

## SUGLI IMPIANTI DI FORZA MOTRICE A RICUPERO DI VAPORE

Comunicazione del Socio Ing. Guglielmo Piperno

nell'Adunanza del 16 Settembre 1919

Il principio del ricupero del vapore è di per sè stesso così intuitivo e semplice ed in questi ultimi tempi coronato da tante e fortunate applicazioni, che ormai l'importanza non ne sfugge ad alcuno degli industriali, che posseda nel proprio stabilimento generatori di vapore. Con il moltiplicarsi degli impianti a ricupero si è visto però che parecchi di essi, che da principio pur avevano destate lusinghiere speranze, hanno procurato da ultimo vantaggi economici lievi o nulli, mentre non mancano esempi di alcuni, dimostrati economicamente del tutto dannosi.

La ragione di tali insuccessi va attribuita alla mancanza di uno studio preliminare e diretto anzitutto a stabilire il proporzionamento più conveniente delle varie parti dell'impianto, affinchè ciascuna di esse consenta il miglior rendimento praticamente ottenibile e sia così possibile allo studioso, dalla nozione dei singoli rendimenti, dedurre con accettabile esattezza la convenienza o meno di tutto il sistema.

In tale studio molteplici sono gli elementi, tra cui alcuni variabili, che contemporaneamente debbono essere presi in esame, onde ben si comprende come di non lieve difficoltà sia talora la scelta della migliore soluzione tra le infinite che il problema spesso presenta.

Si rende ad ogni modo necessaria una ricerca basata su criteri logici e sistematica e il più delle volte non scevra da numerosi tentativi per giungere alla soluzione definitiva.

Ho creduto che tale ricerca possa essere notevolmente abbreviata e semplificata, facendo uso del metodo grafico come quello, che permetta per mezzo di

diagrammi il confronto contemporaneo di quantità variabili e la loro valutazione con assai facilità.

Il seguente procedimento può rispondere bene allo scopo prefisso cioè quello di stabilire non solo se in un dato impianto da costruirsi o esistente, in cui il vapore si utilizzi per altri scopi oltrechè per forza motrice, convenga o meno adottare motori a ricupero, ma anche l'eventuale entità dei vantaggi che ne segue (1).

Ho limitato le ricerche al solo costo annuo del combustibile per la forza motrice e per il vapore di riscaldamento, potendosi poi con tutta facilità passare da esso al costo totale in base alle spese d'impianto del macchinario, per stabilire le quali le varie Ditte costruttrici danno gli elementi necessari, alle spese presumibili di esercizio e a ben proporzionate quote d'interessi e di ammortamenti (2).

Base del nostro studio è quindi l'esame delle variazioni reciproche del consumo di vapore e di forza motrice durante le diverse ore del giorno; e poichè il regime giornaliero dei detti consumi potrà variare ad intervalli di tempo più o meno lunghi, così il nostro esame dovrà essere esteso per lo meno a tutta l'intera annata di lavoro.

Ciò è relativamente semplice quando si tratti della trasformazione di un impianto misto già esistente in uno a ricupero, essendo sempre possibile, mediante contatori, misurare direttamente le variazioni del consumo di vapore, mentre generalmente, non mancherà nemmeno il mezzo di determinare con sufficiente esattezza anche le variazioni della forza motrice.

Nel caso invece di un impianto nuovo dovranno con la massima cura i suddetti consumi ricercarsi *a priori*, in base alle lavorazioni, che si dovranno compiere, alla potenza assorbita dalle varie macchine, alle perdite delle trasmis-

(1) Lo stesso problema è stato già trattato con competenza dall'Ing. Grazioli in una memoria pubblicata sugli « Atti del Collegio degli Architetti ed Ingegneri » di Milano, Anno XLVIII, Fasc. 3. Il Grazioli ha però seguito un metodo analitico, che, a differenza di quello grafico, crediamo non si presti troppo a trarre quelle deduzioni, talvolta di molta importanza, che scaturiscono dalla contemporanea visione di tutti gli elementi del problema, in tutto il periodo a cui l'esame deve essere esteso.

(2) La sola difficoltà che si possa presentare praticamente in tale calcolo, consiste nell'equa ripartizione delle spese d'impianto delle caldaie e totali di esercizio in quelle parziali spettanti alla produzione di vapore per forza motrice e per riscaldamento. La suddivisione che appare più logica è quella di attribuire alla sola forza motrice il maggior costo delle caldaie dovuto alla pressione maggiore di lavoro e alla installazione del surriscaldatore, nonchè la quota parte di spesa che corrisponde alla produzione di vapore per sola forza motrice, cioè del vapore non utilizzato per riscaldamento.

Quali spese poi di esercizio per forza motrice debbono intendersi quelle dovute all'acquisto dei lubrificanti, alla manutenzione generale e al personale. Esse, prima del 1914, variavano complessivamente dalle 20 alle 30 lire per cavallo indicato medio annuo.

Per le quote d'interessi ed ammortamenti rimandiamo ai migliori manuali e alla tabella del *Urbahn-Reutlinger*, riportata nella memoria già citata del Grazioli.

sioni, ai disperdimenti presumibili di calore attraverso le condotte, ecc. ecc, e, quando sia possibile, ai dati che risultano dal confronto con impianti simili già costruiti.

Il risultato delle esperienze o degli accertamenti fatti durante un giorno potrà essere espresso mediante una coppia di diagrammi del genere di quella

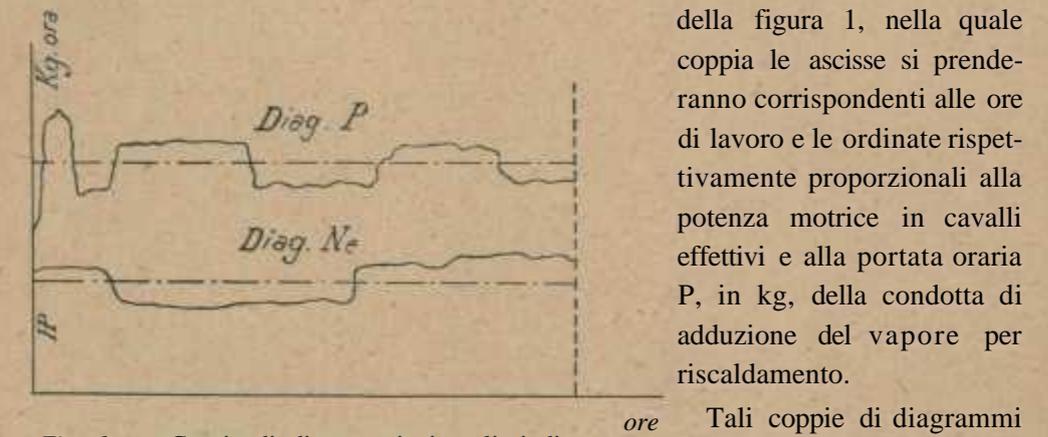


Fig. 1. — Coppia di diagrammi giornalieri di consumo di forza motrice e di vapore per riscaldamento.

Tali coppie di diagrammi non varieranno sensibilmente tutti i giorni, quindi converrà raggnappare quelle simili tra loro e ricavare da esse un diagramma medio, che rappresenti il regime giornaliero dei consumi di vapore e di forza motrice relativo a quel determinato numero di giorni. Va da sè che le lavorazioni nella fabbrica dovranno studiarsi in modo che detti consumi siano in tutta la giornata più che possibile regolari.

Si avrà così una serie di coppie di diagrammi medi sui quali fondare le ulteriori ricerche.

Altro dato del problema dovrà considerarsi la pressione di utilizzazione del vapore per riscaldamento (1), pressione, che, com'è noto, deve essere la minore possibile consentita dai bisogni dello stabilimento, inoltre dovranno supporre note le condizioni del vapore all'ingresso della motrice, perché o già conosciute se si tratta di trasformazione di un impianto esistente o già scelte nei rimanenti casi entro i limiti che la pratica riconosce convenienti (2).

