenza di alimentazione, è quello che prevede l'impiego dei syncro.

Infatti, ammettendo una variazione di tensione del 10% e di frequenza del 15%, con detti apparecchi si riescono a contenere gli errori entro lo 0,27%, valore di tutto rispetto.

La funzione principale dei sincro e' quella di trasformare rotazioni angolari o spostamenti meccanici in grandezze elettriche; differenti tipi di sincro sono usati in un gran numero di applicazioni che vanno dagli strumenti indicatori ai servosistemi di altissima precisione.

Un sincro e' costruttivamente molto simile ad un motore elettrico con uno statore laminato ed un rotore con uno o piu' avvolgimenti.

I sincro si dividono fondamentalmente in due tipi:

- **sincro di segnale;**
- **sincro di coppia;**

I sincro di segnale, ad esempio il *trasmettitore-trasformatore di controllo*, sono cosi' chiamati perche' convertono la differenza delle posizioni angolari di due alberi in un segnale elettrico.

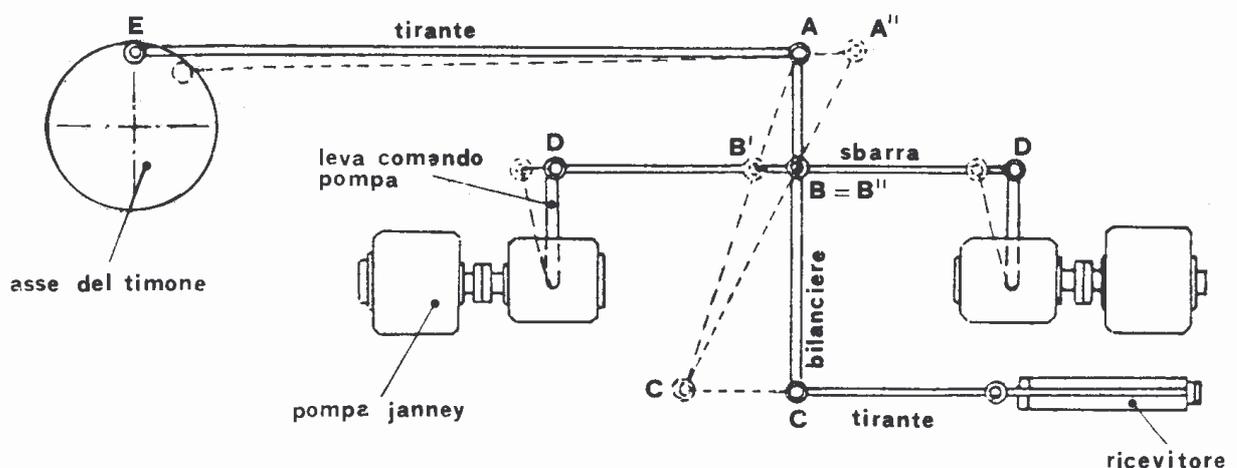
I sincro di coppia, invece, convertono la differenza delle posizioni angolari di due alberi in una coppia applicata agli stessi tendente a riportarli allineati tra di loro; in tal caso uno dei due sincro prende il nome di *trasmettitore* e l'altro di *ricevitore*.

I due tipi di sincro suddetti sono molto simili tra loro, differiscono solo per le impedenze degli avvolgimenti elettrici e per il tipo di collegamento.

Tra i sincro di segnale meritano particolare menzione i sincro **differenziali** che hanno gli avvolgimenti, statorico e rotorico, entrambi di tipo trifase e che vengono utilizzati per effettuare la somma algebrica di segnali angolari, ad esempio la somma di un angolo rappresentato da un segnale elettrico con un angolo rappresentato dalla rotazione di un albero (segnale meccanico) per ottenere, in uscita, un segnale elettrico proporzionale all'angolo somma algebrica dei precedenti, oppure per ottenere la rotazione dell'albero del rotore come risultante della somma algebrica di due segnali elettrici rappresentanti due valori angolari.

13.1.7 - Asservimenti

Nella figura seguente e' riportato lo schema di principio di un asservimento per timoneria di tipo meccanico.



Le due pompe a portata variabile, di cui in genere una sola in funzione, o meglio le leve di comando dei relativi piatti oscillanti, sono manovrate contemporaneamente mediante una sbarra.

Nel punto B di tale sbarra e' collegato un bilanciante che e' a sua volta collegato nell'estremita' C al ricevitore mediante un tirante e nell'estremita' A all'asse del timone mediante un altro tirante.

Quando il telericevitore, in conseguenza dell'azione del timoniere sul teletrasmettitore, sposta l'estremita' C del bilanciante, per esempio a sinistra in C', il punto A, che e' fermo in quanto il timone ancora non sta ruotando, funge da fulcro.

Il punto B si sposta cosi' anch'esso verso sinistra, in B', trascinando la sbarra ed inclinando di un certo angolo i piatti oscillanti delle pompe; la pompa in moto provoca cosi' la rotazione in senso orario del timone.

Questo, ruotando, sposta pero' verso destra in A" l'estremita' A del bilanciante che, essendo fulcrato sull'altra estremita' in C', che adesso e' ferma, sposta a destra anche B.

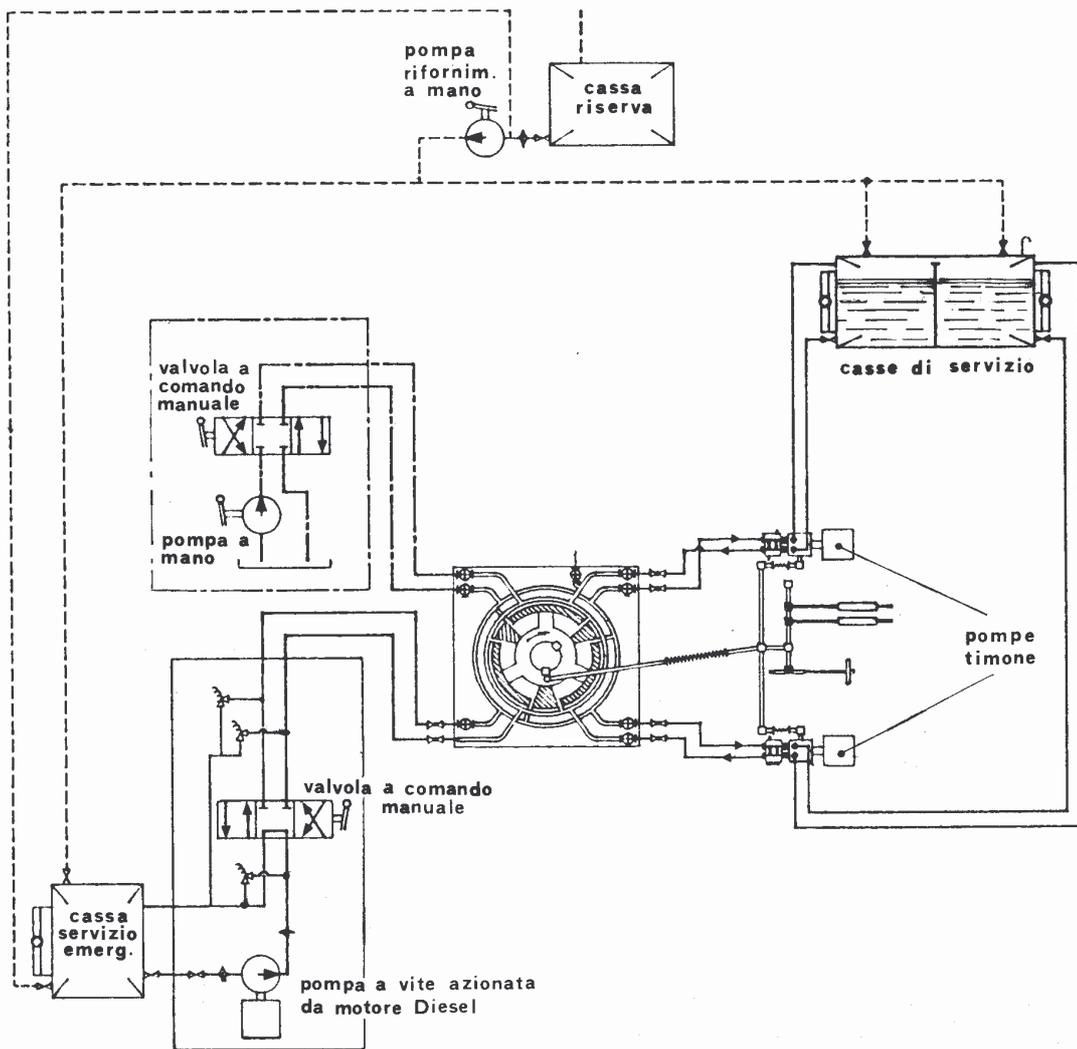
Il timone si fermere' quando la pompa avra' la leva di comando del piatto oscillante in posizione verticale, portata nulla, e questo avviene quando il punto B sara' tornato nella posizione iniziale.

I piatti oscillanti delle pompe sono cioe' azionati dalla differenza tra ordine trasmesso dalla Plancia e risposta corrispondente alla reale posizione del timone.

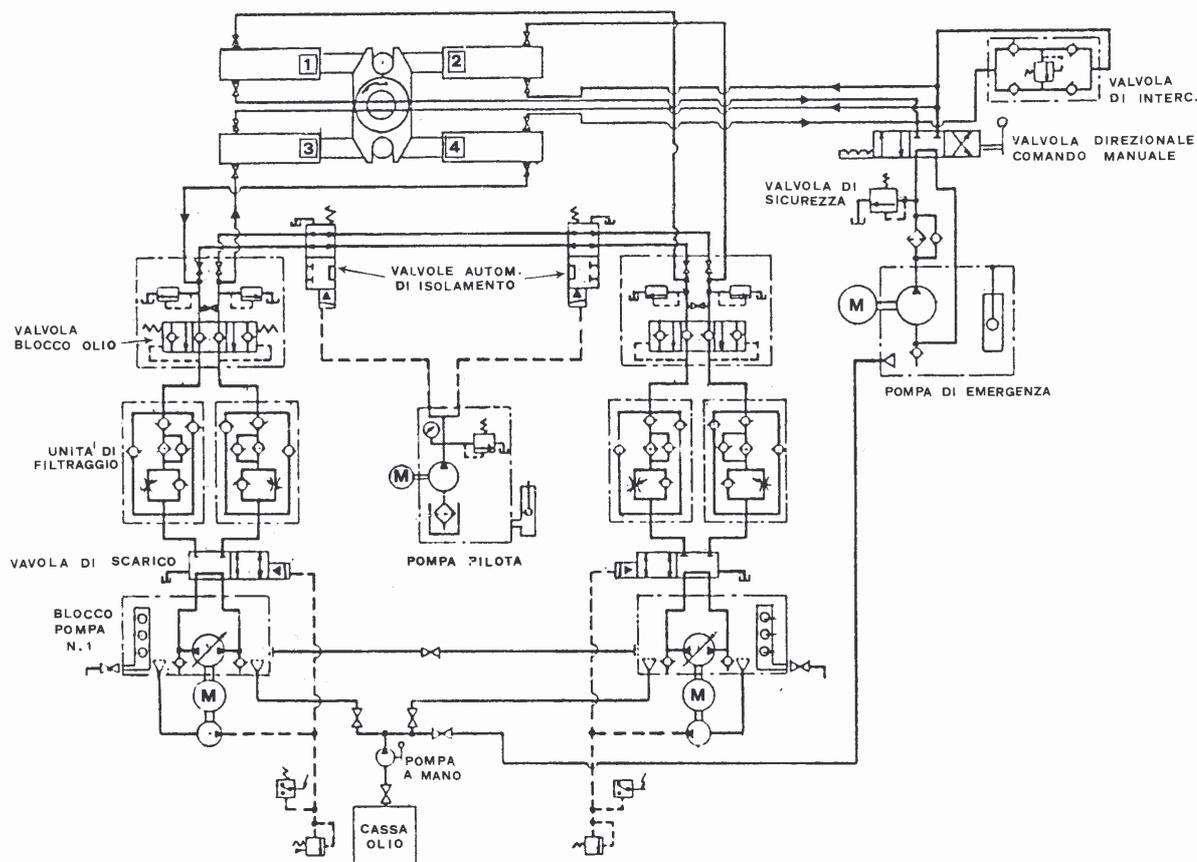
Nella schematizzazione fatta prima abbiamo supposto dapprima fisso il punto A, fulcro iniziale, e poi fisso il punto C; in realta', tranne l'istante iniziale, entrambi i punti si spostano contemporaneamente, per cui l'inclinazione del piatto oscillante, e quindi la portata della relativa pompa, dopo aver raggiunto il valore massimo consentito dagli scontri, diminuisce gradualmente fino ad annullare completamente la portata quando il timone avra' raggiunto l'angolo ordinato.

In definitiva l'asservimento e' il *regolatore*, di tipo *proporzionale*, di un *sistema di regolazione retroazionato* di tipo meccanico, in cui la *variabile regolata* e' l'angolo del timone (angolo di barra), il *set-point*, variabile, e' l'ordine del timoniere (angolo di assiometro), l'*attuatore* e' la pompa a portata variabile ed il relativo agghiaccio, il *processo* e' la rotazione del timone ed infine l'errore, o *scostamento*, e' la differenza tra l'angolo di assiometro e l'angolo di barra.

Nelle figure seguenti sono riportati gli schemi di flusso di una timoneria con agghiaccio a palmole...



e con agghiaccio a torchi idraulici...



13.2 - Pinne stabilizzatrici

13.2.1 - Generalita'

Gli impianti per l'inclinazione delle pinne stabilizzatrici sono sempre di tipo idraulico e, per molti aspetti, simili a quelli appena visti per i timoni.

Gli attuatori sono generalmente costituiti da torchi idraulici a semplice o doppio effetto, singoli o a coppie, oppure da motori idraulici a palmole.

Tali attuatori sono alimentati da gruppi di forza costituiti essenzialmente da pompe a portata variabile.

Le pompe ausiliarie sono invece a portata costante, ad ingranaggi o, in qualche caso, a palette.

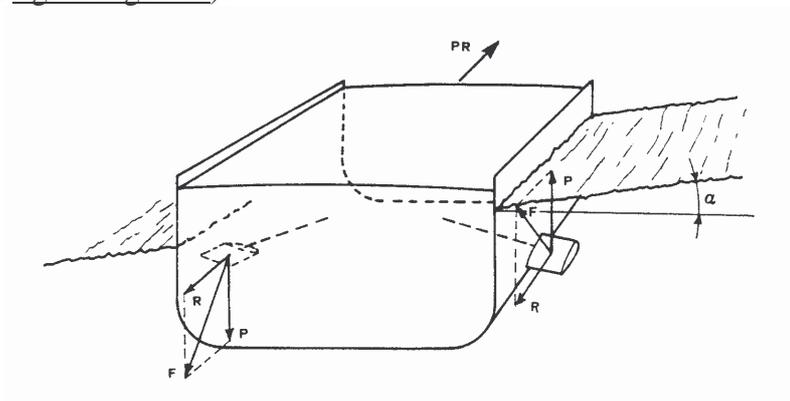
Su alcune Unità sono previste pinne retrattili in modo da consentirne il ricovero in recessi ricavati nello scafo nel caso di manovre in porto, non impiego in navigazione ecc.; anche in questo caso le manovre di fuoriuscita e rientro delle pinne sono assicurate da appositi impianti idraulici.