Si traccino ora sopra ciascuna coppia di diagrammi medi giornalieri due rette di compenso, le cui ordinate determineranno rispettivamente la potenza

(1) Talvolta invece di una sola pressione possono occorrere per il riscaldamento due o più pressioni diverse; il metodo che esporremo può anche in questo caso adottarsi, scindendo il problema in altrettanti quante sono le dette pressioni.

(2) Generalmente si adotta vapore surriscaldato alla pressione di  $12 \div 14$  atmosfere e alla temperatura di  $250^\circ \div 340^\circ$ .



calcolarlo analiticamente o più semplicemente mediante il diag. del Mollier, nel quale (fig. 3), come si sa, è dato dalla lunghezza AB del segmento di adiabatica, che partendo dal punto noto iniziale dell'espansione sulla linea di pressione  $p_1$  si prolunga fino alla linea della pressione di scarico  $p_2$ . Il valore così ottenuto moltiplicato per il rendimento indicato presumibile del motore in corrispondenza del minimo consumo unitario di vapore, darà il numero di calorie che per ogni

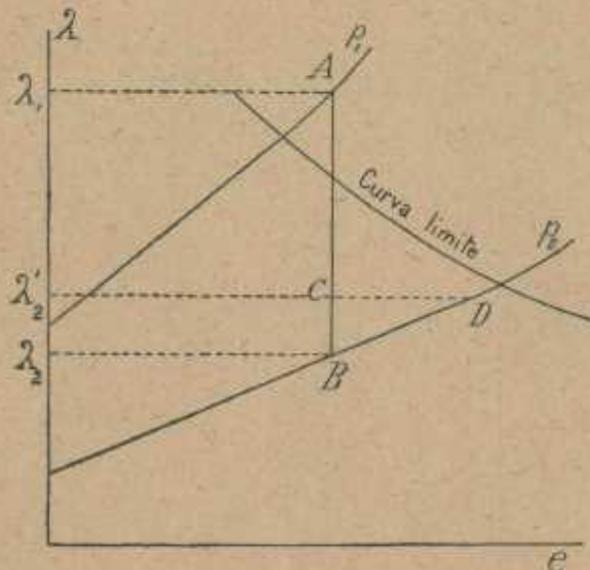


Fig. 3. — Determinazione, mediante il diagramma del Mollier, del lavoro disponibile di 1 kg. di vapore.

kg di vapore si trasforma in lavoro indicato motore. Tale numero posto a denominatore della frazione che ha per numeratore 635 (calorie corrispondenti al cavallo-ora) permetterà di conoscere il consumo di vapore per cavallo indicato ora, dal quale si dedurrà quello minimo corrispondente al cavallo effettivo, in base al rendimento meccanico presumibile.

Si attribuisca ora a ciascuna delle aree sottostanti ai vari tratti orizzontali del diag. per forza motrice un numero, che rappresenti il coefficiente, che

chiameremo *fattore di maggior consumo*, per cui deve moltiplicarsi la cifra già determinata del consumo minimo per avere quella di consumo effettivo in corrispondenza di ogni striscia del diagramma. Per tale determinazione occorre evidentemente conoscere come vari il consumo di vapore in relazione al carico del motore. Ciò in genere si può desumere, nei casi specifici, dai dati forniti dalle Ditte costruttrici, in mancanza di essi potremo servirci delle curve della fig. 4, che danno rispettivamente per le macchine a stantuffo (linea piena) e per le turbine a vapore (linea punteggiata) il fattore ricercato in funzione dei vari carichi, riferiti al carico di maggior rendimento totale.

Si noti però che i valori che si traggono da tali curve debbono considerarsi come medi e non hanno carattere di grande esattezza, essendo quelli reali dipendenti da molteplici cause, quali il sistema di regolazione, di distribuzione, del valore assoluto della potenza, delle oscillazioni più o meno grandi, a cui è soggetto nelle varie ore del giorno il carico motore, ecc, ecc.; tuttavia l'approssi-

mazione che si ottiene è nella pluralità dei casi del tutto sufficiente. Quando sia possibile si terranno nel debito conto le speciali circostanze di funzionamento del motore, così ad esempio l'esame dei diagrammi giornalieri ci darà esatta idea delle eventuali oscillazioni, cui il carico è soggetto e potrà consigliarci una opportuna correzione del valore già ricercato.

Noti i vari fattori di maggior consumo, potremo per ogni striscia del diagramma passare al calcolo dei kg di vapore-ora, occorrenti per la forza motrice

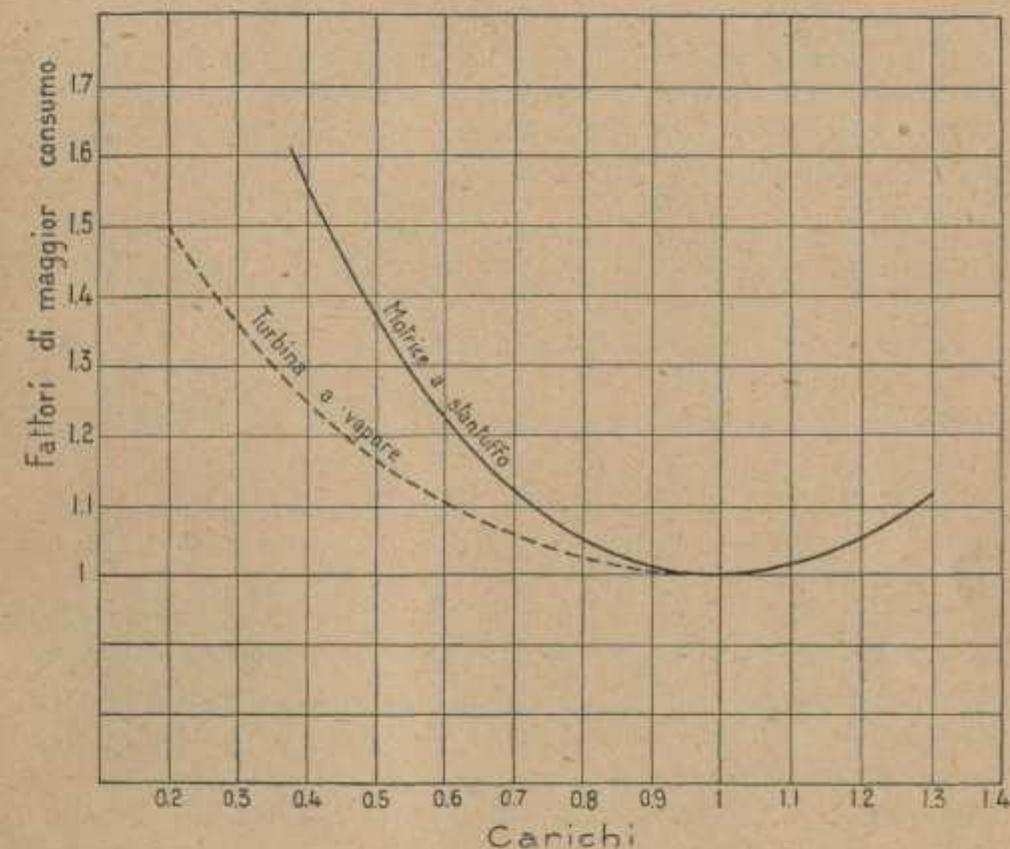


Fig. 4. — Diagrammi per la determinazione dei fattori di maggior consumo a seconda del carico del motore.

e trasformare quindi il diagramma del consumo di forza motrice in diagramma di consumo di vapore, che potrà così paragonarsi con quello del vapore occorrente per riscaldamento.

Tale paragone dovrà suggerire le varianti che dovremo apportare alle dimensioni del motore per raggiungere la massima economia di funzionamento.

Così è del tutto evidente che i rendimenti più alti del motore dovranno essere riservati in corrispondenza di quei tratti del diagramma in cui vi sia

pericolo di spreco di vapore nell'atmosfera, e dove tale spreco può assumere maggiore entità in relazione alla lunghezza dei tratti stessi.

Può risultare ad esempio che le condizioni di minor consumo di vapore debbano coincidere con lo sviluppo di una potenza vicina alla massima, oppure di una potenza relativamente piccola e non sarà raro il caso, in cui necessiti che i rendimenti del motore siano ugualmente buoni per due o più andature alquanto differenti tra loro.

Non sempre però le suddette condizioni di massima economia saranno realizzabili in pratica e si dovrà ad esse rinunciare. Ad esempio il sistema di distribuzione adottato potrà eventualmente non permettere gradi d'introduzione corrispondenti ai carichi più elevati o al disotto di un certo limite; e allora un cambiamento delle dimensioni del motore potrà rendersi inevitabile e se le nuove dimensioni risultassero sproporzionate per i carichi normali, potrà darsi ancora che s'imponga, come meglio vedremo in seguito, una nuova accurata indagine per stabilire il sistema di distribuzione più adatto o ricercare la migliore soluzione tra le varie esigenze talvolta contraddittorie.

Una soluzione da prendersi sempre in esame e che può talvolta riuscire di grande utilità consiste nell'adottare un motore indipendente, generalmente elettrico, per superare le punte.

Stabilite definitivamente con i criteri indicati le dimensioni del motore e quindi il carico di massimo rendimento totale si dovrà, in base a quest'ultimo e tenendo conto della forma dei diagrammi giornalieri, convenientemente fissare per ogni striscia del diagramma annuale di forza motrice il nuovo coefficiente di maggior consumo e quindi passare da tal diagramma a quello definitivo di consumo di vapore per forza motrice. Quest'ultimo, che potrà risultare notevolmente differente da quello prima ottenuto, servirà, confrontato con quello di consumo di vapore per riscaldamento, alle seguenti ulteriori indagini.

Possono, com'è facile prevedere, darsi tre casi:

**1° Caso.** Il diagramma annuale di consumo di vapore per forza motrice rimane tutto al disotto di quello del consumo di vapore per riscaldamento (fig. 5). È evidente che in tal caso l'area compresa fra i due diagrammi posti a paragone, nella figura rappresentati rispettivamente con  $Oa_1b_1c_1d_1e_1f_1g_1h_1i_1l_1m_1n_1n_0$  e  $OAB CDE FGH n_0$  rappresenterà un certo numero di kg di vapore da prelevarsi direttamente dalla caldaia a scopo di riscaldamento. Perchè però i due diagrammi siano paragonabili è necessario che le loro aree rappresentino consumi di vapore ad uguale stato fisico, ciò che qui non è verificato, come è presto visto riflettendo che lo stato fisico del vapore all'uscita della motrice non solo in generale non sarà uguale a quello, cui si riferisce il diagramma di vapore per riscaldamento,

ma esso è anche variabile nei vari tratti del diagramma, perchè dipende dal rendimento indicato della motrice, rendimento che varia col variare del carico.

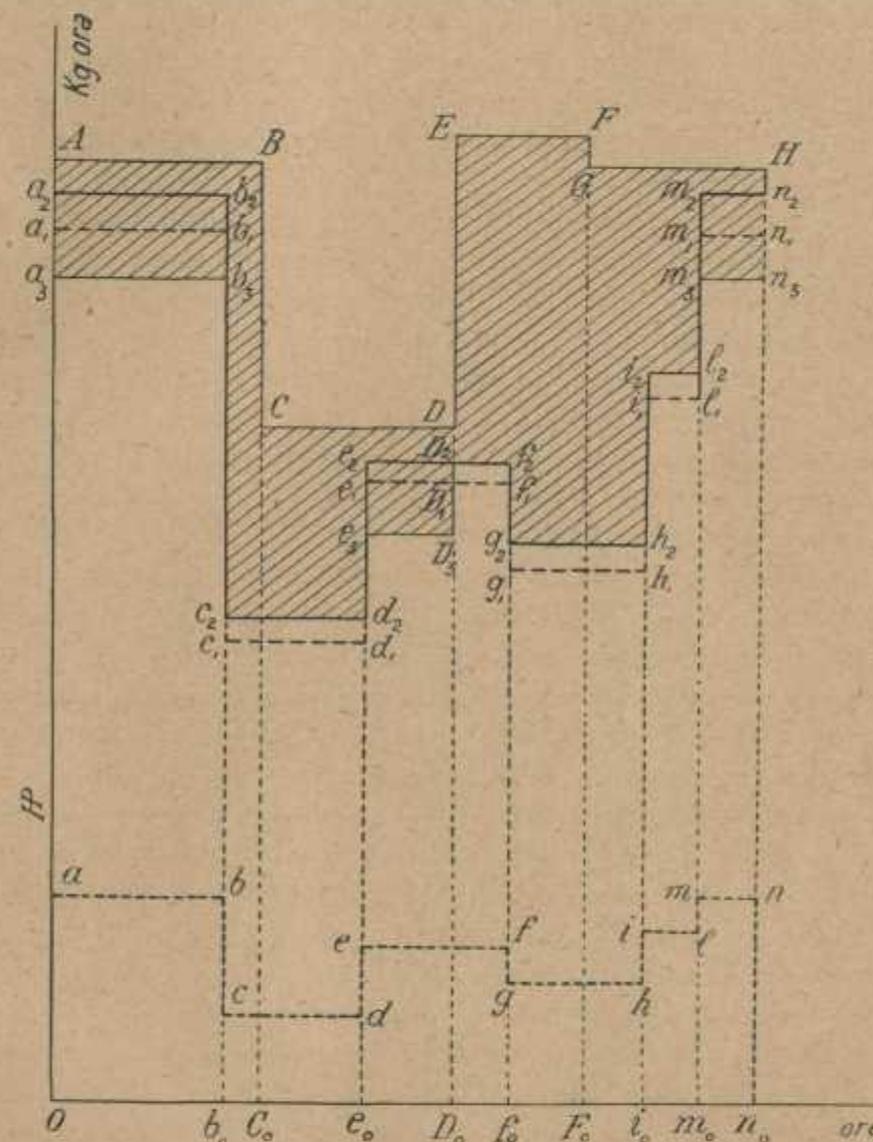


Fig. 5. — Trasformazione del diagramma annuale di consumo di lavoro motore ( $Oabcde fghilmn_0$ ) in quello corrispondente di consumo di vapore ( $Oa_1b_1c_1d_1e_1f_1g_1h_1i_1l_1m_1n_1n_0$ ). Quest'ultimo rimane tutto al disotto del diagramma di consumo di vapore per riscaldamento ( $OAB CDE FGH n_0$ ) — Area tratteggiata = peso di vapore (saturo e secco) da prelevarsi direttamente dalle caldaie.

Dovremo quindi correggere i due diagrammi o almeno uno di essi in modo che la condizione enunciata sia soddisfatta, e poichè il consumo orario totale di vapore per riscaldamento lo supporremo dato in vapore saturo e secco, converrà

procedere alla correzione del diagramma di vapore all'uscita della motrice in modo che le nuove ordinate rappresentino esse pure quantità di vapore saturo e secco, il cui calore totale sia uguale a quello che corrisponde alle ordinate del diagramma primitivo. Per una tale correzione occorre evidentemente conoscere lo stato fisico del vapore all'uscita della motrice; ciò che, con approssimazione sufficiente, è facile ottenersi servendosi del diagramma del Molliè e operando nel seguente modo.

Rappresenti in tale diagramma (fig. 3) la lunghezza del segmento  $AB$  di adiabatica, compreso tra le due linee a pressione costante  $p_1$  d'introduzione e  $p_2$  di scarico, il valore del ciclo di Rankine, e si supponga uguale ad  $\eta$  il rendimento indicato del motore: portando, a partire da  $A$ , il segmento  $\eta AB$  si otterrà un punto  $C$ , dal quale conducendo la orizzontale fino ad incontrare la linea di pressione  $p_2$ , si determinerà il punto  $D$ , che definisce lo stato fisico cercato del vapore e a cui corrisponderà il calore totale  $\lambda'_2$ .