13.2.2 - Cenni storici

Nel 1920 il giapponese *Motora*, allora capo della Vasca Sperimentale del Cantiere Navale di Nagasaki e delle Officine di Costruzioni Navali e Meccaniche Mitsubishi, ideò e applicò

sperimentalmente un sistema di stabilizzazione che sfruttava la velocità della nave per la generazione di una certa portanza da parte di due alettoni mobili orientabili, cioè appunto le pinne stabilizzatrici, sistemate una per lato della nave all'altezza del ginocchio.

La portanza generata da ciascuna pinna, assieme a quella generata dall'altra pinna, consente di ottenere una coppia che in ogni istante si oppone allo sbandamento della nave contribuendo alla sua stabilizzazione (vedi figura seguente).



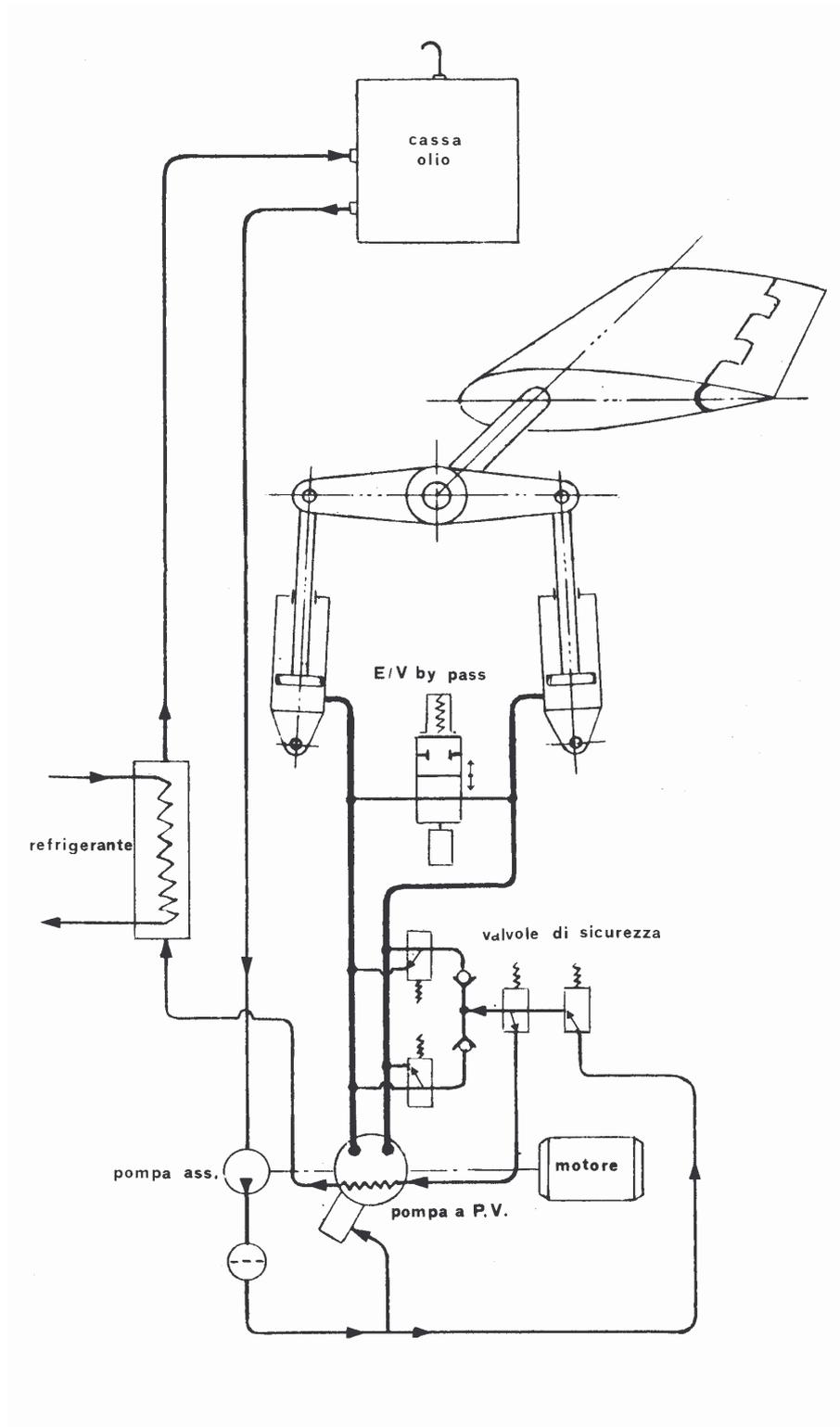
Diversi anni dopo (1936) *Denny Brown* ha ripreso e perfezionato tale sistema portandolo alla configurazione che attualmente è in uso sulle navi militari e su quelle mercantili di una certa importanza.

La differenza tra il sistema *Motora* ed il sistema *Denny Brown* è che nel primo si ha l'inversione dell'angolo degli alettoni mobili ad ogni passaggio della nave per la posizione dritta, mentre nel secondo l'inversione avviene ad ogni estremo di sbandata.

È evidente che è più razionale il sistema *Denny Brown* in quanto gli alettoni mobili compiono una azione smorzante anche durante il ritorno della nave verso la posizione dritta, e quindi tendono a ridurre la velocità di rollio.

13.2.3 - Circuito idraulico

Esaminiamo adesso lo schema idraulico di principio di un impianto di stabilizzazione a pinne fisse, relativo ad una pinna, rappresentato nella figura seguente.



In esso si puo' notare il *circuito di inclinazione* delle pinne, tratto di spessore maggiorato, ed il *circuito d'asservimento*.

Nel caso specifico la pinna e' inclinata dai torchi idraulici i cui cilindri sono alimentati da una pompa a portata variabile e possono essere messi in sorpasso mediante un'*elettrovalvola di sorpasso* in modo da centralizzare la pinna in assetto di riposo.

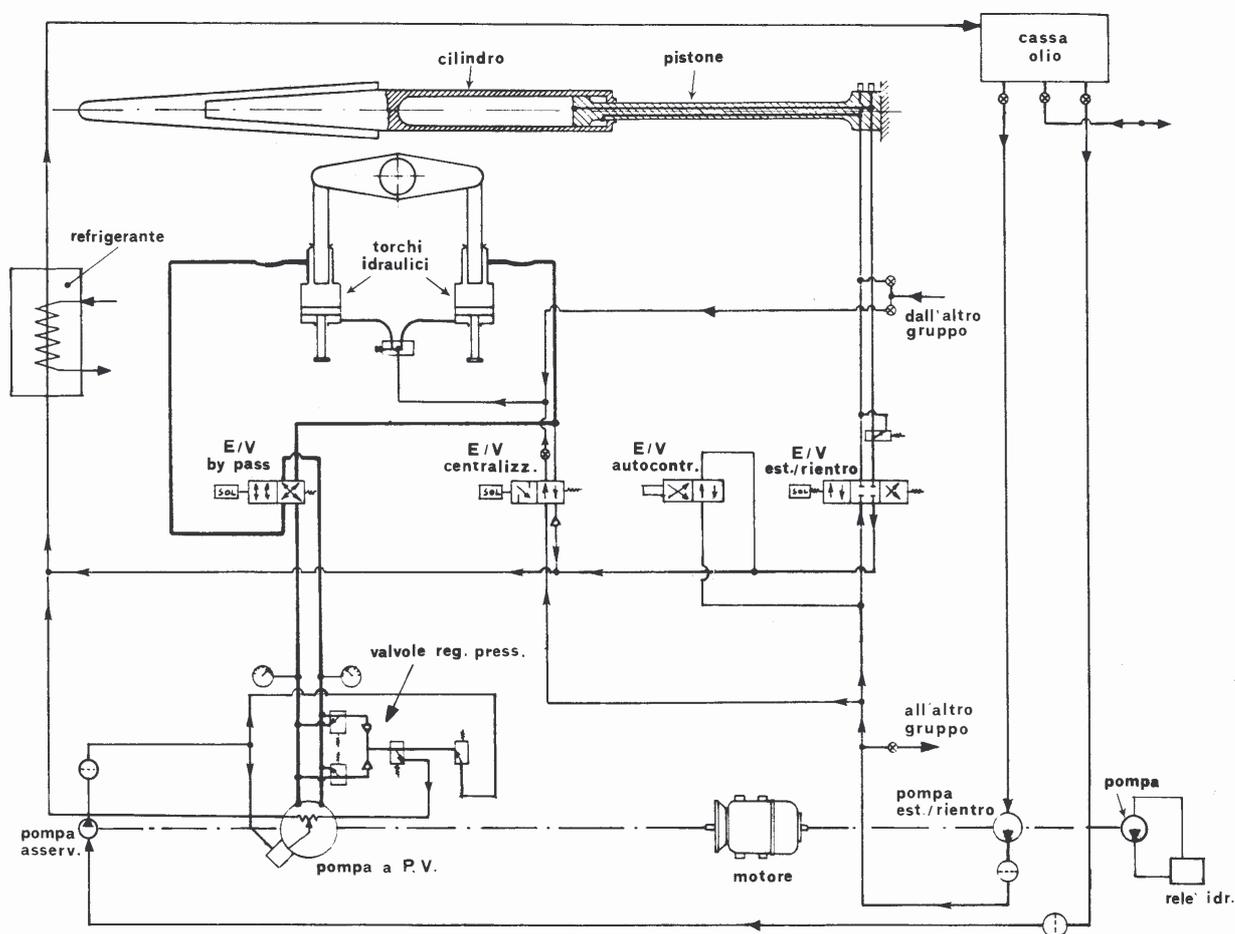
La pompa a portata variabile e' trascinata da un motore elettrico che trascina pure una pompa a portata costante.

Quest'ultima aspira da una cassa di olio e, attraverso un filtro, alimenta il servomotore di controllo dell'inclinazione del piatto oscillante della pompa a p.v., mentre, attraverso una valvola riduttrice, una valvola di sfioro e le valvole di alimento (non ritorno), ripristina eventuali perdite di olio nel circuito principale di forza.

L'eccedenza di olio di alimentazione, cosi' come l'olio di scarico dell'asservimento, dopo aver sottratto calore alla pompa a p.v., torna alla cassa olio passando per il refrigerante ad acqua di mare.

Alcune valvole di sicurezza, infine, completano il circuito mettendo in comunicazione mandata e aspirazione della pompa a p.v. in caso di eccessiva pressione sulla mandata.

Nella figura seguente invece, e' stato riportato lo schema idraulico di principio di un impianto di stabilizzazione a pinne retrattili, relativo ad una pinna.



Questa volta si possono trovare vari circuiti separati: quello d'inclinazione, quello di asservimento, quello di centralizzazione e quello di estensione e rientro.

La pinna viene inclinata dai torchio idraulici i quali, tramite i condotti di inclinazione, fanno capo alla pompa a p.v. trascinata da un motore elettrico.

Una e/valvola permette l'inclinazione alternata della pinna, oppure il sorpasso sia della pompa che dei torchi idraulici.

La pompa a portata costante, trascinata dallo stesso motore elettrico, alimenta, attraverso il filtro, il circuito di asservimento.

Essa fa capo al servomotore di controllo dell'inclinazione del piatto oscillante della pompa e al circuito di alimento e di lubrificazione/refrigerazione della stessa pompa, mediante valvole riduttrici di pressione e di sfioro.

L'olio defluisce poi nel collettore di scarico lungo il quale perviene, passando per il refrigerante ad acqua di mare, alla cassa dell'olio

Dalla cassa aspira anche la pompa a portata costante che alimenta il circuito di estensione e rientro.

Tale pompa, attraverso un filtro e un'e/valvola, mette in pressione una delle due camere del cilindro a doppio effetto di estensione e rientro, mentre l'altra camera, sempre attraverso una e/valvola, e' messa in comunicazione col collettore di scarico.

L'e/valvola suddetta ha tre posizioni e permette rispettivamente l'estensione, il rientro ed il blocco della pinna nella posizione voluta.

La stessa pompa a portata costante alimenta anche il circuito di centralizzazione attraverso una e/valvola a due posizioni.

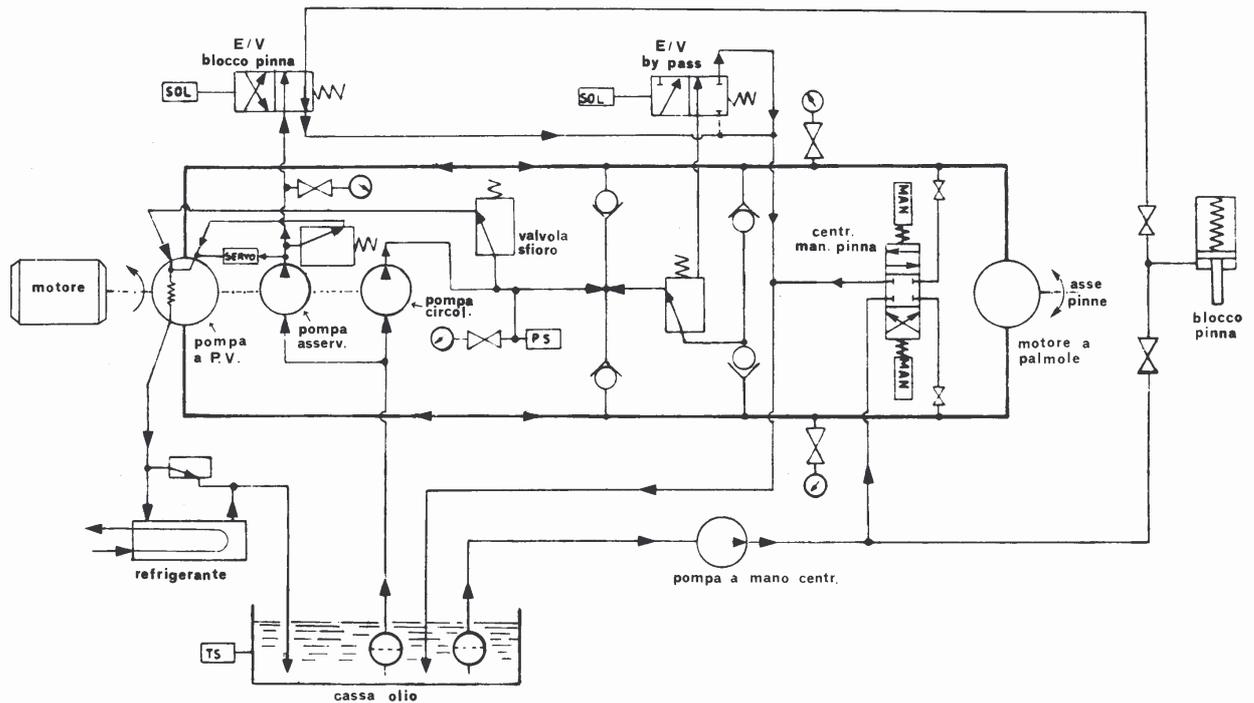
Durante la fase di centralizzazione essa mette in alimento i torchi idraulici, lato centralizzazione, mentre mette in scarico gli stessi torchi, lato inclinazione, già' sorpassati dalla e/valvola.

Durante la fase di inclinazione essa intercetta la mandata di centralizzazione e mette in scarico i torchi idraulici, lato centralizzazione.

13.2.4 - Esempi di impianti a pinne fisse in uso nella M.M.

Nave DORIA, le Unità' classe ALPINO e quelle della classe LUPO adottano un impianto di stabilizzazione a pinne fisse *Gyrofin C.N.R. - Sperry*.

Lo schema dell'impianto oleodinamico relativo ad ogni pinna e' riportato nella figura seguente.



In esso sono, come al solito, individuabili i seguenti circuiti:

- (a) *circuito idraulico di inclinazione della pinna*: la pompa a p.v., servocomandata, alimenta il motore a palmole direttamente calettato sull'asse portapinna
- (b) *circuito di alimento e circolazione della pompa a p.v.*: lo stesso motore elettrico che trascina la pompa a p.v., trascina anche la pompa a portata costante che serve il circuito di alimento e di circolazione della pompa a p.v., rispettivamente attraverso valvole di alimento e di sfioro.
- (c) *circuito di asservimento della pompa a p.v. e di blocco delle pinne*: la pompa a portata costante, coassiale alle precedenti, alimenta il circuito di asservimento per il servomotore di comando dell'inclinazione del piatto della pompa a p.v. ed il circuito per il blocco della pinna in fase di riposo; tale blocco è effettuato da un dispositivo comandato da una e/v la quale mette il cilindro del blocco in comunicazione con l'olio in pressione o con lo scarico: nel primo caso il pistone comprime la molla estraendo il fermo dall'apposita cavità dell'albero portapinna, nel secondo invece la molla fa uscire lo stesso perno.
- (d) *circuito di centralizzazione manuale della pinna*: un dispositivo manuale, costituito da una pompa a mano, da un distributore a comando manuale, da un filtro e dalle valvole di intercettazione, permette la centralizzazione della pinna in condizioni di emergenza, quando cioè è in avaria il circuito principale di inclinazione.
- (e) *circuito di drenaggio*: il circuito raccoglie gli scarichi delle varie ee/vv e del dispositivo di blocco della pinna e li convoglia nella cassa dell'olio; alla stessa cassa viene pure inviato, attraverso il refrigerante ad acqua di mare, l'olio di circolazione della pompa a p.v.

CAP.14 - LA STABILIZZAZIONE AL ROLLIO MEDIANTE PINNE ATTIVE

14.1 - Studio elementare del rollio delle navi

Se una nave, galleggiante diritta in condizioni di equilibrio stabile, viene inclinata trasversalmente di un certo angolo α e poi viene abbandonata a se stessa, ritorna nella posizione diritta per effetto della coppia di stabilità.

In questo movimento la massa della nave acquista una certa energia dinamica per cui, una volta raggiunta la posizione diritta di equilibrio iniziale, essa non si arresta, ma si inclina dalla parte opposta, compiendo così una serie di *oscillazioni di rollio* intorno alla posizione di equilibrio (che sarebbero in numero infinito se non intervenisse la resistenza dell'acqua a ridurle gradatamente fino ad annullarle).

Si ammette in genere che queste oscillazioni avvengano attorno ad un asse fisso orizzontale, giacente sul piano di simmetria della nave e passante per il baricentro G della stessa. Questa ipotesi non corrisponde alla realtà, in quanto l'asse di istantanea oscillazione passa in effetti per un punto che, durante l'oscillazione, varia di posizione da istante a istante, ma è giustificato dal fatto che tale punto, detto *punto tranquillo*, è molto vicino al centro di gravità ed ha uno spostamento minimo durante le oscillazioni.

A questo movimento principale si accompagnano sempre, nel caso di navi di forme ordinarie, due movimenti secondari costituiti da oscillazioni di beccheggio e da oscillazioni di sussulto.

Le *oscillazioni di beccheggio* sono dovute alla differenza di forma tra la prora e la poppa della nave, per cui, nello sbandamento trasversale, il centro di carena si sposta anche longitudinalmente, dando luogo ad una coppia inclinante longitudinale.

Le *oscillazioni di sussulto* sono invece dovute al fatto che nelle inclinazioni trasversali, specialmente se rapide e per navi di forma molto stellata, il menisco di immersione può non avere, in un certo istante, lo stesso volume del menisco di emersione, e ciò determina momentanei squilibri tra peso e spinta, per cui la nave, per trovare la isocarena relativa ad ogni inclinazione, deve spostarsi verticalmente.

Vediamo adesso alcune definizioni per quanto riguarda le oscillazioni di rollio.

Si definisce *oscillazione completa* il movimento angolare che la nave compie per passare da un estremo all'altro dell'inclinazione e per tornare alla posizione di partenza.

Si definisce invece *oscillazione semplice* il movimento angolare che la nave compie per passare da un estremo all'altro dell'oscillazione.

Il *periodo di oscillazione* T è il tempo impiegato a compiere un'oscillazione completa, mentre l'*ampiezza di oscillazione* è il valore dell'angolo descritto dalla nave in un'oscillazione semplice.

14.1.1 - Rollio della nave in mezzo calmo

Fatte queste considerazioni generali, vediamo di studiare analiticamente le oscillazioni di rollio della nave in acqua calma.

Si fanno le seguenti ipotesi semplificative:

- il moto della nave avviene attorno all'asse fisso orizzontale, longitudinale, baricentrico;
- le oscillazioni di disturbo di sussulto e di beccheggio sono trascurabili;
- l'ampiezza delle oscillazioni di rollio è sufficientemente piccola in modo che sia applicabile il metodo metacentrico ($\alpha < 10^\circ$).

Per il principio di D'Alembert l'equazione del moto della nave che rolla, che esprime l'equilibrio dinamico della stessa, è:

$$M_i + M_e = 0$$

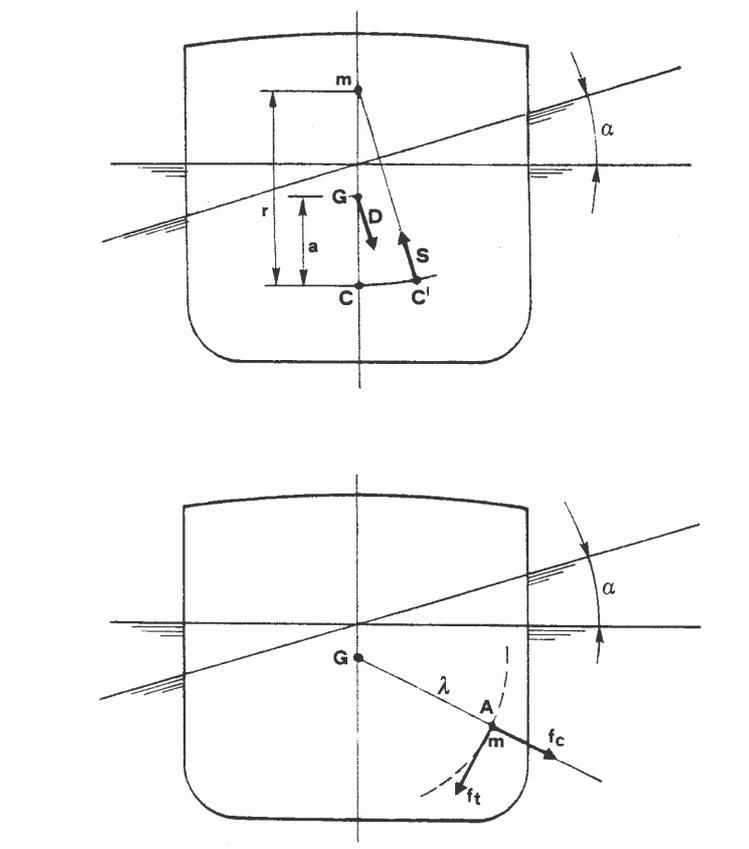
dove:

M_i = momento delle forze d'inerzia;

M_e = momento delle forze esterne applicate.

Per le ipotesi fatte, la nave è sollecitata solo dal suo peso e dalla sua spinta, cioè è sottoposta al solo momento di stabilità (vedi la figura seguente):

$$M_e = D (r - a) \sin\alpha$$



Determiniamo adesso il momento delle forze d'inerzia M_i :

Durante il rollio ogni punto materiale (ad es. A) di massa m della nave, disposto alla distanza λ dall'asse di oscillazione, è soggetto ad una forza d'inerzia centrifuga f_c e ad una forza d'inerzia tangenziale f_t .

Il momento della f_c rispetto all'asse di oscillazione è nullo e quindi, per determinare l'espressione dei momenti delle forze elementari d'inerzia della nave, basta considerare le sole f_t .

Durante il moto oscillatorio tutti i punti della nave hanno la stessa velocità angolare

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt}$$

e quindi l'accelerazione tangenziale:

$$a_t = \lambda \frac{d^2\alpha}{dt^2}$$

La forza d'inerzia tangenziale del punto è:

$$f_t = m a_t = m \lambda \frac{d^2\alpha}{dt^2}$$

ed il relativo momento rispetto all'asse di oscillazione:

$$\mu = f_t \lambda = m \lambda^2 \frac{d^2\alpha}{dt^2}$$

Il momento risultante di tutte le forze d'inerzia dei punti di massa m della nave, rispetto all'asse di oscillazione, è:

$$M = \Sigma\mu = \Sigma m \lambda^2 \frac{d^2\alpha}{dt^2}$$

Ma $\Sigma m \lambda^2$ è il *momento d'inerzia di massa della nave* rispetto all'asse di oscillazione, cioè rispetto all'asse longitudinale baricentrico, comunemente indicato con I_g .

Per cui il momento d'inerzia di tutte le forze della nave vale:

$$M_i = I_g \frac{d^2\alpha}{dt^2}$$

L'equazione:

$$M_i + M_e = 0$$

diventa in definitiva:

$$D (r - a) \sin\alpha + I_g \frac{d^2\alpha}{dt^2} = 0$$

o anche, ricordando che stiamo considerando piccole oscillazioni per cui è $\sin\alpha \approx \alpha$:

$$D(r - a) \alpha + I_g \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = 0$$

Si tratta ora di studiare l'equazione differenziale:

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} = - \frac{D(r - a)}{I_g} \alpha$$

Per ogni nave in determinate condizioni di carico, il rapporto $\frac{D(r - a)}{I_g}$ è costante e, indicandolo per semplicità di trascrizione con K^2 , essendo K la cosiddetta *costante di rollio*, l'equazione differenziale precedente si può scrivere:

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} = K^2 \alpha$$

la cui soluzione è:

$$\alpha = A \operatorname{sen} Kt + B \operatorname{cos} Kt$$

dove A e B sono costanti dipendenti dalle condizioni ai limiti per le quali, con opportune considerazioni, se ne possono ricavare i valori:

$$B = 0$$

$$A = \alpha_{\max}$$

Quindi, indicando con n un numero intero della serie naturale, l'equazione del momento di rollio diventa:

$$\alpha = \alpha_{\max} \operatorname{sen} Kt = \alpha_{\max} \operatorname{sen}(Kt + n 2\pi) = \alpha_{\max} \operatorname{sen} K\left(t + n \frac{2\pi}{K}\right)$$

dalla quale si deduce che l'angolo α assume lo stesso valore ad intervalli di tempo uguali a $\frac{2\pi}{K}$:

cioè questo tempo è proprio il periodo di oscillazione T .

Ricordando il valore di K^2 cioè:

$$K^2 = \frac{D(r - a)}{I_g}$$

e quindi la *costante di rollio*

$$K = \sqrt{\frac{D(r - a)}{I_g}}$$

si ottiene il periodo di oscillazione

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{D(r-a)}{I_g}}$$

Nell'espressione del periodo non compare l'angolo α ; pertanto qualunque sia il valore di detto angolo, il periodo non varia e quindi le oscillazioni di rollio di una nave in mezzo calmo non resistente sono *isocrone*.

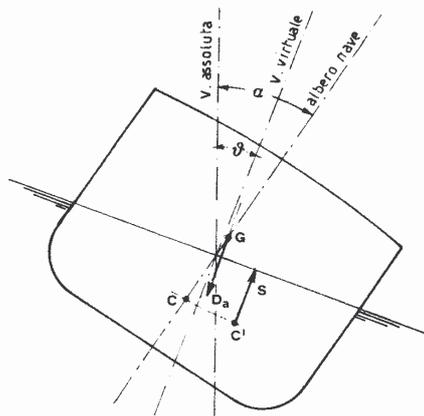
Possiamo quindi fare le seguenti considerazioni conclusive:

- 1) - Il moto oscillatorio avviene con *legge sinusoidale* e le oscillazioni si susseguono conservando costante l'ampiezza massima dei successivi sbandamenti.
- 2) - Le oscillazioni successive si possono considerare isocrone.
- 3) - Gli elementi che influiscono sul periodo di oscillazione sono il dislocamento, il momento d'inerzia di massa della nave rispetto all'asse di oscillazione e l'altezza metacentrica.

14.1.2. - Rollio della nave in mezzo ondoso

Supponiamo, per semplicità, che le dimensioni trasversali della nave siano molto piccole rispetto alla lunghezza d'onda, in modo da poter considerare rettilineo il profilo superficiale dell'onda che interseca la carena; supponiamo inoltre che la spinta sia di valore costante e normale a detto profilo.

Se allora in un certo istante la nave si trova, per esempio, nella posizione indicata nella figura seguente, essa, al cessare della causa inclinante, tenderà a disporsi, per effetto della coppia raddrizzante, col piano di simmetria normale alla superficie piana, ma inclinata, del mare, cioè con i punti normali alla sua verticale virtuale, allo stesso modo che in acqua calma tenderebbe a raggiungere la posizione diritta, cioè con i ponti normali alla verticale assoluta (vedi la figura seguente).



Ma la superficie dell'onda cambia da istante a istante e di conseguenza cambiano le posizioni della verticale virtuale che la nave cerca di raggiungere nel loro rapido succedersi, mentre, per inerzia, le oltrepassa.

Dunque, per la nave, la legge del movimento in moto ondoso scaturisce dalla composizione del moto oscillatorio suo proprio (quello che avrebbe in acqua calma), dovuto alla coppia di stabilità

che le fa "inseguire" la verticale virtuale, e di quello della verticale virtuale stessa, che invece dipende dal movimento dell'onda.

Vediamo di affrontare analiticamente il problema, almeno in via approssimativa.

- 1) L'altezza della carena sia piccola rispetto a quella dell'onda, così che la spinta subita dalla nave sia parallela alla verticale virtuale.
- 2) La larghezza della nave è piccola rispetto alla lunghezza dell'onda tanto da poter sostituire all'effettiva superficie dell'onda un piano e quindi considerare le spinte, dovute alle particelle liquide delle quali la nave ha preso il posto, uguali e parallele.

Ciò equivale a supporre che la spinta risultante della nave passi per il centro C' della carena relativa e sia normale al piano.

Si può quindi affermare che la nave, rollando in mezzo ondoso, con onda al traverso, è sollecitata a tornare nella direzione della verticale virtuale dalla coppia di momento:

$$M = D (r - a) \text{sen}(\alpha - \theta)$$

dove α e θ sono gli angoli di inclinazione della nave e del pendio dell'onda.

La nave si trova cioè sull'onda nelle stesse condizioni in cui si troverebbe in acqua calma, qualora fosse inclinata rispetto alla verticale assoluta dell'angolo $(\alpha - \theta)$.

L'equazione differenziale del rollio in mezzo ondoso è quindi la stessa già determinata in mezzo calmo, con la sola sostituzione di $(\alpha - \theta)$ ad α .

Avremo pertanto, per piccoli valori di $(\alpha - \theta)$, cioè nell'ambito di validità del metodo metacentrico:

$$I_g \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + D (r - a) \text{sen}(\alpha - \theta) = 0$$

dividendo primo e secondo membro per I_g e ricordando che:

$$\frac{D(r - a)}{I_g} = K^2$$

$$\theta = \theta_{\max} \text{sen} \omega t$$

si ottiene la seguente equazione differenziale del 2° ordine:

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + K^2 \alpha - K^2 \theta_{\max} \text{sen} \omega t = 0$$

L'integrale generale di questa equazione è il seguente:

$$\alpha = \alpha_0 \cos Kt + \frac{\omega_0}{K} \text{sen} Kt + \frac{K^2 \theta_{\max}}{K^2 - \omega^2} (\text{sen} \omega t - \frac{\omega}{K} \text{sen} Kt)$$

in cui le costanti α_0 e ω_0 assumono il significato:

α_0 = inclinazione della nave rispetto alla verticale assoluta al tempo $t=0$;

ω_0 = velocità angolare della nave al tempo $t=0$;

mentre:

ω = velocità angolare della nave al tempo t .