Dividendo allora per ciascuna striscia verticale del diagramma da correggere, il calore totale  $\lambda_2$ , che ad essa compete, per quello  $\lambda'_2$ , corrispondente al vapore saturo e secco alla pressione  $p_2$ , si avranno i vari rapporti tra le ordinate del detto diagramma e quelle del nuovo, che vogliamo tracciare. Quest'ultimo risulterà tutto al disopra del precedente quando il vapore esca dalla motrice allo stato surriscaldato, come nel caso della figura si è supposto.

L'area compresa tra il nuovo diagramma  $Oa_2 b_2 c_2 d_2 e_2 f_2 g_2 h_2 i_2 l_2 m_2 n_2 n_0$  disegnato con linea più marcata e quello totale di consumo di vapore per riscaldamento rappresenterà quindi un certo peso di vapore saturo e secco, corrispondente a quello da prelevarsi direttamente dalle caldaie. Può però questo peso non corrispondere a quello totale di prelievo di vapore diretto, infatti trasformando i diagrammi giornalieri di consumo di forza motrice in diagrammi di consumo di vapore per forza motrice può accadere che questi ultimi siano intrecciati con quelli di consumo di vapore per riscaldamento e che quindi in qualche intervallo di tempo il vapore di scappamento della motrice non trovi immediata utilizzazione, pur essendo nell'intera giornata il consumo medio di vapore per forza motrice minore di quello, che compete al riscaldamento.

Converrà quindi dividere il caso considerato in due sottocasi:

a) In tutte le coppie di diagrammi giornalieri di consumo di vapore per forza motrice e per riscaldamento, i diagrammi stessi non sono intrecciati, cioè il consumo di vapore per riscaldamento si mantiene in tutte le ore del giorno sempre superiore a quello per forza motrice.

L'area allora tratteggiata nella figura 5 e compresa tra i due diagrammi annuali, prima tracciati, rappresenterà tutto il peso di vapore, ridotto allo stato saturo e secco, che dovrà essere prelevato direttamente dalla caldaia.

È questo il caso tipico più favorevole del ricupero totale, caso in cui, per l'economia generale dell'impianto, il rendimento indicato più o meno buono del motore non ha alcuna importanza dato che tutto il calore ceduto dal vapore che ha agito nella motrice viene effettivamente utilizzato e per forza motrice e per riscaldamento.

Converrà quindi adottare un motore di costruzione semplice, cioè privo di tutti quegli accorgimenti atti a migliorarne il funzionamento termico, per ottenere il vantaggio di un minor costo di acquisto.

b) Le coppie suddette di diagrammi giornalieri sono, in numero totale o parziale, costituite da diagrammi intrecciati.

Si calcoli in tal caso per ognuna di tali coppie il peso di vapore saturo e secco equivalente a quello, che all'uscita dalla motrice non è subito utilizzato per riscaldamento, peso che chiameremo  $P$ . Dei pesi  $P$ , così ricavati, si dovrà con cura studiare un utile impiego nella fabbrica, in modo da conseguire una diminuzione del peso di vapore prelevato direttamente dalle caldaie. Essi potranno ad esempio servire per riscaldamento preventivo di bagni, oppure, se non di molta entità, esser inviati in un apposito apparecchio accumulatore di calore. In generale però la loro utilizzazione non sarà che parziale, dovremo quindi tener conto di una frazione di essi, più o meno grande secondo i casi, come inutilizzata.

Sia per ogni peso  $P$ ,  $\varphi$  tale frazione, onde  $\varphi P/\chi$ , dove  $\chi$  è il numero di ore di lavoro in una giornata, rappresenti il peso di vapore medio orario inutilizzato.

Portando allora nel diagramma annuale, sulle ordinate corrispondenti ai diagrammi giornalieri che si considerano, dall'alto verso il basso, a partire dal diagramma  $Oa_2 b_2 c_2 d_2 e_2 f_2 g_2 h_2 i_2 l_2 m_2 n_2 n_0$ , disegnato con linea più marcata, i segmenti che rappresentano i rapporti, ora calcolati, si sarà determinato un nuovo diagramma, rappresentato in figura con  $0 a_3 b_3 c_3 d_3 e_3 D_3 D_2 f_2 g_2 h_2 i_2 l_2 m_3 n_3 n_0$ , che rappresenterà il peso di vapore, ridotto allo stato saturo e secco e all'uscita dalla motrice interamente utilizzato per il riscaldamento. È evidente che se le aree come la  $a_2 b_2 b_3 a_3$ ,  $e_2 D_2 D_3 e_3$ ,  $m_2 n_2 n_3 m_3$  sono molto piccole, si possono anche qui ripetere le considerazioni già fatte riguardo alla costruzione della motrice e al costo di acquisto di essa, non così se esse assumono proporzioni relativamente grandi: in tal caso è necessario vagliare bene se convenga diminuirle, facendo uso di motrice più perfetta possibile, o annullarle adottando la motrice a ricupero parziale, oppure infine se la spesa superiore di acquisto non compensi il beneficio che si può ottenere.

Veniamo ora alla determinazione del costo totale annuale di combustibile dell'intero impianto a ricupero.

Evidentemente tale costo è uguale alla somma di due costi parziali; l'uno

corrispondente all'area del diagramma  $Oa b c d e f g h l m n n_0$ , dovuto al peso di vapore che va ad agire nella motrice, il secondo, corrispondente alla differenza tra le aree dei due diagrammi  $O A B C D E F G H n_0$ , e  $0 a_3 b_3 c_2 d_2 e_3 D_3 D_2 f_2 g_2 h_2 i_2 l_2 m_3 n_3 n_0$  cioè all'area tratteggiata in figura, dovuto al peso di vapore direttamente prelevato dalle caldaie e usato per riscaldamento.

Ambedue questi pesi di vapore sono dunque ricavabili mediante integrazione di aree, quindi per la suddetta ricerca basterà conoscere i costi relativi al peso unitario nelle condizioni già fissate di pressione e di temperatura.

Il problema può risolversi speditamente col seguente metodo grafico. Sia  $p$  il peso di vapore prodotto da 1 kg di combustibile, avente un potere calorifico  $k$  e bruciato in un generatore, il cui rendimento risulti  $\eta$ . Chiamiamo infine con  $\lambda_1$  la quantità di calore necessaria per portare il kg di acqua di alimentazione dalle condizioni iniziali allo stato fisico che esso assume all'uscita della caldaia, cioè sia  $\lambda_1 = \lambda - q'$ , dove  $\lambda$  è il calore totale del kg di vapore all'uscita dalla caldaia e  $q'$  il calore posseduto dall'acqua di alimentazione. Si avrà evidentemente :

$$p = \frac{k \eta}{\lambda_1} \quad (1)$$

ed allora, intendendo per costo in combustibile di 1 kg di vapore o senz'altro per costo di 1 kg di vapore, il costo del combustibile necessario per la produzione del kg stesso, sarà:

$$\text{costo di un kg di vapore} = \frac{\text{costo di 1 kg di combustibile}}{p}$$

oppure per maggior comodità di calcolo:

$$\text{costo di 1000 kg di vapore} = \frac{\text{costo di 1 tonnellata di combustibile}}{p} \quad (2)$$

Generalmente in sede di progetto di un impianto non si avrà sicura conoscenza del potere calorifico  $k$  del combustibile da adoperarsi, tale cifra però non ha qui molto interesse, avendo i risultati, cui il nostro studio mira, valore comparativo e non assoluto.

Possiamo perciò fissare per  $k$  un potere calorifico medio e prossimo a quello che generalmente si riscontra in pratica: precisamente assumeremo:

$$k = 7500 \text{ calorie.}$$

In base a tale dato abbiamo costruito nella fig. 6 una coppia di diagrammi, mediante la quale si ottiene con tutta facilità il costo di 1000 kg di vapore in funzione degli elementi, che debbono ritenersi noti, cioè il prezzo della tonnellata di combustibile, il rendimento del generatore e le calorie di produzione  $\lambda_1$  del kg di vapore.

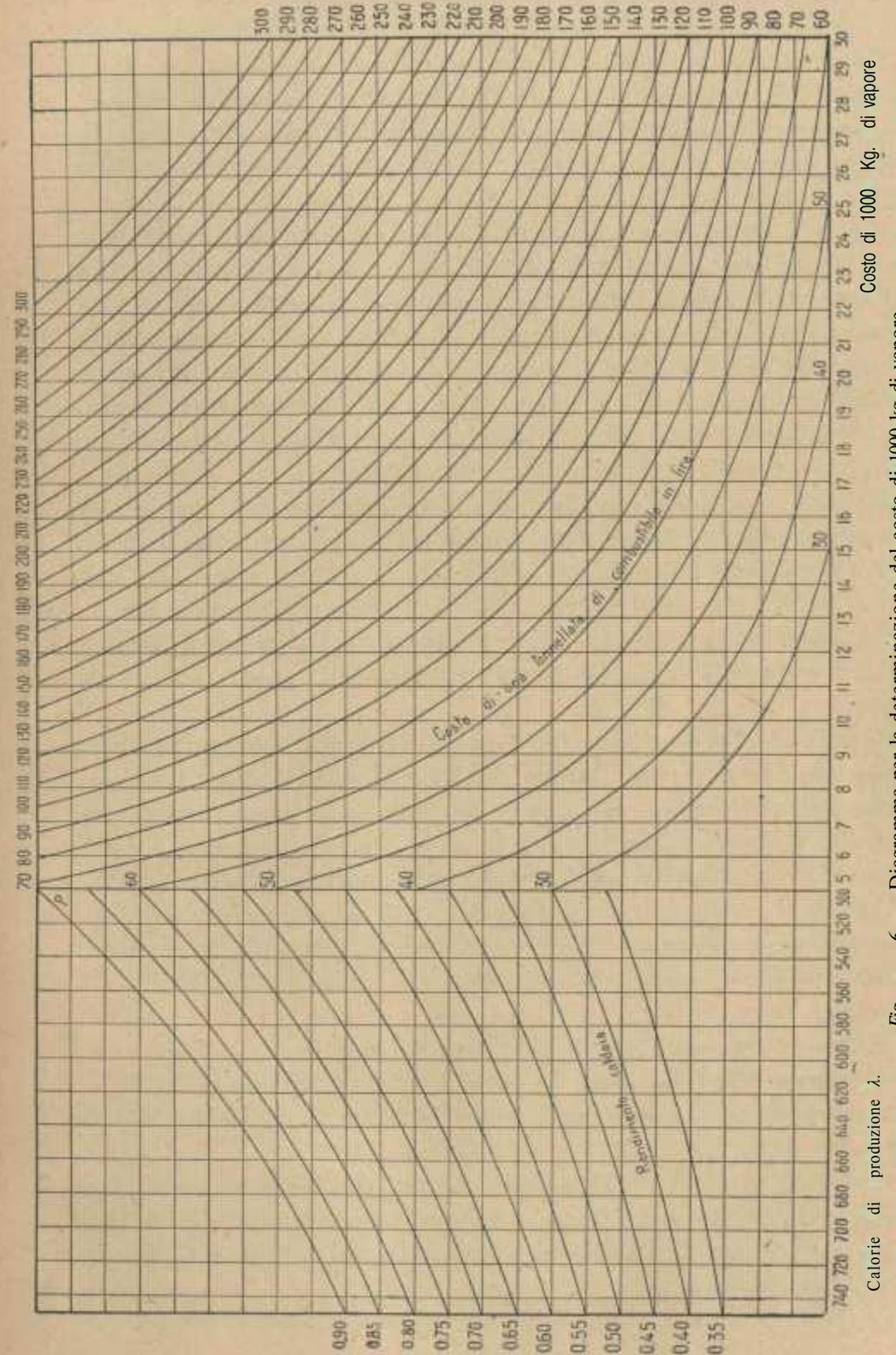


Fig. 6. — Diagramma per la determinazione del costo di 1000 kg di vapore, supposto il potere calorifico del combustibile di 7500 calorie.

Le ascisse del diagramma di sinistra rappresentano le quantità  $\lambda$ , quelle del diagramma di destra i costi in lire di 1000 kg di vapore, cioè le incognite ricercate. Le ordinate rappresentano in ambedue i diagrammi i valori  $p$  definiti dalla (1). Le curve tracciate, mediante la (1), nel diagramma di sinistra corrispondono ciascuna ad un rendimento della caldaia, quelle tracciate, mediante la (2), nel diagramma di destra, ai costi di una tonnellata di combustibile. È chiaro allora che per trovare il costo del vapore basterà, conosciuto  $\lambda$  e  $\eta$ , determinare dapprima col diagramma di sinistra il punto corrispondente al valore di  $p$  sull'asse delle ordinate, prolungarne l'ascissa nel diagramma di destra fino ad incontrare la curva del costo noto della tonnellata di combustibile e dal punto così ottenuto abbassare l'ordinata, che permetterà di leggere sull'asse delle ascisse il valore cercato.

Conosciuto così il costo unitario del vapore nelle condizioni volute per agire nella motrice e quello del vapore saturo e secco alla pressione occorrente per il riscaldamento, sarà possibile calcolare oltre il costo annuale per il combustibile dell'intero impianto a ricupero, come abbiamo già visto, anche quello che richiederebbe lo stabilimento quando non esistesse motrice a vapore, integrando l'area  $O A B C D E F G H n_o$  del diagramma relativo al vapore per riscaldamento.

La differenza tra i due costi totali determinati darà allora evidentemente ciò che ci eravamo proposti, cioè il costo del combustibile necessario per la forza motrice.

*Osservazione.* Nel diagramma di consumo di vapore per riscaldamento si suppongono considerate le perdite di calore nelle tubazioni, quelle cioè relative al percorso del vapore prima di arrivare negli apparecchi utilizzatori. Se invece non lo fossero si dovrebbe a parte considerare la spesa di vapore ad esse relativa, spesa che può giungere al  $3 \div 4 \%$  di quella totale, ma che nei casi ordinari non supera  $1 \frac{1}{2} \div 2 \%$ . Così pure se le perdite nelle dette tubazioni si prevedessero alquanto differenti nel caso d'impianto di motrice a ricupero, dovendo ad esempio la motrice essere piazzata a notevole distanza dalle caldaie, anche di ciò dovrà tenersi il debito conto.

**2° Caso.** Il diagramma annuale del consumo di vapore per forza motrice si mantiene sempre superiore a quello del consumo per riscaldamento (fig. 7).

È questo il caso opposto a quello precedente ed anche qui converrà distinguere i due seguenti sottocasi:

a) Tutte le coppie di diagrammi giornalieri di consumo di vapore per riscaldamento e per forza motrice sono costituite da diagrammi non intrecciati.

b) Alcune o tutte le coppie di diagrammi giornalieri sono costituite da diagrammi intrecciati.