Detto integrale è l'equazione in termini finiti del rollio della nave in mezzo ondoso non resistente.

Avendo considerato:

$$\theta = \theta_{\max} \sin \omega t$$

è evidente che per $t=0$ è $\theta=0$, cioè che la nave nell'istante iniziale si trova nel cavo o sulla cresta dell'onda.

Se supponiamo che nello stesso istante la nave sia ferma e dritta, cioè che per $t=0$ sia $\omega_0=0$ e $\alpha_0=0$, allora l'equazione precedente si riduce a:

$$\alpha = \theta_{\max} \frac{K^2}{K^2 - \omega^2} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{K} \sin Kt \right)$$

Da questa equazione il Bertin ha ricavato una formula che permette di determinare la massima inclinazione rispetto alla verticale assoluta che una nave, con periodo di oscillazione T , assume rollando in mezzo ondoso non resistente, con onda al traverso di periodo τ e massima pendenza θ_{\max} .

Basta infatti cercare per quale valore del tempo t si annulla la derivata prima dell'equazione stessa, cioè:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \theta_{\max} \frac{K^2}{K^2 - \omega^2} (\omega \cos \omega t - \omega \cos Kt) = 0$$

Questa espressione, ammesso che sia $\neq 0$, si verifica soltanto se è nullo il termine entro parentesi, cioè se è:

$$\cos \omega t = \cos Kt$$

ossia per:

$$\omega t = 2\pi n \pm Kt$$

dove n è un numero intero qualsiasi.

Ma allora si può anche scrivere:

$$\sin \omega t = \sin(2\pi n \pm Kt) = \sin(\pm Kt)$$

ossia

$$\sin \omega t = \pm \sin Kt$$

Da quest'ultima relazione, valida quando α è massimo, e dall'equazione del rollio della nave si può pertanto ricavare l'espressione del valore massimo dell'inclinazione

$$\alpha_{\max} = \theta_{\max} \frac{K^2}{K^2 - \omega^2} \sin \omega t \left(1 \pm \frac{\omega}{K} \right)$$

In effetti questo potrebbe essere o un valore massimo o un valore minimo, in dipendenza del segno della derivata seconda della funzione α .

Riprendiamo l'espressione precedente nella forma:

$$(\alpha_{\max})_{\max} = \theta_{\max} \frac{K^2}{K^2 - \omega^2} \sin \omega t \left(1 \pm \frac{\omega}{K}\right)$$

E' evidente che il massimo valore di α_{\max} si ha quando tutti i membri del prodotto sono massimi, in particolare quando lo è $\sin \omega t$, cioè per:

$$\sin \omega t = 1.$$

E' quindi:

$$(\alpha_{\max})_{\max} = \theta_{\max} \frac{K^2}{K^2 - \omega^2} \left(1 \pm \frac{\omega}{K}\right)$$

dopo opportuni passaggi si trova che il valore massimo effettivo sarà:

$$\alpha_{\max} = \frac{K}{K - \omega} \theta_{\max} = \frac{1}{1 - \frac{\omega}{K}} \theta_{\max}$$

Ricordando però l'espressione del periodo di oscillazione della nave:

$$T = \frac{2\pi}{K}$$

e il periodo dell'onda

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega}$$

scrivendo il rapporto

$$\frac{T}{\tau} = \frac{\frac{2\pi}{K}}{\frac{2\pi}{\omega}} = \frac{\omega}{K}$$

si ottiene infine la formula di Bertin

$$\alpha_{\max} = \frac{1}{1 - \frac{T}{\tau}} \theta_{\max}$$

che esprime appunto il *massimo valore dell'angolo di inclinazione* che la nave può assumere, rollando passivamente in mezzo ondoso non resistente con onda al traverso.

Abbiamo quindi messo in evidenza che il valore massimo dell'ampiezza di oscillazione di una nave è funzione del massimo periodo d'onda θ_{\max} e del rapporto $\frac{T}{\tau}$ tra il periodo d'oscillazione della nave e il periodo d'onda.

Esaminiamo ora la situazione in funzione di alcuni valori particolari del rapporto $\frac{T}{\tau}$.

Se la nave ha un periodo di oscillazione $T = 2\pi \sqrt{\frac{D(r-a)}{I_g}}$ molto piccolo, cioè se ha una *stabilità iniziale o di piattaforma* molto grande si dice che è *dura in acqua calma*, in quanto, anche per piccoli angoli di sbandamento, tende a contrastare con maggiori momenti le coppie sbandanti esterne.

In questo caso, per una determinata onda, il rapporto $\frac{T}{\tau}$ risulterà molto piccolo e l'inclinazione della nave si avvicinerà al massimo pendio dell'onda, inseguendo la verticale apparente, cioè tendendo a mantenersi con i ponti paralleli alla superficie dell'onda, con maggiore rapidità. La nave sarà quindi *agitata in mare mosso*.

Invece per una nave con piccola stabilità iniziale, o meglio con un periodo di oscillazione T molto grande, cioè per una nave *cedevole in acqua calma*, il rapporto $\frac{T}{\tau}$ avrà un valore molto elevato e quindi α_{\max} avrà un valore molto piccolo.

In queste condizioni la nave è portata a mantenersi con i ponti orizzontali e sarà quindi *tranquilla in mare mosso*.

Ciò è anche intuitivo in quanto una nave cedevole, contrastando con piccoli movimenti le coppie sbandanti esterne, insegue più lentamente la verticale apparente; ma questa varia in direzione continuamente e quindi la nave tende a restare ferma.

Sembrerebbe quindi opportuno fare tutte le navi cedevoli, ma ciò comporterebbe una minore stabilità iniziale che è, ovviamente, un attributo molto importante.

Un caso particolare è quello del *sincronismo* tra la nave e l'onda, ossia quando il periodo della nave è uguale a quello dell'onda ($T = \tau$).

Dalla formula di Bertin si può vedere che in questo caso l'angolo di sbandamento tende a diventare infinitamente grande e quindi la nave, se si trovasse in mezzo non resistente, sarebbe destinata a capovolgersi dopo un certo numero di oscillazioni.

In definitiva dall'analisi della formula del Bertin, che ripetiamo

$$\alpha_{\max} = \frac{1}{1 - \frac{T}{\tau}} \theta_{\max}$$

possiamo concludere che:

- 1) Se $T \ll \tau$, l'inclinazione della nave si avvicina a quella dell'onda e la nave, essendo dura in acqua calma, è agitata in mare mosso;
- 2) Se $T \gg \tau$, l'inclinazione della nave tende ad annullarsi e la nave, essendo cedevole in acqua calma, è tranquilla in mare ondosso;
- 3) Se $T = \tau$, cioè nel caso del sincronismo, l'inclinazione della nave si autoesalta fino al capovolgimento.

Per quanto riguarda il *periodo effettivo di oscillazione* della nave esso è:

- uguale o comunque tendente al periodo dell'onda τ per navi di periodo molto breve sopra onde lunghe (caso n°1);
- uguale al periodo T della nave per navi con forte stabilità di piattaforma sopra onde corte (caso n°2);
- uguale a T e a τ nel caso del sincronismo (caso n°3).

Quindi, nel rollio in mare ondoso, il periodo effettivo di oscillazione di una nave non ha un valore definito, ma varia col rapporto $\frac{T}{\tau}$.

14.2 - Lo studio analitico del rollio stabilizzato

Lo studio generale è stato affrontato dal Vossler, il quale è partito dall'ipotesi che, nello studio generale del moto della nave intesa come corpo rigido, nei suoi sei gradi di libertà, fosse lecito il principio di sovrapposizione degli effetti.

Applicando il principio di D'Alembert alla nave stabilizzata che rolla in mare ondoso resistente, Vossler ha determinato un'equazione del tipo:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + N \frac{d\alpha}{dt} + B \alpha = M$$

che in genere per semplicità si scrive con la notazione:

$$J \ddot{\alpha} + N \dot{\alpha} + B \alpha = M$$

Tale equazione esprime l'equilibrio dei momenti applicati alla nave rispetto all'asse di rollio: un momento di natura inerziale proporzionale all'accelerazione angolare, un momento resistente proporzionale alla velocità angolare, un momento raddrizzante proporzionale all'angolo di rollio ed il momento risultante delle sollecitazioni esterne (che comprende anche il momento stabilizzante dovuto alle pinne).

Prima ancora di analizzare i vari termini, diciamo subito che il moto di rollio (come gli altri movimenti della nave) non è lineare e che quindi i coefficienti J , N e B non sono in realtà costanti, ma risultano funzione di diverse variabili.

Con opportune ipotesi ammetteremo però di poter considerare lineare il movimento della nave e quindi di poterlo studiare avvalendoci dell'equazione differenziale del secondo ordine sopra scritta, a coefficienti costanti.

14.2.1.- Significato dei termini che compaiono nell'equazione del Vossler

Analizziamo adesso i vari termini dell'equazione:

- 1) Il termine di secondo grado esprime la *coppia inerziale* e quindi il relativo coefficiente coincide con il momento d'inerzia di massa, attorno all'asse di rollio, della nave e dell'acqua

trascinata, cioè dell'acqua che partecipa, in maniera più o meno fedele, al moto di rollio della nave stessa.

Valutazioni teoriche e sperimentali hanno dimostrato che questo momento d'inerzia aggiuntivo dell'acqua trascinata, per il movimento di rollio, assume generalmente un valore compreso tra il 10 ed il 30% del momento di inerzia della nave.

Esso varia in funzione della frequenza di oscillazione di entità sensibili, ma non notevoli, con leggi di variazione che dipendono dalle caratteristiche proprie della nave.

Considerando però che questa variazione interessa un'aliquota relativamente modesta del momento d'inerzia complessivo, risulta lecito approssimare il coefficiente del termine di secondo grado al valore del momento di inerzia della nave opportunamente incrementato dal valore mediamente assunto, alle varie frequenze di oscillazione, dal momento d'inerzia additivo.

Trascurando anche la variabilità del momento d'inerzia additivo in funzione della velocità della nave, pure poco sensibile, si può quindi considerare $J = \text{costante}$

2) Il termine di primo grado corrisponde alla *coppia resistente*, proporzionale alla velocità di rollio.

Secondo la teoria del Vossler questa coppia resistente è dovuta al fatto che la nave, oscillando in rollio, genera delle onde e quindi dissipa energia come emettitore d'onde.

Pertanto il coefficiente di proporzionalità tra velocità di rollio e coppia resistente è funzione della frequenza delle oscillazioni, e tale variabilità in funzione della frequenza è anche molto forte, almeno per certi tipi di nave.

Considerare questo coefficiente costante costituisce l'approssimazione maggiore, giustificata soltanto dal fatto che il rollio residuo, in presenza di stabilizzazione, ha modesti valori di ampiezza, e che comunque il rollio viene analizzato soprattutto intorno ad una frequenza specifica, quella naturale di oscillazione della nave.

Secondo altri studiosi la coppia di smorzamento sarebbe dovuta a resistenza di attrito e di forma (onde e vortici).

Ma anche seguendo queste ipotesi, si finisce in genere col considerare il momento resistente proporzionale alla velocità del moto cioè col considerare l'espressione precedente uguale a $N\dot{\alpha}$ con $N = \text{costante}$, ottimizzando il coefficiente N in modo da rendere minimo l'errore, almeno nel campo delle velocità di rollio più comuni (del resto la stabilizzazione rende piccolo il moto residuo di rollio, che quindi ha una modesta velocità).

Chadwick invece considera il termine di primo grado dell'equazione del rollio dovuto ad una vera e propria resistenza di natura viscosa tra fluido e nave.

La coppia resistente dovuta a questo fenomeno viene quindi ad essere proporzionale non alla velocità assoluta di rollio della nave ma, alla velocità del moto tra nave e fluido.

Ammettendo che il fluido si muova in concomitanza col pendio d'onda effettivo θ la coppia resistente risulta proporzionale alla velocità dell'angolo $(\alpha - \theta)$ anziché dell'angolo α .

L'equazione del moto di rollio vista all'inizio del paragrafo diventa allora:

$$J\ddot{\alpha} + N(\dot{\alpha} - \dot{\theta}) + B\alpha = M$$

Anche con questa ipotesi però, lo studio del moto di rollio può essere svolto utilizzando l'equazione omogenea originale, considerando il termine $N\theta$ come una sollecitazione esterna, aggiuntiva rispetto ad M .

La determinazione del coefficiente del termine del primo ordine e' generalmente affidata a metodi sperimentali, con prove su modelli o su navi similari, o sulla stessa nave una volta costruita, mediante le prove di oscillazione.

3) Il termine di grado zero e' quello relativo alla coppia raddrizzante o di stabilita' studiata in Architettura Navale.

Ricordiamo che il momento di stabilita' di una nave nel campo di validità del cosiddetto metodo metacentrico (cioè fino ad inclinazioni di circa 10°) vale:

$$M_s = D(r - a) \sin\alpha$$

In considerazione del fatto che le oscillazioni della nave stabilizzata rientrano in tale campo, e che, per piccoli angoli, si può ammettere che valga l'eguaglianza $\sin\alpha \approx \alpha$, il coefficiente del termine di grado zero risulta:

$$B = D(r - a) = \text{costante}$$

4) Il momento risultante delle oscillazioni esterne M , può essere considerato come la somma di tre aliquote:

- il momento di rollio M_O dovuto al moto ondoso del mare;
- il momento di disturbo M_D dovuto agli altri moti della nave che influenzano il rollio;
- il momento raddrizzante delle pinne M_P dovuto appunto all'azione delle pinne stabilizzatrici;

Abbiamo quindi:

$$M = M_O + M_D + M_P$$

Tenendo presente quanto già visto nell'impostazione dello studio effettuato nel paragrafo precedente, si può dire che il momento di rollio vale:

$$M_O = D(r - a) \sin(\alpha - \theta)$$

Per quanto riguarda il momento di disturbo dovuto agli altri moti della nave, si può osservare innanzitutto che i moti che si svolgono sul piano longitudinale della nave (avanzamento, sussulto e beccheggio) non hanno pratica influenza sul rollio, così come il moto di accostata.

Invece sensibili conseguenze le introduce il moto di deriva; in tal caso infatti il vettore che rappresenta la velocità orizzontale della nave V non è più contenuto nel piano longitudinale di simmetria, ma è orientato rispetto ad esso di un certo angolo di attacco β (vedi la figura seguente).

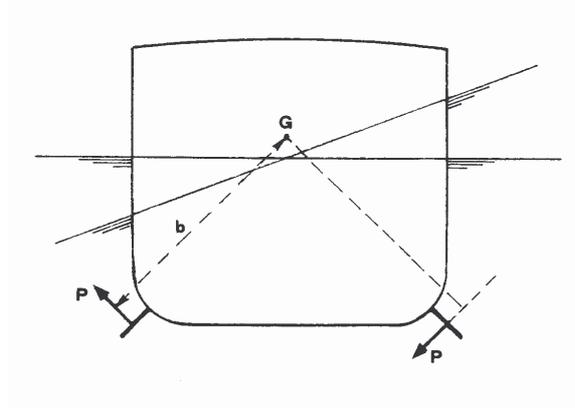


La componente trasversale della forza idrodinamica agente sulla nave, che deriva dalla presenza di questo angolo di attacco, essendo essa applicata al di sotto del baricentro, ed esattamente nel centro di deriva, baricentro della sezione longitudinale immersa, determina una coppia di sollecitazione in rollio.

Secondo Chadwick il momento di disturbo può essere assunto pari a:

$$M_D = K_b U^2 \beta$$

Il momento raddrizzante di ogni pinna e' dato (vedi la figura seguente) dal prodotto della portanza per il braccio b della pinna stessa e quindi il momento di n coppie di pinne vale:



$$M_p = 2nPb$$

Per annullare le oscillazioni di rollio della nave sarebbe sufficiente applicare sulla stessa nave, in ogni istante, un momento uguale e contrario a quello esterno M , cioè fare in modo che le pinne fornissero un momento M_p tale che, sommato a M_O ed M_d , desse il momento totale M voluto.

In pratica, poichè la coppia sbandante esterna, dovuta al pendio d'onda effettivo ed ai disturbi sul rollio degli altri moti della nave, e' di difficile determinazione, si valuta e si contrasta tale coppia attraverso i suoi effetti, cioè attraverso l'angolo, la velocità e l'accelerazione di rollio, inviando alle pinne l'ordine per renderli minimi.

A comandare i servomotori delle pinne e' in definitiva una funzione somma dei tre parametri α , $\dot{\alpha}$ ed $\ddot{\alpha}$.

14.2.2. - Effetti dei parametri $\ddot{\alpha}$, $\dot{\alpha}$ ed α sulla stabilizzazione

Esaminiamo brevemente gli effetti dei tre parametri citati sulla stabilizzazione.

E' intuitivo che se si contraponesse all'accelerazione di rollio una accelerazione uguale e contraria, conseguente alla portanza delle pinne, il rollio sarebbe completamente eliminato.

Ma questo non e' possibile per i ritardi insiti nei sistemi di controllo e di comando delle pinne ed anche perché non sempre la potenza delle pinne e' in grado di annullare eventuali momenti esterni sbandanti che insorgono in tempi molto brevi.

Pertanto si adotta un segnale stabilizzante pari alla somma dei tre parametri appresso specificati.

1) Angolo di rollio

Questa funzione assiste la naturale tendenza della nave a raddrizzarsi, riportandola sulla sua verticale.

L'azione stabilizzante dovuta alla misura di questo parametro si fa cioè sentire in concomitanza con la coppia di stabilità.

Essa e' particolarmente utile quando la nave ha il mare in poppa e quindi può trovarsi per un tempo abbastanza lungo sul fianco di un'onda che si muove lentamente rispetto alla nave.

Per effetto dell'azione stabilizzante dovuta alla misura del solo angolo di rollio il periodo di oscillazione si riduce, mentre, a causa dell'inerzia della nave e dell'energia cinetica accumulata, l'ampiezza del rollio resta praticamente costante.

2) *Velocità di rollio*

Essa costituisce la funzione di controllo principale e più efficace della stabilizzazione in quanto smorza il rollio, annullandone l'energia cinetica.

Da sola non è sufficiente a stabilizzare la nave perché questa non rolla sempre armonicamente e, specialmente con mare confuso, si possano avere forze improvvise ed irregolari.

3) *Accelerazione di rollio*

L'azione stabilizzante dovuta a questa funzione si oppone all'inizio di qualsiasi azione rollante.

Essa è quindi particolarmente efficace con mare confuso, in presenza di spinte irregolari dovute a grandi ondate.

Qualora, nella generazione del segnale stabilizzante, manchi una di queste funzioni, l'impianto funziona ugualmente, anche se con efficacia ridotta.

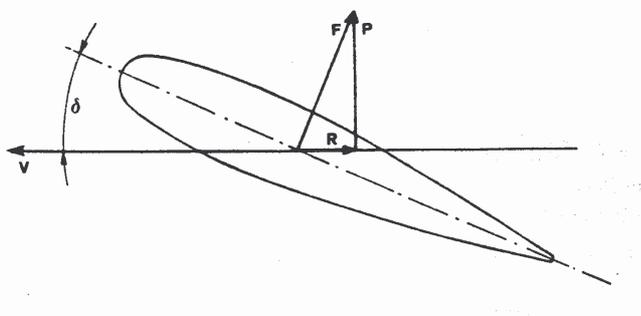
Per questo motivo negli impianti più moderni i segnali relativi alle tre funzioni vengono rilevati ed amplificati separatamente, in modo che eventuali avarie locali permettono comunque una certa stabilizzazione.

Diciamo, per concludere, che se la nave si ingavona, gli stabilizzatori tendono a raddrizzarla; se una accelerazione trasversale agisce comunque sulla nave gli stabilizzatori le si oppongono, se si manifesta comunque una velocità di rollio gli stabilizzatori la smorzano.

Lo scopo del sistema di controllo della stabilizzazione non è quindi soltanto quello di ridurre il rollio della nave ma, entro i limiti di potenza disponibili, di mantenerla sulla sua verticale (reale od apparente che sia).

14.2.3 – *Momento raddrizzante delle pinne - Falsi angoli di attacco*

Si consideri una pinna sommersa dotata di velocità V ed inclinata dell'angolo δ rispetto alla direzione di V (vedi la figura seguente relativa ad una sezione trasversale della pinna).



La superficie della pinna risulta soggetta ad una forza di natura idrodinamica che ammette componenti:

- secondo la direzione di V :

$$R = C_r \frac{\rho}{2} S V^2 \approx c_r \frac{\rho}{2} S V^2 \delta \quad (\text{resistenza})$$

- normalmente alla direzione di V:

$$P = C_p \frac{\rho}{2} S V^2 \approx c_p \frac{\rho}{2} S V^2 \delta \quad (\text{portanza})$$

dove:

S è la superficie della pinna;

ρ è la densità del mezzo;

$C_r = c_r \delta$ coefficiente di resistenza (proporzionale all'angolo δ)

$C_p = c_p \delta$ coefficiente di portanza (proporzionale all'angolo δ)

Poichè generalmente viene impiegata almeno una coppia di pinne a profilo simmetrico, una per lato della nave, ed azionate l'una in senso opposto all'altra, alla nave risulterà applicato un momento raddrizzante:

$$M_p = 2 n P b = 2 n b c_p \frac{\rho}{2} S V^2 \delta$$

dove:

- n è il numero di coppie di pinne

- b è la distanza del centro di spinta della pinna dal piano longitudinale di simmetria della nave.

Il pendio d'onda effettivo che corrisponde a questo momento raddrizzante risulta:

$$\gamma = \frac{M_p}{D(r-a)} = n \frac{bc_p \rho S}{D(r-a)} V^2 \delta = 2 n K_p V^2 \delta = 2 n \gamma_1$$

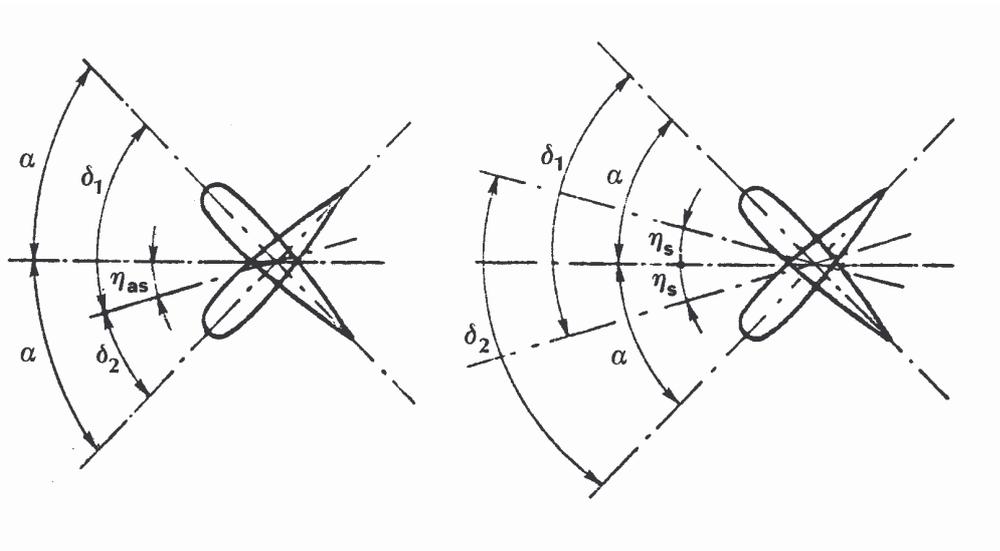
dove:

$$K_p = \frac{bc_p \rho S}{2D(r-a)}$$

$\gamma_1 = K_p V^2 \delta$ momento raddrizzante dovuto ad una sola pinna, espresso in termini di pendio d'onda.

Nella formula testè trovata, l'angolo δ ha significato di angolo di impatto dell'acqua sulla pinna, il quale può differire dalla rotazione alla pinna rispetto alla linea di galleggiamento della nave ("*angolo di attacco*" α).

La differenza fra l'angolo di attacco e l'angolo di impatto, denominato "*falso angolo di attacco*" (η), può essere dovuta sia al moto dell'acqua in prossimità della pinna, sia al moto stesso della nave (vedi la figura seguente).



Difatti, ad esempio:

- l'angolo di beccheggio sposta il piano di riferimento per l'angolo di attacco della stessa quantità per le due pinne della stessa coppia.

Gli "angoli di impatto" valgono quindi, rispettivamente:

$$\delta_1 = \alpha + \eta_{as} \quad \delta_2 = \alpha - \eta_{as}$$

ed in tal caso il falso angolo di attacco assume la denominazione di "antisimmetrico" (η_{as}).

- La velocità del moto di sussulto fa sì che la velocità di avanzamento della pinna V risulti dalla somma vettoriale della velocità orizzontale di avanzamento della nave x_0 e della velocità verticale z_0 .

Ne deriva un falso angolo di attacco:

$$\eta_{as} = \arctg \frac{z_0}{x_0} \quad \text{anch'esso antisimmetrico.}$$

- La velocità del moto di rollio fa sì che la pinna sia dotata di velocità verticale, di segno opposto per le due pinne della stessa coppia.

Ne deriva un falso angolo di attacco di segno opposto per le due pinne, denominato "simmetrico"

η_s ; si ha allora:

$$\delta_1 = \delta_2 = \alpha + \eta_s$$

I due tipi di falso angolo di attacco hanno influenze sensibilmente diverse sulla regolazione.

- i falsi angoli di attacco asimmetrici provocano la diminuzione di portanza di una pinna ed il corrispondente aumento di portanza della pinna opposta. Nei limiti di linearità del sistema, il momento raddrizzante rimane quindi inalterato, e l'effetto risultante del disturbo è nullo. È però da notare che la dissimmetria di portanza sulle pinne può portare ad un aumento eccessivo della sollecitazione sulla pinna più caricata.

- i falsi angoli di attacco simmetrici provocano la stessa variazione di portanza in entrambe le pinne della stessa coppia, e quindi causano una corrispondente variazione del momento raddrizzante.

Pertanto il comportamento del sistema di pinne previsto sulla nave può essere schematizzato dalla relazione:

$$\gamma = 2n\gamma_1 = 2nK_p U^2(\alpha + \eta_s)$$

in cui si è approssimata la velocità della pinna V alla velocità della nave U .

L'angolo η_s , somma di tutti i falsi angoli di attacco simmetrici agenti su una pinna, assume il ruolo di "*ingresso di disturbo*" nell'angolo di attacco, e come tale esso viene compensato dal ciclo chiuso di stabilizzazione in rollio.

Nei casi in cui viene adottato il tipo di controllo a retroazione di portanza, ciascuna pinna è chiamata ad esercitare la portanza assegnata.

Il ciclo chiuso in questo caso provvede a variare l'angolo di attacco in modo da compensare i falsi angoli di attacco, simmetrici ed asimmetrici, evitando sovrasollecitazioni sulle pinne e la introduzione di grandezze di disturbo sul ciclo di regolazione in rollio.

Dall'espressione di γ si vede che il "guadagno" della pinna risulta proporzionale al quadrato della velocità della nave; questa variabilità può non arrecare inconvenienti gravi sulla maggior parte delle navi mercantili, che viaggiano pressochè esclusivamente ad una determinata velocità di crociera costante.

Nelle navi militari, che prevedono variazioni di velocità di navigazione, si può invece rendere necessaria una opportuna compensazione automatica.

Su molte altre navi si adotta invece una compensazione manuale per valori fissi di velocità.

Con il controllo a retroazione di portanza viene compensato automaticamente la variazione del guadagno della pinna con il guadagno della velocità.

Nei casi in cui viene adottato il controllo a retroazione di posizione, sull'angolo di attacco:

- le pinne devono essere dimensionate tenendo conto dell'eventuale presenza di "falsi angoli di attacco";
- il ciclo di regolazione in rollio deve essere in grado di compensare anche le variazioni di falsi angoli di attacco simmetrici, e le variazioni di velocità della nave.

14.2.4 - La limitazione dell'ordine alle pinne

L'ordine alle pinne, risultante dalla somma delle tre aliquote rispettivamente proporzionali al rollio, alla sua velocità ed alla sua accelerazione, assume il significato di angolo di attacco ordinato o di portanza ordinata a seconda che i dispositivi attuatori siano dotati di retroazione di angolo di attacco o di portanza della pinna.

In entrambi i casi risulta opportuno limitare l'ordine stesso, per ottenere i seguenti scopi:

- a) evitare di comandare le pinne oltre i limiti angolari assunti come massimi onde evitare sollecitazioni inutili ai dispositivi di fine corsa.
- b) evitare di comandare le pinne a valori superiori a quelli di massima portanza per la velocità assunta dalla nave; difatti, per ciascun valore della velocità della nave, esiste un valore di angolo al quale corrisponde un massimo di portanza: aumentando l'angolo, la portanza diminuisce (cavitazione della pinna).
- c) evitare di imporre valori di portanza eccessivi, incompatibili con la resistenza meccanica delle pinne.

Gli scopi sopra indicati debbono essere raggiunti tenendo conto dei falsi angoli di attacco.

Si nota che i vincoli imposti ai punti a) e b) impongono limiti all'angolo della pinna, mentre il vincolo c) costituisce un limite di portanza effettiva.

Nel caso di retroazione angolare, in cui occorre limitare l'angolo della pinna, i vincoli sopra indicati danno luogo a leggi di variazione dell'angolo in funzione della velocità, qualitativamente indicati nella figura seguente con linee punteggiate.

Nella stessa figura è indicata, a tratto, invece la linea che si ottiene tenendo conto, agli effetti della sollecitazione sulla pinna, di eventuali falsi angoli di attacco.

Il problema viene generalmente risolto realizzando una limitazione del tipo indicato nella medesima figura a tratto unito, costante fino ad un certo valore di velocità, indi decrescente linearmente con la velocità.

Nel caso di retroazione di portanza entro il valore di sollecitazione massimo ammesso dalle pinne, per base velocità, il vincolo a) dà luogo ad un limite di portanza crescente in funzione della velocità.

Nella figura seguente la linea punteggiata tiene conto insieme dei vincoli a) e b), esprimendo per ciascun valore di velocità, il massimo valore di portanza presente.

Tale curva può subire traslazioni parallele all'asse delle ordinate di entità corrispondente alla portanza dovuta al falso angolo di attacco; nella medesima figura sono indicate a tratto, qualitativamente, le posizioni estreme di tale vincolo.

Pertanto un circuito limitatore di portanza deve tener conto di:

- velocità della nave, secondo la legge indicata con linea punteggiata;
- portanza corrispondente al falso angolo di attacco.