Pel primo sottocaso è evidente che, indicando con le stesse lettere del caso

precedente i diagrammi corrispondenti, l'area interposta tra i diagrammi annuali,  $O A B C D E F G H I L L_o$  e,  $O a_1 b_1 c_1 d_1 e_1 f_1 g_1 h_1 l_1 m_1 n_1 o_1 L_o$ , rappresenterà il peso di vapore, ridotto allo stato saturo e secco, che non trova utile impiego a scopo di riscaldamento, peso che nel caso del ricupero totale, dovrà quindi inevitabilmente rimanere inutilizzato,

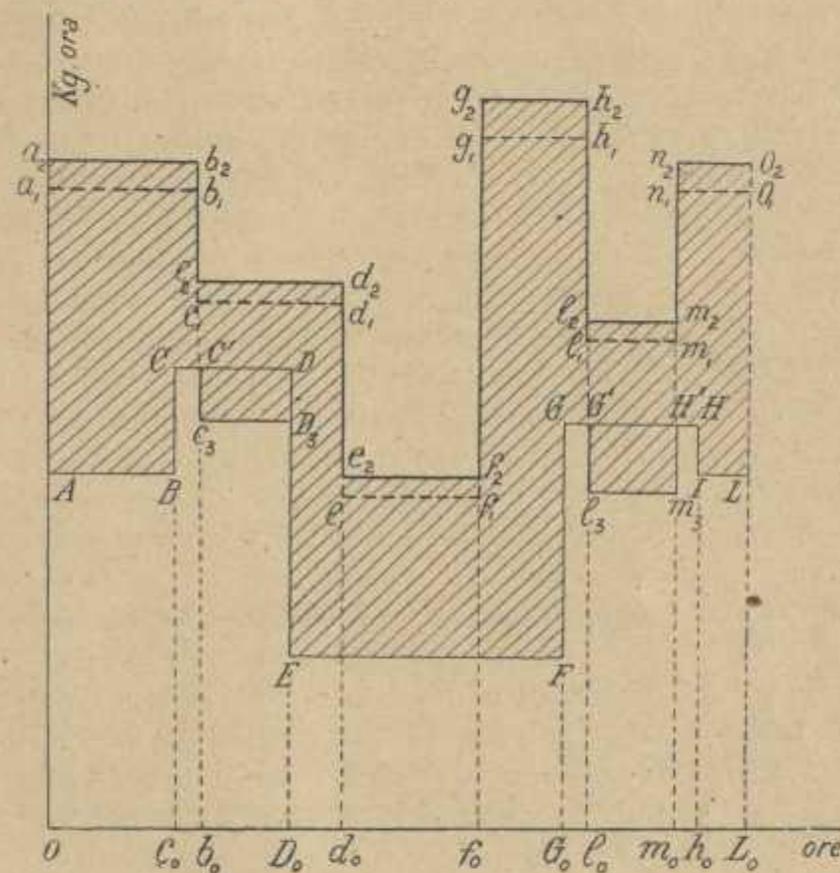


Fig. 7. — Diagrammi annuali di consumi di vapore— Il diagramma  $O a_1 b_1 c_1 d_1 e_1 f_1 g_1 h_1 l_1 m_1 n_1 o_1 L_o$  di consumo di vapore per forza motrice rimane tutto al disopra di quello  $O A B C D E F G H I L L_o$  di consumo di vapore per riscaldamento — Area tratteggiata = peso di vapore (saturo e secco) che dovrà sfuggire nell'atmosfera.

Nel secondo sottocaso l'area tra i detti diagrammi annuali è invece inferiore di quella, che corrisponde al peso di vapore inutilizzato: per determinare quest'ultimo peso si calcolino per ciascuna coppia di diagrammi giornalieri medi intrecciati le aree comprese tra essi e al disopra del diagramma di consumo di vapore per forza motrice. Alle varie somme di tali aree corrisponderanno rispettivamente pesi di vapore di prelievo diretto, cui fanno riscontro uguali pesi che non trovano, subito utile impiego per riscaldamento. Questi ultimi, come si

è detto per il caso precedente, potranno però essere utilizzati in maggiore o minore misura sia per riscaldamento preventivo di bagni, sia inviandoli in appositi apparecchi accumulatori di vapore.

Le aree perciò, che corrispondono a vapore direttamente prelevato, potranno ridarsi ad essere minori di quelle ora considerate e praticamente sarà possibile con sufficiente approssimazione calcolarle. Riducendole a rappresentare vapore saturo e secco e portando i segmenti medi orari, che ad esse competono al disotto del diagramma annuale del consumo di vapore per riscaldamento, rispettivamente in corrispondenza dei tratti in cui si hanno diagrammi giornalieri intrecciati, si determinerà un terzo diagramma contrassegnato in figura con  $O A B C C^1 c_3 D_3 E F G G^1 l_3 m_3 H^1 H I L L_0$ . L'area interposta tra quest'ultimo diagramma e quello:  $O a_2 b_2 c_2 d_2 e_2 f_2 g_2 h_2 i_2 l_2 m_2 n_2 o_2 L_0$  relativo al consumo di vapore per riscaldamento darà evidentemente il peso di vapore, ridotto allo stato saturo e secco, che dovrà, inevitabilmente sfuggire nell'atmosfera all'uscita dalla motrice.

È chiaro che ambedue i sottocasi ora considerati non si prestano per il ricupero totale, quindi saranno inutili in generale ulteriori calcolazioni a meno che i diagrammi annuali di consumo di vapore per riscaldamento e per forza motrice siano molto vicini tra loro e quindi piccola risulti l'area tra essi compresa. In tal caso per il costo del combustibile potrà procedersi in modo del tutto analogo a quello spiegato nel caso precedente.

**3° Caso.** *I due diagrammi annuali s'intrecciano, cioè ora rimane superiore l'uno ora l'altro.*

È questo il caso più generale ed evidentemente una combinazione dei due casi precedenti. Valgono quindi per esso le considerazioni già fatte per questi due ultimi. Adottando sempre le stesse notazioni è stato indicato nella fig. 8 con  $O A B C D E F G H I L M N h_0$  il diagramma di consumo di vapore per riscaldamento, con  $O a_1 b_1 c_1 d_1 e_1 f_1 g_1 h_1 h_0$  quello di consumo di vapore per forza motrice e infine con  $O a_2 b_2 c_2 d_2 e_2 f_2 g_2 h_2 h_0$  il diagramma, che rappresenta il peso totale di vapore all'uscita della motrice, ridotto allo stato saturo e secco.

Supponendo l'esistenza di coppie, costituite da diagrammi giornalieri di consumo di vapore intrecciati, ad esempio in corrispondenza degli intervalli  $O B_0, E_0 c_0, g_0 M_0, M_0 h_0$  traccieremo nel modo già spiegato i segmenti  $a_3 B_3, E_3 b_3, g_3 L_3, M_3 h_3$ , che limitano inferiormente aree corrispondenti a pesi di vapore inutilizzati all'uscita della motrice.

È facile allora vedere che le aree aventi come limite superiore le linee del diagramma di consumo di vapore per riscaldamento e tratteggiate in figura con rette discendenti verso sinistra, rappresentano pesi di vapore saturo e secco corrispondenti a quelli che debbono direttamente prelevarsi dalla

caldaia, le aree invece tratteggiate con rette discendenti verso destra, pesi di vapore allo stesso stato fisico, corrispondenti a quelli inutilizzati