Tale grandezza viene ricavata come differenza tra il segnale di portanza, proveniente dal trasduttore di portanza, ed il segnale proveniente dal trasduttore di angolo di attacco, opportunamente alimentato a tensione proporzionale al quadrato della velocità (vedi figura).

14.3 - Conclusioni

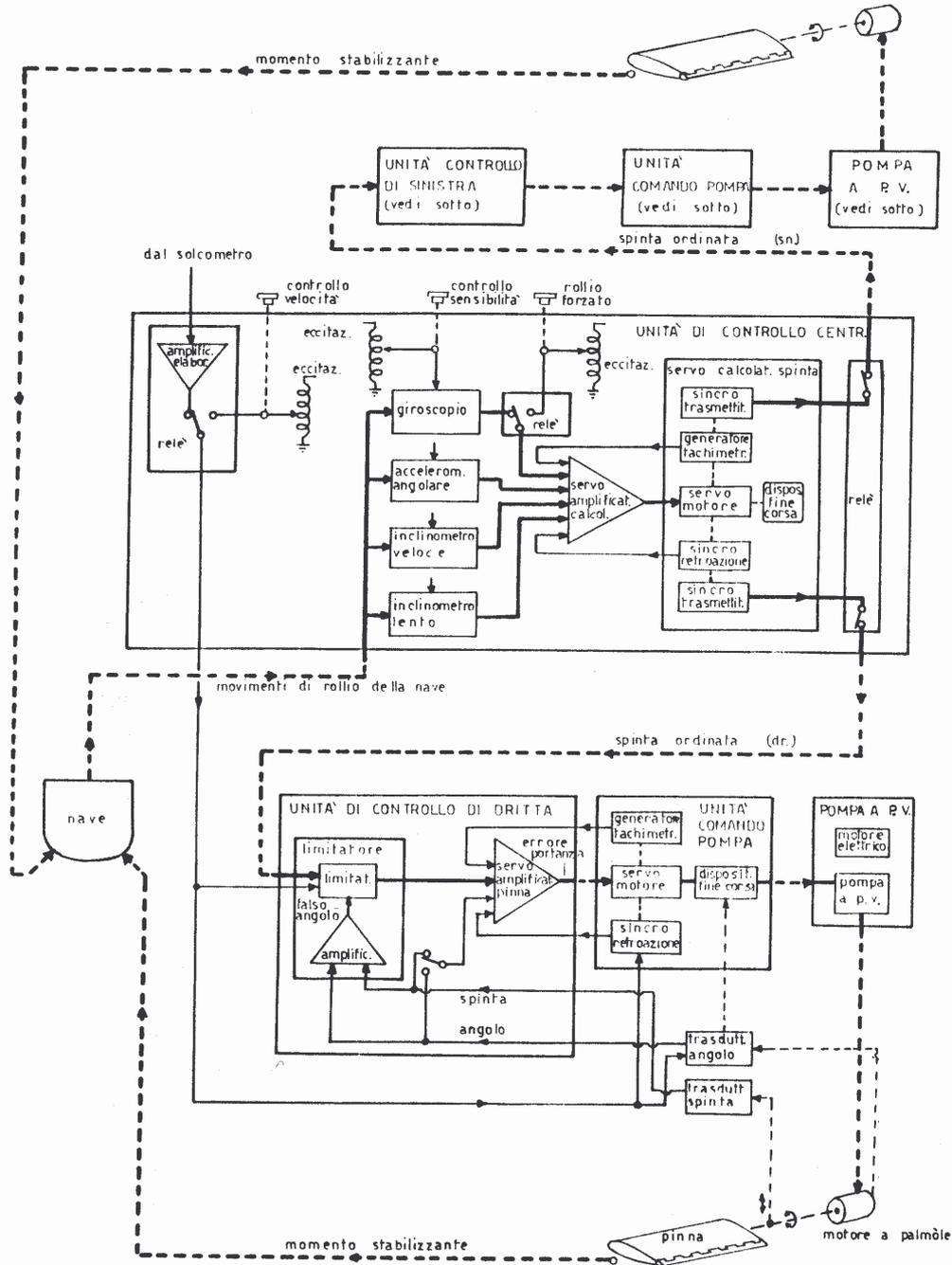
Da quanto sopra esposto, risulta che l'adozione di un sistema di stabilizzazione in rollio mediante pinne attive provoca i seguenti fenomeni:

- riduce notevolmente le oscillazioni in rollio (nel rapporto $\frac{1}{1+H_0}$) alle frequenze inferiori alla frequenza naturale della nave;
- anche nel caso di sollecitazioni alla frequenza naturale della nave, non si verifica un picco di risonanza, bensì una sensibile azione smorzante.
- la frequenza propria di risonanza viene aumentata (come per l'aumento dell'altezza metacentrica), aumentando però notevolmente lo smorzamento.

Pertanto il metodo di stabilizzazione in rollio mediante pinne attive, si rivela uno strumento pienamente efficace per dotare la nave di quello smorzamento di cui è per sua natura priva, senza aumentare apprezzabilmente la resistenza al moto di avanzamento.

14.4 - Impianto di controllo Sperry-Gyrofinn

Esaminiamo adesso un esempio di impianto di controllo ed in particolare l'impianto Gyrofinn della ditta Sperry (vedi la figura seguente) adottato attualmente su un gran numero di Unità della M.M.I. (Alpino, Lupo, Maestrale).



SCHEMA FUNZIONALE IMPIANTO DI CONTROLLO SPERRY-SALMOIRAGHI

Si tratta di un impianto di tipo prevalentemente elettrico a retroazione di portanza con motore idraulico a palmole; come si può vedere dalla figura allegata esso è costituito da vari pannelli.

Il cervello di questo sistema e' l' *Unita' di Controllo Centrale* che contiene gli strumenti che misurano i movimenti di rollio della nave e che forniscono i dati al successivo amplificatore calcolatore.

Tali strumenti sono:

- un *accelerometro angolare* che misura le accelerazioni di rollio;
- un *giroscopio* vincolato accoppiato ad un *syncrotrasmettitore* che rileva la velocita' di rollio;
- un *inclinometro veloce*, cioe' a bassa costante di tempo, che rileva l'angolo di rollio;
- un *inclinometro lento*, cioe' ad alta costante di tempo, che misura l'angolo di sbandamento statico della nave il quale e' montato in modo tale che il suo segnale sia in opposizione di fase con quello proveniente dall'*inclinometro veloce*.

Il giroscopio vincolato ha la tensione di eccitazione regolabile mediante apposito *controllo sensibilita'* in modo da regolarne l'ampiezza del segnale di uscita per ottenere la migliore stabilizzazione in funzione delle condizioni del mare.

Si tratta in definitiva di una regolazione corrispondente al correttore di controreazione dell'impianto Denny Brown - San Giorgio di nave Intrepido.

I quattro segnali provenienti dagli strumenti citati pervengono al *servoamplificatore calcolatore*, che e' costituito da una rete di miscelazione, ove i segnali in arrivo vengono sommati algebricamente, e da un amplificatore a quattro stadi.

Il primo stadio e' un preamplificatore con base a massa che conferisce al sistema notevole stabilita'.

Il secondo stadio e' ad elevato guadagno, regolabile mediante un potenziometro di guadagno.

Il terzo stadio e' lo stadio pilota in push-pull; il push-pull e' un circuito amplificatore di potenza costituito da due transistori che lavorano in controfase; questa soluzione assicura una maggiore potenza ed una minore distorsione.

Lo stadio finale e' anch'esso uno stadio di potenza, realizzato in push-pull.

Il segnale in uscita dal servoamplificatore entra nel *servocalcolatore*; questo e' un componente elettronico formato da un *servomotore* comandato dal campo di controllo del servoamplificatore, da un *generatore tachimetrico* e da tre *syncrotrasmettitori*.

L'uscita del generatore tachimetrico, che e' funzione della velocita' del servomotore, costituisce un segnale di smorzamento che viene inviato al servoamplificatore per stabilizzarlo.

Invece il segnale emesso dal *syncrotrasmettitore di retroazione* costituisce il segnale di inseguimento (o feedback) del servoamplificatore ed e' funzione della rotazione effettuata.

Infine i rimanenti due syncro danno in uscita due tensioni uguali, ma di fase opposta, e proporzionali all'angolo dei rotori; essi costituiscono pertanto i segnali di spinta (portanza) ordinata, rispettivamente alla pinna di dritta ed a quella di sinistra.

Dell'*Unita' di Controllo* fa parte anche un *pannello rele'* che in figura, per semplicita', e' stato suddiviso in due parti, che ha lo scopo di permettere:

- il comando del rollio forzato, commutando l'ingresso del servoamplificatore calcolatore rappresentante la velocita' di rollio, dall'uscita del giroscopio vincolato all'uscita di un'apposito rele';

- l'impostazione della velocità della nave per la limitazione della spinta ordinata sia manualmente, mediante apposito controllo velocità nave, sia automaticamente, prelevando il segnale dal solcometro a mezzo di un *amplificatore-elaboratore* che fornisce un segnale in uscita che, in funzione della velocità impostata in ingresso, ha un andamento tale che, quando il segnale in ingresso è inferiore al valore corrispondente alla velocità di 12 nodi, la tensione di uscita rimane costante, poi essa cresce linearmente fino ad un livello di tensione in ingresso corrispondente a 18 nodi ed infine si mantiene nuovamente costante per velocità superiori;
- la chiusura dei circuiti spinta ordinata, sia di sinistra che di destra;
- il funzionamento di vari allarmi concernenti la sicurezza dell'impianto.

I due segnali di spinta ordinati (dritta e sinistra) provenienti dall'"Unità" di Controllo Centrale, pervengono ognuno ad una Unità di Controllo Locale (rispettivamente di dritta e sinistra).

Tale Unità è quella che controlla direttamente ciascuna pinna; di essa fanno parte un *servoamplificatore di pinna*, che è sostanzialmente identico al servoamplificatore calcolatore, ed è costituito da una rete di miscelazione di segnali in entrata e da quattro stadi di amplificazione.

I segnali in ingresso sono:

- la *portanza ordinata*, già limitata in funzione della velocità;
- la *portanza attuata*, se l'anello di retroazione è chiuso per mezzo del trasduttore di portanza;
- il *segnale del syncro di retroazione*, che costituisce il segnale di inseguimento del servoamplificatore;
- il *segnale del generatore tachimetrico*, per la stabilizzazione dello stesso servoamplificatore.

L'uscita del servoamplificatore costituisce il campo di controllo del servomotore del posizionatore per il comando della pompa.

Fa parte dell'"Unità" di Controllo Locale un *amplificatore limitatore* che ha il compito di limitare il segnale di portanza ordinata proveniente dal servocalcolatore, in funzione della velocità della nave e dei falsi angoli di attacco.

Esso è costituito da un circuito in cui viene calcolato il segnale del falso angolo di attacco, confrontando il segnale proveniente dal trasduttore di portanza con quello proveniente dal trasduttore dell'angolo di inclinazione della pinna.

Questo segnale viene poi amplificato in un amplificatore monostadio in push-pull e viene sommato algebricamente al segnale di portanza ordinata.

Ogni pinna è poi dotata di una Unità di Comando Pompa per il comando della pompa a portata variabile.

Tale Unità è costituita da un servomotore, il cui campo di controllo è quello di uscita del servoamplificatore di pinna; tale servomotore trascina un generatore tachimetrico ed un sincrotrasmettitore di retroazione.

L'uscita del generatore tachimetrico, che è funzione della velocità del servomotore, rappresenta il cosiddetto segnale di smorzamento che conferisce al servoamplificatore una sufficiente stabilità

Il sincrotrasmettitore di retroazione è eccitato con una tensione variabile proveniente dal comando velocità nave ed emette un segnale in uscita proporzionale all'angolo assunto dal rotore, che costituisce il segnale di inseguimento (o feedback) del servoamplificatore.

Il servomotore infine, attraverso un riduttore a più stadi (rapporto di riduzione 750:1) ed un dispositivo di fine corsa meccanico ($\pm 20^\circ$), comanda il cassetto di distribuzione della pompa a portata variabile che invia olio al motore a palmole per l'inclinazione della pinna.

In definitiva con campo di controllo nullo, il servomotore rimane nella posizione di riposo, il cassetto di distribuzione nella posizione centrale ed il sincrotrasmettitore ha uscita nulla.

Quando il campo di controllo è diverso da zero, il servomotore compie una rotazione proporzionale all'intensità del segnale in uscita dal servoamplificatore di pinna e posiziona così il cassetto di distribuzione in modo da far assumere alla pinna l'angolo previsto.

Nel frattempo il sincro di retroazione genera un segnale proporzionale all'angolo del rotore e tale da annullare l'uscita del servoamplificatore (il segnale del sincro di retroazione si sottrae cioè al campo di controllo) e quindi il servoamplificatore non modifica ulteriormente la posizione del cassetto di distribuzione.

Per completare l'esame dello schema a blocchi dell'impianto di stabilizzazione accenniamo ai trasduttori dell'angolo e della portanza delle pinne.

Il *trasduttore dell'angolo di pinna* è costituito da due sincrotrasmettitori accoppiati all'albero della pinna per mezzo di ingranaggi.

Uno dei due sincro è eccitato con la tensione variabile proveniente dal comando velocità nave e la sua uscita, proporzionale all'angolo assunto dal rotore, costituisce il segnale di controreazione quando l'anello di controreazione è chiuso sull'angolo di pinna.

Il secondo sincro è invece un normale sincrotrasmettitore ad eccitazione costante, che comanda i vari sincroricevitori indicanti appunto l'angolo raggiunto dalle pinne.

Il *trasduttore di portanza*, sistemato all'interno dell'albero portapinna, è essenzialmente costituito da due trasformatori differenziali, uno di riserva all'altro, che trasformano il cedimento elastico che subisce la pinna per effetto della portanza, in una variazione del segnale elettrico.

Vengono impiegati due trasduttori, commutabili elettricamente, in quanto, in caso di avaria, la zona è difficilmente accessibile per le riparazioni.

Un'altra versione di tale impianto prevede l'esistenza, nell'Unità di Controllo, di un accelerometro lineare per la misurazione dell'angolo di inclinazione in sostituzione dei due inclinometri, lento e veloce, e la conseguente necessità di impostare manualmente l'angolo di sbandamento statico mediante comando "angolo di sbandamento" con il quale si inclina l'accelerometro lineare onde compensare qualsiasi sbandamento permanente della nave ed evitare la corrispondente azione correttiva delle pinne.

Nel caso di avaria al dispositivo di rilevazione della portanza effettiva della pinna è prevista la possibilità di commutare dal "*comando di portanza*" al "*controllo d'angolo*".

Si noti che anche quando la portanza ordinata è nulla, la pinna può muoversi per compensare gli effetti dei fasi angoli di attacco.

Infatti il servo di posizionamento della pinna risponde allora al segnale di portanza effettiva fornito dal trasduttore e conferisce alla pinna una certa inclinazione onde annullare il carico su di essa.

CAP.15 - CASSE ANTIROLLIO

15.1 - Generalita'

Agli inizi di questo secolo furono fatti i primi studi ed esperimenti tendenti a risolvere il problema della stabilizzazione mediante la generazione di un momento raddrizzante ottenuto con un tempestivo spostamento trasversale del centro di gravita' della nave, realizzabile con lo spostamento di masse liquide.

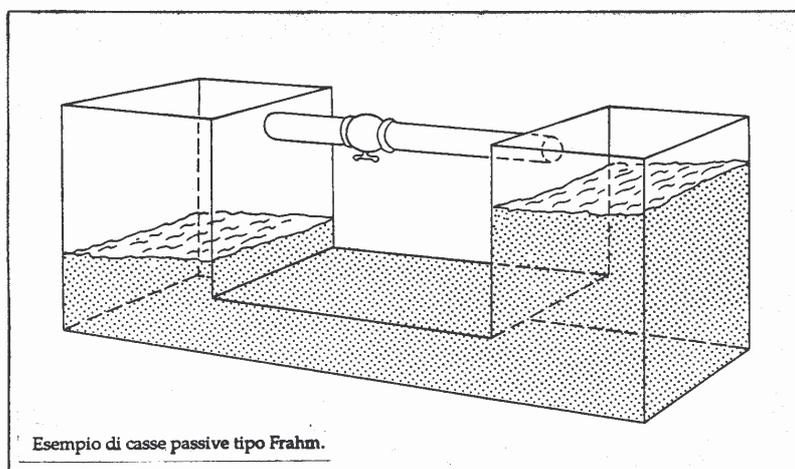
In definitiva la stabilizzazione mediante casse antirollio si basa sullo spostamento periodico, e sfasato rispetto al rollio, di masse liquide da un lato all'altro della nave, in modo da creare una coppia che contrasti il rollio stesso.

Le casse antirollio sono dette *passive* se il movimento del liquido, opportunamente ritardato con strozzamenti, e' ottenuto per la sola azione della gravita'.

Sono invece dette *attive* quando gli spostamenti del liquido sono realizzati con mezzi meccanici (pompe, aria compressa ecc.).

Esaminiamo piu' in dettaglio questo mezzo di riduzione del rollio.

Le casse antirollio che si basano sul sistema FRAHM (U-Tank) (vedi figura seguente) sono casse sistemate lateralmente alla nave, a murata, e sono in comunicazione tra loro in basso mediante un condotto lungo come le casse, ma di altezza limitata, ed in alto con un condotto per il passaggio dell'aria munito di una valvola di intercettazione e strozzamento.



In questo caso l'acqua non puo' muoversi liberamente da una cassa all'altra in quanto la valvola di strozzamento permette di regolare il flusso dell'aria che si trova sopra il livello libero dell'acqua e quindi anche il movimento oscillatorio dell'acqua stessa.

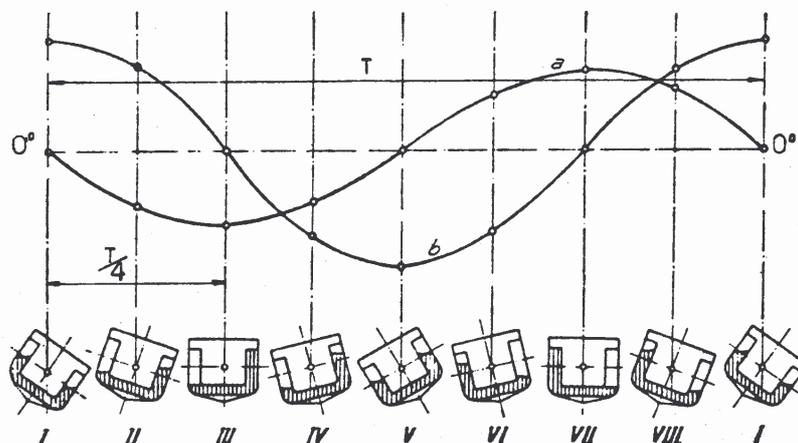
Il migliore effetto di stabilizzazione si ottiene quando il periodo di oscillazione dell'acqua nelle casse e' uguale al periodo di oscillazione naturale della nave, ma c'e' uno sfasamento in ritardo di 1/4 di periodo.

L'uguaglianza tra il periodo di oscillazione dell'acqua e quello della nave lo si realizza progettando opportunamente il profilo interno delle casse e regolando la valvola di strozzamento.

La regolazione di quest'ultima permette anche di ottenere lo sfasamento voluto.

Il periodo di oscillazione dell'acqua nelle casse si puo' variare anche variando il livello della stessa acqua.

La figura seguente mostra la relazione ottimale tra le fasi dei movimenti dell'acqua e quelli della nave.



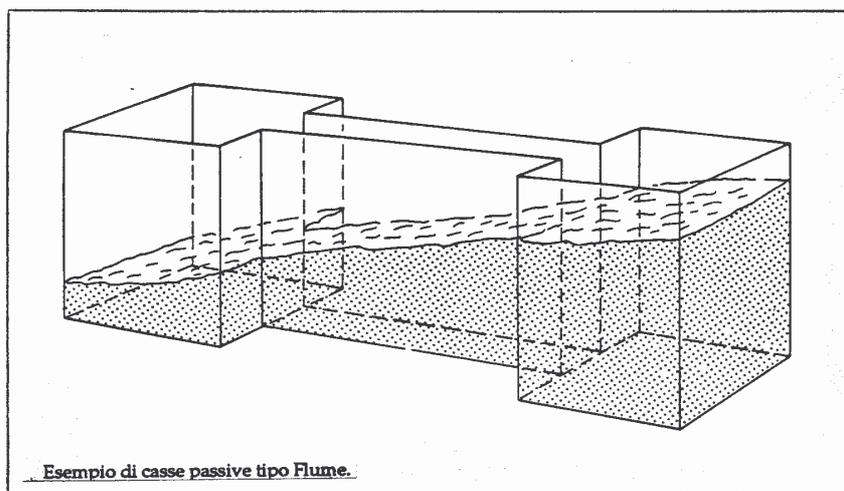
In figura si nota come lo sfasamento sia appunto $T/4$, essendo T il periodo.

L'impianto di stabilizzazione a casse di tipo passivo e' molto efficace in caso di moto ondoso regolare.

Nel caso di moto ondoso irregolare invece l'efficacia peggiora notevolmente, essendo necessario intervenire frequentemente sulla valvola di strozzamento ed eventualmente sul livello nelle casse.

Rispetto agli impianti di stabilizzazione a pinne, le casse antirollio hanno il vantaggio di espletare la loro funzione anche a nave ferma o a bassa velocita', hanno un costo notevolmente inferiore e non assorbono potenza motrice.

Altro esempio di casse passivo sono le casse a superficie libera (Free-Surface Tank) tipo FLUME caratterizzate dall'avere invece il canale per il trasferimento del fluido superiormente aperto (vedi figura seguente).



Esempio di casse passive tipo Flume.

Queste casse hanno il pregio di avere una elevata efficienza ma anche l'inconveniente di ridurre notevolmente, a causa degli ampi specchi liquidi, l'altezza metacentrica iniziale.

Lo strozzamento interno necessario per la regolazione, viene ottenuto mediante l'inserimento di piastre verticali nel canale centrale.

Le U-Tank tipo FRAHM hanno caratteristiche opposte alle prime, cioè minore efficienza, unita però ad una minore riduzione dell'altezza metacentrica.

In queste ultime lo smorzamento (damping) interno può essere ottenuto mediante una strozzatura nel canale di passaggio dell'aria o, direttamente, con una valvola nel canale inferiore che provoca una perdita di carico concentrata.

Per entrambe le soluzioni, già dalle prime applicazioni, apparve chiaro che l'efficienza del sistema era strettamente legata alla sua regolazione e che, in condizioni non ottimali, si poteva addirittura avere un incremento dell'angolo massimo di rollio.

Inoltre, il sistema non può essere utilizzato in navi con piccole altezze metacentriche, a causa dell'inaccettabile riduzione dell'altezza metacentrica che si avrebbe con l'introduzione degli specchi liquidi.

La regolazione del periodo di oscillazione del liquido all'interno della cassa, sia esso realizzato variando lo strozzamento della valvola nel caso delle casse Frahm, sia esso realizzato variando il livello nelle casse come nel caso delle casse tipo Flume, si impone per adeguarlo al periodo, variabile, di oscillazione della nave, che come è noto, vedi para 7.1.1, è dato da:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_g}{D(r-a)}}$$

Tale variazione nel tempo di T è dovuta alla contemporanea variazione di tutti i termini che compaiono nella suddetta espressione:

- I_g , che dipende dall'entità e dalla distribuzione dei pesi a bordo, varia man mano che vengono consumati viveri, combustibile, munizioni, ecc.
- D varia per gli stessi motivi per cui varia I_g ma, rispetto a quest'ultimo, esso dipende solo dall'entità dei pesi consumati;
- $(r-a)$ varia perché si creano specchi liquidi nelle casse del combustibile, dell'acqua di lavanda, per variazioni nella posizione del baricentro G , ecc.

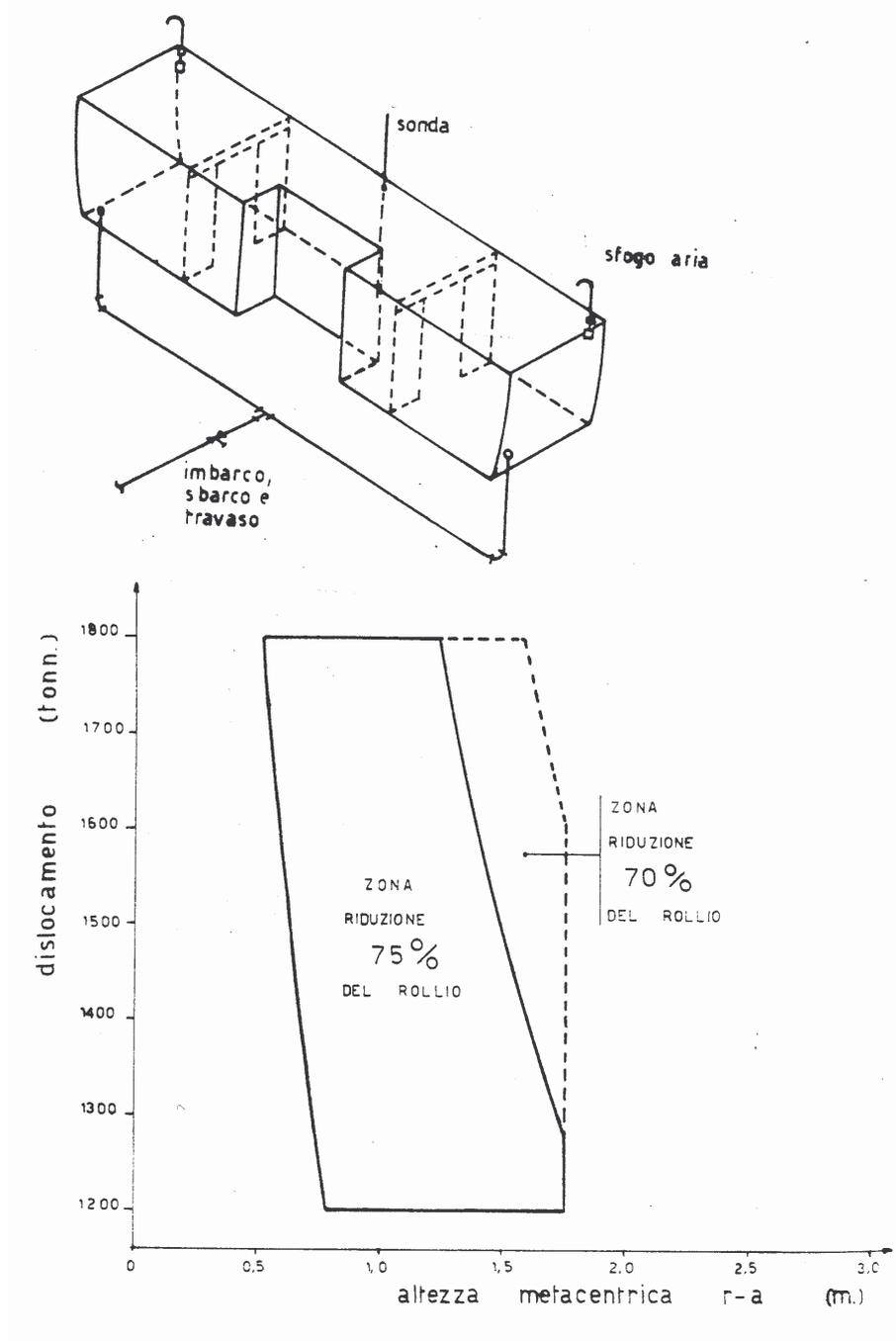
Dovendo dunque i due periodi essere sempre uguali e sfasati di $\pi/2$, dovremo periodicamente controllare l'esistenza di questi requisiti.

Di seguito esamineremo alcuni esempi di impianti realizzati a bordo di unità militari.

15.2 - Impianto per Unità idrografica Magnaghi

Per le sue esigenze operative nel caso di rilievi idrografici ed oceanografici la Nave Idrografica della M.M.I. "AMMIRAGLIO MAGNAGHI" necessita di stabilizzazione anche da ferma pertanto adotta un impianto di stabilizzazione a cassa passiva tipo FLUME.

Si tratta di una sola cassa sistemata grossomodo a centro nave (vedi figura seguente).

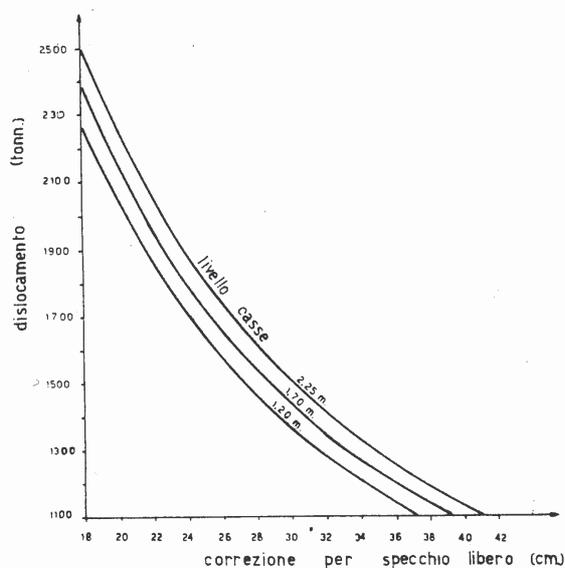
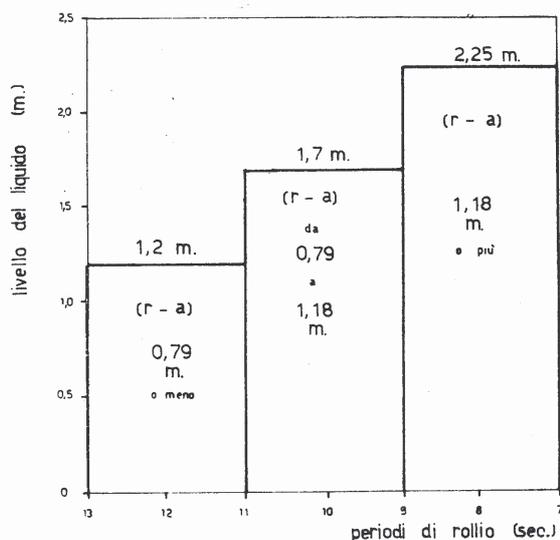


Il fluido operante e' gasolio e la cassa e' in comunicazione con il collettore di travaso di bordo mediante una valvola a flusso rapido.

Il periodo di oscillazione del liquido della cassa, che si ricorda deve essere uguale a quello di oscillazione della nave ma sfasato di 90° in ritardo per ottenere il miglior effetto stabilizzante, ed il suo sfasamento si possono regolare variandone il livello.

Ovviamente, in fase di progetto, l'impianto e' stato dimensionato per una determinata gamma di condizioni di carico, cioe' in definitiva per una determinata gamma di valori del dislocamento e dell'altezza metacentrica, e per i conseguenti periodi di rollio previsti per l'unita'.

Nel caso specifico di nave MAGNAGHI si ha una riduzione standard del 75% del rollio a nave ferma per le condizioni indicate nella figura seguente.