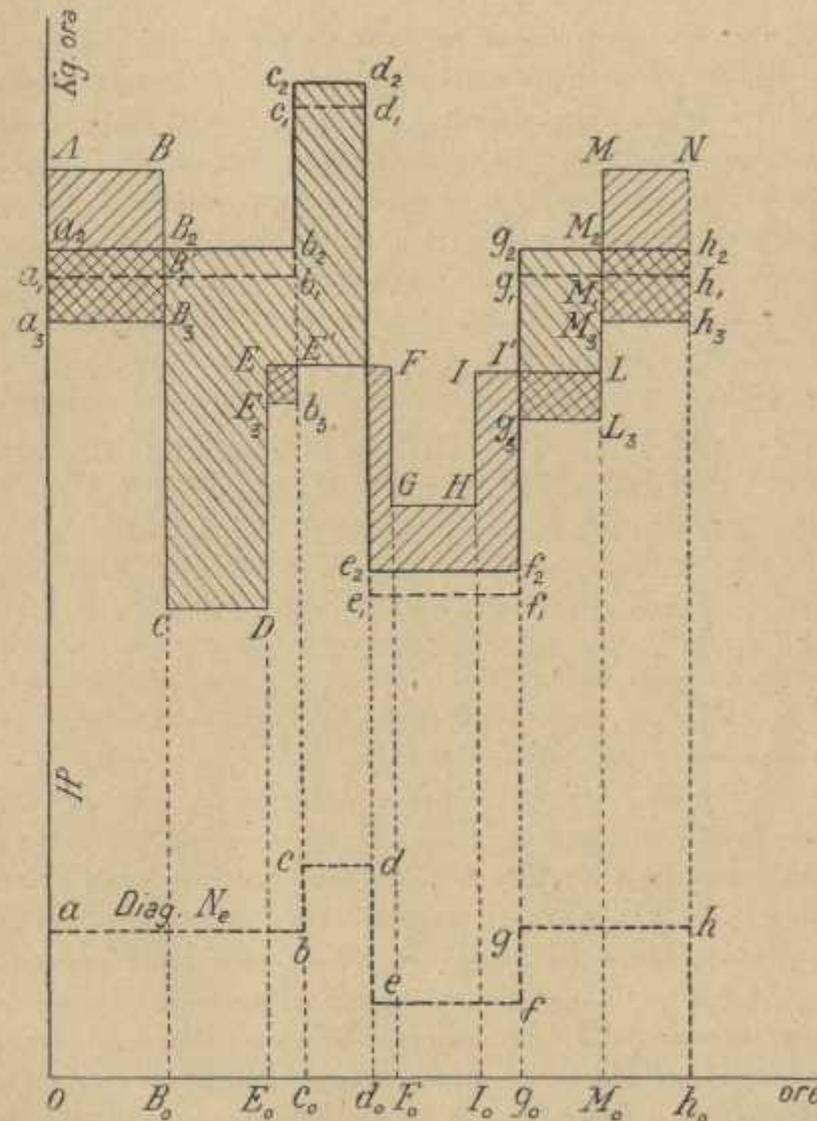


Fig. 8. — Diagrammi annuali di consumi di vapore — Il diagramma  $O a_1 b_1 c_1 d_1 e_1 f_1 g_1 h_1 h_0$  di consumo di vapore per forza motrice è intrecciato con quello  $O A B C D E F G H I L M N h_0$  di consumo di vapore per riscaldamento — Aree tratteggiate con linee discendenti verso sinistra  $\equiv$  pesi di vapore da prelevarsi direttamente; quelle con linee discendenti verso destra  $\equiv$  pesi di vapore non utilizzati per riscaldamento.

all'uscita dalla motrice. Tale spreco di vapore può evitarsi adottando il ricupero parziale, ma poichè tale sistema importa una spesa molto maggiore d'impianto e di esercizio è necessario, a meno di casi di per sè stessi evidenti

procedere anche qui per i necessari raffronti ad una esatta valutazione del costo del combustibile, valutazione che potrà essere ricercata nel modo precedentemente spiegato.

È pure ovvio che prima di ricorrere al ricupero parziale si dovranno tentare quelle soluzioni che tendono ad evitare in tutto o in parte lo spreco suddetto, così potrà riuscire conveniente la soluzione, cui abbiamo già accennato, consistente nell'utilizzare, quando ciò sia possibile, l'energia elettrica per superare le punte, o anche adottare una motrice a due cilindri a ricupero totale, i quali agiscano in alcuni intervalli alternativamente, in altri contemporaneamente, onde ottenere rendimenti buoni anche a carichi molto diversi.

### RICUPERO PARZIALE

Si consideri un intervallo di tempo, in cui la motrice si mantenga a regime, e siano:  $N_e$  il numero di HP-ora svolti dalla motrice;  $P_a$ ,  $P_b$  i pesi di vapore, rispettivamente agenti nei cilindri ad alta e bassa pressione;  $P_r$  il peso di vapore estratto dal ricettore;  $H'$ ,  $H''$  i due salti teorici di calore corrispondenti rispettivamente ai lavori disponibili dei due cilindri;  $\eta'$ ,  $\eta''$  i rendimenti totali degli stessi cilindri. Si avrà evidentemente:

$$P_a = P_b + P_r$$

$$635 N_e = \eta' (P_b + P_r) H' + \eta'' P_b H$$

da cui:

$$P_b = \frac{635 N_e - \eta' P_r H'}{\eta' H' + \eta'' H''}$$

la quale determinerà  $P_b$  quando siano stabiliti i valori di  $\eta'$ ,  $\eta''$ ,  $H'$ ,  $H''$ , ancora incogniti.

Il salto  $H'$ , essendo nota la pressione nel *receiver* è facilmente determinabile analiticamente, o più speditamente, col diagramma del Mollier, così pure il salto  $H''$ , quando si sia stabilita la pressione nel condensatore e ricercato, in base al valore del rendimento indicato del cilindro ad alta pressione e nel modo già precedentemente spiegato, il punto corrispondente, nel detto diagramma, allo stato fisico del vapore all'uscita dal cilindro stesso.

Maggiore difficoltà s'incontrerebbe nella ricerca dei valori  $\eta'$ ,  $\eta''$ , che rappresentando rendimenti totali andrebbero calcolati tenendo anche separatamente conto delle resistenze passive attribuibili all'uno e all'altro cilindro, ripartizione questa, che per essere razionale dovrebbe essere fatta tenendo calcolo della potenza sviluppata da ciascun cilindro e quindi variabile a seconda dei carichi del motore. Potremo più semplicemente attribuire tutto il lavoro delle resistenze passive al

cilindro ad alta pressione, e ritenere così il lavoro indicato svolto da quello a bassa pressione tutto utilizzato sull'albero motore.

Tale ipotesi evidentemente non ha alcun effetto sul risultato del calcolo di  $P_b$ , infatti chiamando  $\eta'_1$  il nuovo rendimento totale del primo cilindro, così inteso, e  $\eta'_2$ , quello indicato del cilindro a bassa pressione, si avrà sempre:

$$635 N_e = \eta'_1 (P_b + P_r) H' + \eta'_2 P_b H''$$

e quindi:

$$P_b = \frac{635 N_e - \eta'_1 P_r H'}{\eta'_1 H' + \eta'_2 H''} \quad (3)$$

I valori  $\eta'_1$  e  $\eta'_2$  sono ancora incogniti ma più facilmente apprezzabili con buona approssimazione, in base ai calcoli già fatti per lo studio del ricupero totale e alle previsioni che dall'esame delle aree soprastanti al diagramma di vapore per riscaldamento si possono fare sulle dimensioni del cilindro a bassa pressione e del condensatore.

Naturalmente però, non essendo le dette dimensioni ancora definitivamente fissate, il problema non può essere risolto che per approssimazioni successive, come ora meglio vedremo.

Ecco come praticamente si può procedere per lo studio del ricupero parziale.

Consideriamo il caso più generale, cioè quello in cui i diagrammi annuali di consumo di vapore siano intrecciati, e ricorriamo perciò nuovamente alla fig. 8, che riportiamo, nella parte che interessa per lo studio del ricupero parziale, nella fig. 9.

Si prendano dapprima in esame quei tratti orizzontali del diagramma di consumo di vapore per riscaldamento posti al disotto dei corrispondenti tratti del diagramma di consumo di vapore per forza motrice, e si suddividano in altri, come  $CD$ ,  $EE'$ ,  $E'F'$ , ecc., lungo i quali la corrispondente forza motrice media giornaliera rimanga costante.

Le aree sottostanti a questi ultimi, facendo per ora solo eccezione di quelli, i cui corrispondenti diagrammi giornalieri sono intrecciati (tratti  $E E'$ ,  $I' L$ ) rappresenteranno pesi di vapore, ridotti allo stato saturo e secco, che in un determinato intervallo di tempo debbono essere estratti dal ricettore.

In base al rendimento indicato del cilindro ad alta pressione sarà allora possibile sostituire i tratti stessi con altri, tracciati con linea più marcata in figura, le cui aree sottostanti rappresentino i suddetti pesi di vapore allo stato fisico reale, e quindi calcolare, mediante la (3), i corrispondenti pesi  $P_b$  di vapore.