Prima dell'uscita in mare occorre determinare, almeno approssimativamente, il livello del liquido piu' opportuno per ottenere il massimo effetto stabilizzante.

Questo puo' essere ottenuto con l'ausilio del grafico della pagina successiva in alto, costruito attraverso i calcoli e le prove sperimentali dell'impianto.

Tale grafico da il livello del liquido necessario in funzione dell'altezza metacentrica e del periodo di rollio della nave se noto.

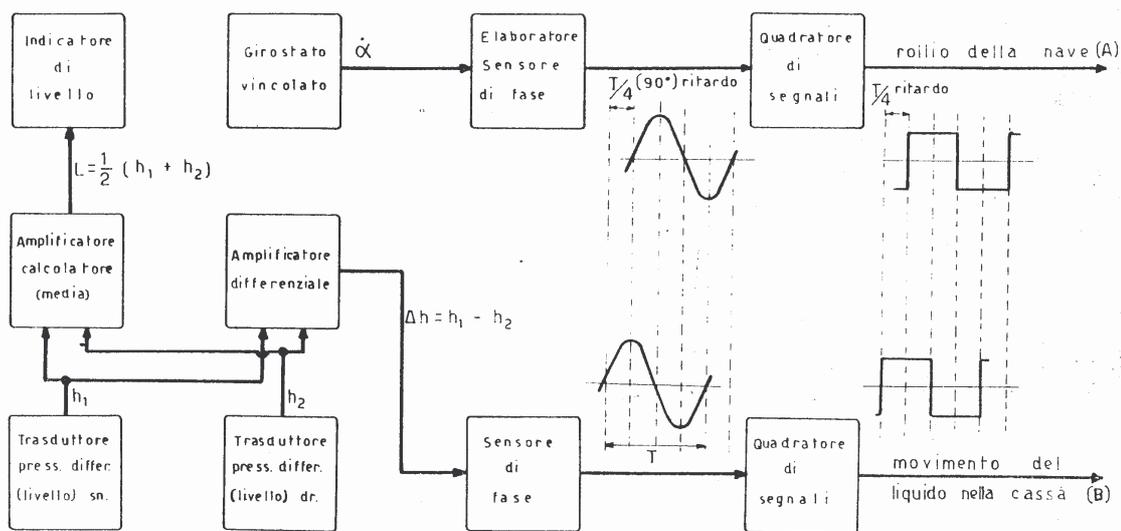
Una volta usciti in mare si ricerca, appena possibile l'altezza esatta del liquido nella cassa con il cosiddetto "sensore di fase" di cui e' dotato l'impianto.

Tale dispositivo misura il movimento del liquido nella cassa e ne confronta il periodo di oscillazione con quello della nave, verificandone lo sfasamento.

A seconda dei casi il dispositivo illumina una delle scritte RIEMPIRE-CORRETTO-VUOTARE, permettendo al personale di intervenire di conseguenza sul livello.

Mediante gli stessi sensori viene misurata anche l'altezza del liquido, la cui conoscenza permette di correggere il valore dell'altezza metacentrica della nave per effetto dello specchio libero della cassa FLUME.

La correzione si può fare con l'ausilio della figura della pagina precedente in basso, che da appunto la correzione da apportare all'altezza metacentrica in funzione del dislocamento dell'unità e del livello del liquido nella cassa (vedi la figura seguente).



SCHEMA A BLOCCHI DELL'UNITA' PER LA MISURA DEI MOVIMENTI

E' bene vuotare la cassa in caso di danneggiamento della nave.

Esaminiamo adesso il sensore di fase. Si tratta di una apparecchiatura sensibile al moto relativo che esiste tra il rollio della nave ed il moto del gasolio nella cassa. Quest'ultimo movimento e' misurato da due trasduttori di pressione differenziale, mentre il movimento di rollio della nave e' misurato da un sistema giroscopico.

Esaminiamo adesso i vari componenti del l' "Unita' per la misura dei movimenti", sia della nave che del liquido, facendo riferimento allo schema della pagina seguente.

Il livello ed il movimento del liquido sono misurati da due sensori o *trasduttori di pressione differenziale*, montati sul fondo della cassa, all'esterno, uno a diritta ed uno a sinistra.

Essi sono collegati alla cassa mediante appositi tubi muniti di valvole di intercettazione.

Ogni trasduttore e' costituito da un soffietto, collegato ad un misuratore di sforzo di tipo elettrico, circuito a ponte, e ad un amplificatore, entrambi contenuti nella scatola del trasduttore.

I segnali emessi dai due trasduttori, h_1 e h_2 , vengono inviati ad un *amplificatore differenziale*, che ne fa la differenza, $\Delta h = h_1 - h_2$.

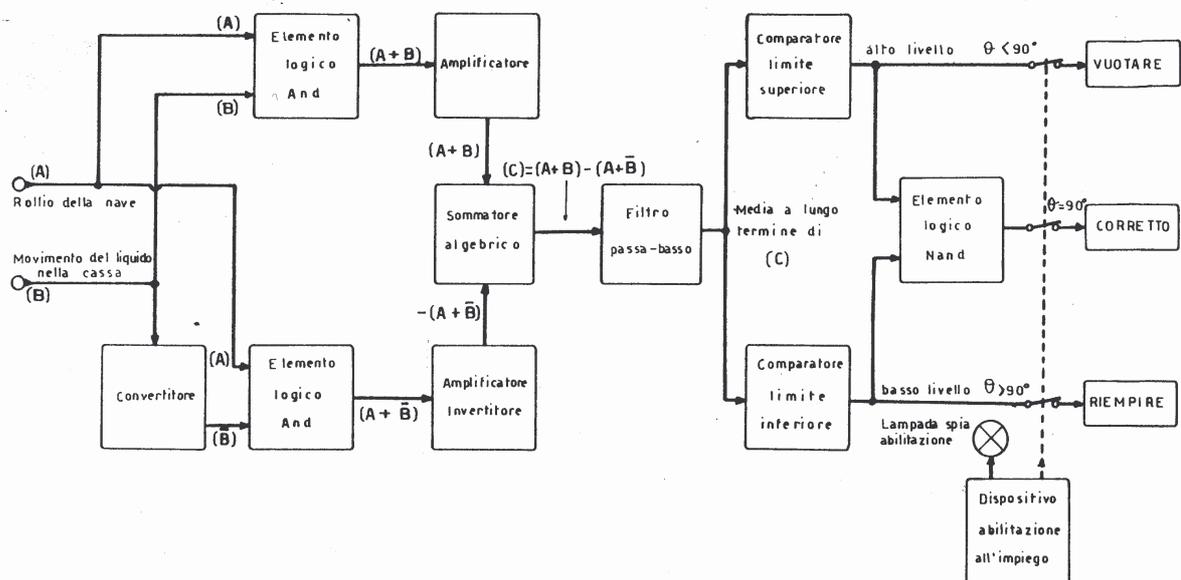
Questa differenza, che e' proporzionale al movimento del liquido, viene inviata ad un *sensore di fase* che ne costruisce il diagramma in funzione del tempo.

Il segnale passa poi ad un quadratore che lo trasforma in segnale ad onda quadrata, allo scopo di semplificare i successivi controlli ed elaborazioni.

Il segnale che ne risulta, indicato con B, che rappresenta il movimento del liquido nella cassa, passa poi al *rivelatore di fase* , il quale costituisce la seconda parte dell'impianto.

A quest'ultimo perviene anche il segnale che rappresenta il rollio della nave e che viene indicato con A.

Detto segnale si ottiene mediante un *giroscopio vincolato* che misura la velocita' di rollio della nave, un *elaboratore sensore di fase* che elabora opportunamente il segnale e ricava il diagramma del rollio in funzione del tempo, ed infine un *quadratore* che lo trasforma in onda quadrata cosi' come abbiamo visto per il movimento del liquido (vedi lo schema della figura seguente).



SCHEMA A BLOCCHI DEL RIVELATORE DI FASE

Aggiungiamo che i segnali dei due sensori sulla cassa vengono anche inviati ad un amplificatore calcolatore che ne esegue la media, $L=(h_1+h_2)/2$ e quindi da la misura del livello del liquido nella cassa. Nella figura della pagina seguente e' rappresentato lo schema a blocchi del rivelatore di fase che deve determinare se il livello del liquido nella cassa e' giusto o sbagliato.

I due segnali, rollio della nave A e movimento del liquido nella cassa B vengono elaborati nei vari blocchi in modo da ottenere un segnale C che indichi quanto si e' lontano dallo sfasamento ottimale di 90° .

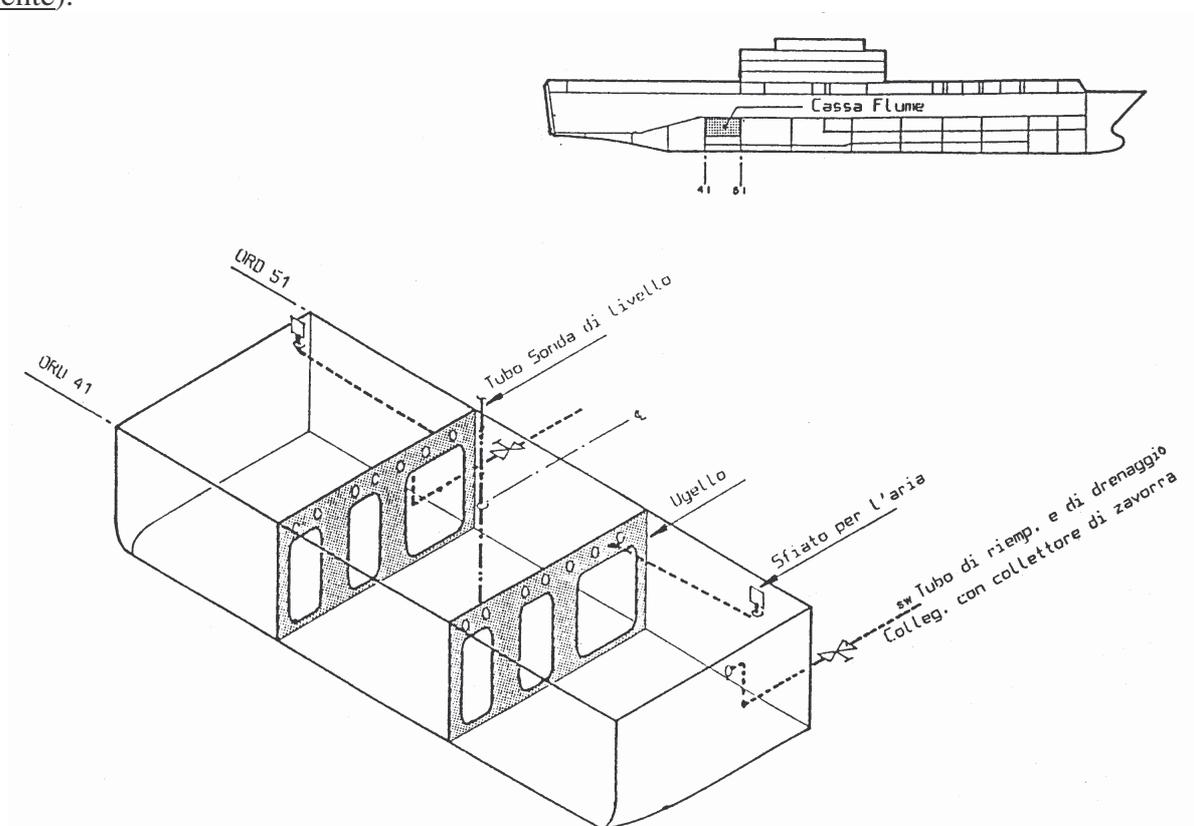
Il segnale C viene confrontato con un limite superiore ed uno inferiore in due *comparatori* che attivano l'indicazione VUOTARE se $\theta < 90^\circ$ o RIEMPIRE se $\theta > 90^\circ$.

Se la differenza e' nulla i comparatori non attivano nessuna indicazione ed un elemento logico Nand emette un segnale positivo solo quando entrambi i segnali in ingresso sono negativi ed attiva l'indicazione CORRETTO.

15.3 - Impianto per unita' LDP (nave San Giorgio-San Marco)

L'impianto di stabilizzazione delle unita' da sbarco tipo LDP (Landing Personell Dock) e' a casse passivo tipo FLUME simile a quello visto per nave MAGNAGHI.

Esso consiste di una sola cassa posta nella zona centrale della nave tra le ordinate 41 e 51, riempita e drenata con acqua di mare attraverso il clarinetto dell'impianto zavorra (vedi la figura seguente).



I dati del livello del liquido sono ricavati dal tubo sonda , oppure per mezzo del Sistema di Monitoraggio di Fase.

Il sistema e' stato progettato per uno specifico intervallo di condizioni di carico e fino ad un valore massimo del prodotto tra dislocamento ed altezza metacentrica (GM) pari a 27800 metri per tonnellata.

Il campo di variazione di GM e' compreso tra 1,5 e 3,35 metri, che equivale rispettivamente ad un periodo di rollio che va da 12.7 a 8.5 secondi.

Se la nave dovesse operare oltre questo campo di progetto, l'effetto stabilizzante della cassa Flume verrebbe leggermente ridotto.

Il funzionamento del Sistema Flume consiste nel determinare la condizione di carico della nave prima della partenza e nel riempire la cassa Flume fino al livello raccomandato per quella condizione di carico.

Durante la navigazione il livello deve essere modificato solo per grandi variazioni nel periodo di rollio dovuto al consumo di combustibile, sbarco di mezzi ecc. ; in questo caso il livello del liquido dovrà essere cambiato secondo le indicazioni del *Sistema di Monitoraggio di Fase*; questo assicura il massimo di efficienza del sistema .

L'efficienza del sistema non dipende dal grado di agitazione del mare ma solo dal periodo di rollio della nave per cui nessun cambio di livello deve essere fatto per tale motivo.

Grazie al Sistema di Monitoraggio di Fase, il livello ottimale di funzionamento può essere determinato in mare.

Il Sistema di Monitoraggio di Fase misura il movimento del liquido nella cassa e confronta questo movimento con il rollio della nave, in modo da stabilire se il ritardo di fase è di 90° .

Poiché il sistema misura il moto relativo tra il liquido stabilizzante e la nave, il livello non può essere aggiustato se la nave non sta rollando o se sta rollando leggermente in condizioni di mare tali che gli angoli di rollio non superano i $\pm 5^\circ$.

La variazione del livello fa sì che possa essere mantenuta la differenza di fase ottimale di circa 90° in un largo campo di frequenze e precisamente:

- Maggior livello nella cassa = movimenti del liquido più veloci quando il rollio è più breve.
- Minore livello nella cassa = movimenti del liquido più lenti quando il periodo di rollio è più lungo.

Il Sistema di Monitoraggio di Fase misura il movimento della nave mediante un indicatore di rollio giroscopico e quello del liquido della cassa mediante due trasmettitori di livello, in funzione del tempo e confronta, periodicamente, i due movimenti indicando il ritardo di fase.

L'indicazione del ritardo di fase viene direttamente convertita nelle informazioni

- "FILL" = aumentare il livello nella cassa : ritardo di fase $>90^\circ$
- "CORRECT" = il livello nella cassa è corretto : ritardo di fase $=90^\circ$
- "DRAIN" = diminuire il livello nella cassa : ritardo di fase $<90^\circ$

Per quanto riguarda il trattamento dei segnali provenienti dai trasduttori di livello e dal giroscopio, l'impianto è analogo a quello esaminato per la nave idrografica "AMMIRAGLIO MAGNAGHI".