Pei tratti come  $E E'$ ,  $I' L$ , corrispondenti a diagrammi giornalieri intrecciati

basterà evidentemente considerare anzichè i tratti stessi quelli sottostanti  $E_3 b_3$ ,  $g_3 L_3$ , già precedentemente determinati. Conosciuti così i vari pesi  $P_b$  potremo

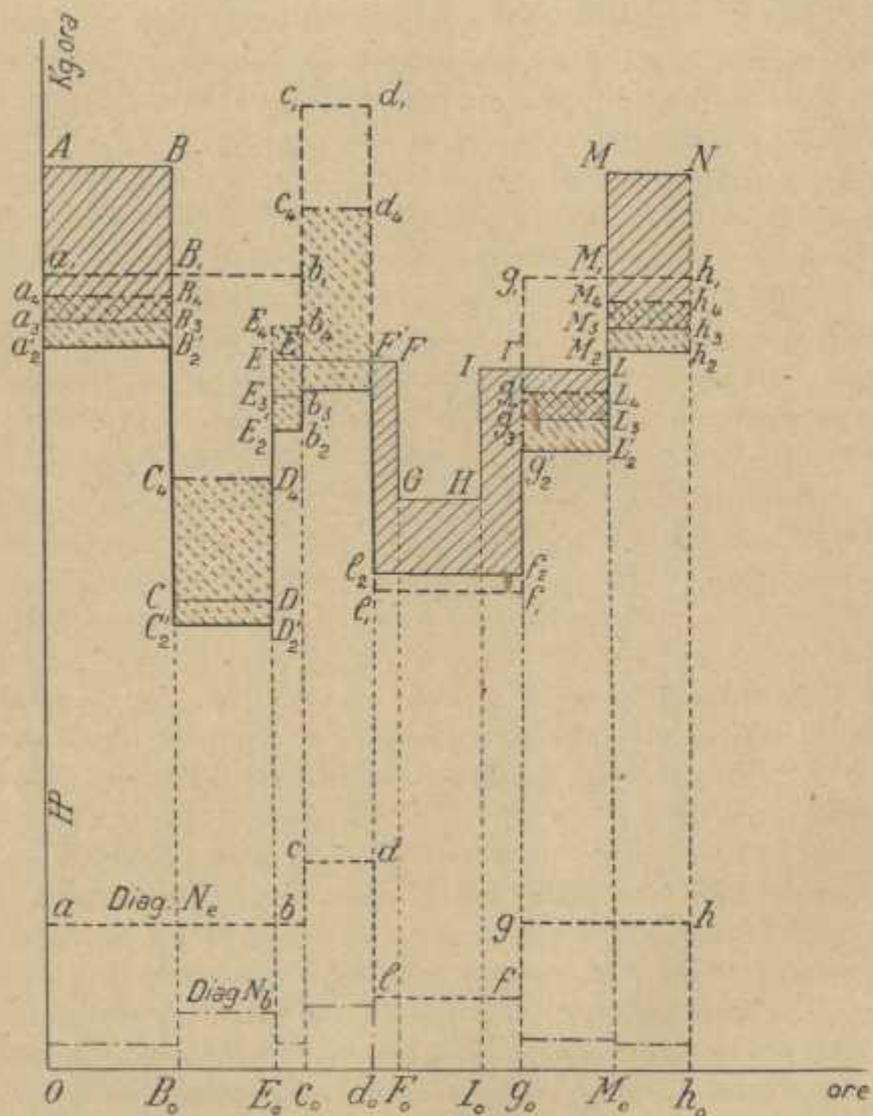


Fig. 9. — Diagrammi annuali di consumi di vapore e di forza motrice nel caso del ricupero parziale — Aree tratteggiate con linee continue  $\equiv$  pesi di vapore (saturo e secco) da prelevarsi direttamente — Aree tratteggiate con linee discontinue  $\equiv$  pesi di vapore che agiscono nella motrice e vanno al condensatore.

tracciare un nuovo diagramma, che chiameremo diagramma  $P_b$  le cui aree parziali rappresentino tali pesi  $P_b$ .

Il diagramma  $P_b$ , in figura tratteggiato con linee discontinue e portato per comodità al disopra di quello, che rappresenta il peso di vapore estratto dal ricettore,

darà il modo di stabilire, in base ai rendimenti fissati, il numero dei cavalli indicati svolti dal cilindro a bassa pressione nei vari intervalli di tempo. Ci sarà quindi possibile tracciare il diagramma del lavoro indicato del cilindro a bassa pressione, diagramma che indicheremo con  $N_b$  (disegnato pure con linea a punto e tratto in figura) e che starà al disotto del diagramma totale  $N_e$  della forza motrice, rappresentato in figura con  $Oabcdeffghh_0$ .

Rimangono ancora a considerare i tratti come  $a_1 B_1$ ,  $e_1 f_1$ ,  $M_1 h_1$  del diagramma di vapore per forza motrice. Tali tratti potranno a loro volta dividersi in due gruppi a seconda che ad essi corrispondono diagrammi giornalieri intrecciati o meno. In corrispondenza del primo gruppo (tratti  $a_1 B_1$ ,  $M_1 h_1$ ) in alcune ore del giorno la motrice dovrebbe agire a ricupero parziale, però converrà, quando lo spreco di vapore non sia di molta entità, inviare vapore nel solo cilindro ad alta pressione, utilizzando più che sia possibile il vapore di scappamento della motrice. Nel caso, come è stato supposto nella figura per i detti tratti  $a_1 B_1$ ,  $M_1 h_1$ , che convenga alimentare anche il cilindro a bassa pressione dovrà il diagramma  $N_b$  estendersi evidentemente anche per questi tratti.

Per i tratti invece del secondo gruppo corrisponde evidentemente il funzionamento del solo cilindro ad alta. Tanto questi ultimi che i primi considerati dovranno in ogni caso subire uno spostamento rispetto a quelli già considerati nello studio del ricupero totale per tener conto del rendimento meccanico del motore (ora notevolmente diminuito a causa della presenza del secondo cilindro e del condensatore) nonchè del nuovo rendimento indicato del cilindro ad alta, che potrà pure essere variato se le dimensioni del cilindro stesso risultassero differenti da quelle del cilindro unico del motore a ricupero totale (1).

Le aree comprese tra il diagramma  $N_e$  e quello  $N_b$  rappresenteranno lavori svolti dal cilindro ad alta pressione ed utilizzati sull'albero motore.

Procedendo allora in modo del tutto analogo a quello già spiegato nel caso del ricupero totale, servendoci dei detti diagrammi, potremo stabilire le dimensioni più convenienti dei cilindri ad alta e a bassa pressione e quindi, in base alle dimensioni stesse e al calcolo del condensatore, il rendimento meccanico di tutto il motore ai vari carichi.

I valori trovati ci permetteranno di tracciare il diagramma  $P_b$  con maggiore approssimazione di prima. Se questo secondo tracciamento risultasse notevolmente differente dal primo dovrà nello stesso modo procedersi ad un terzo

(1) Se il motore in tutte le ore del giorno agisse a ricupero totale e i vari tratti presi ora in esame fossero sufficientemente lunghi, converrebbe naturalmente in corrispondenza dei tratti stessi, per aumentare il rendimento meccanico del motore, rendere indipendente il primo cilindro dal secondo e dal condensatore.

tracciamento e così via fino a che la differenza tra due tracciamenti consecutivi sia sufficientemente piccola. Praticamente però, specialmente se l'operatore ha occhio sperimentato, uno o due tentativi saranno di norma sufficienti. Abbiamo così evidentemente nel diagramma complessivo separate le seguenti aree che c'interessano:

1° - Le aree, tratteggiate con linee continue, corrispondenti al peso di vapore prelevato direttamente dalla caldaia ed utilizzato a scopo di riscaldamento.

2° - Le aree del diagramma  $P_b$ , tratteggiate con linee discontinue, corrispondenti al peso di vapore entrato nel cilindro a bassa pressione e quindi completamente utilizzato nella motrice.

3° - L'area del diagramma  $Oa_4 B_4 C_4 D_4 E_4 b_4 c_4 d_4 e_4 f_4 g_4 L_4 M_4 h_4 h_0$  che rappresenta tutto il peso di vapore agente nel cilindro ad alta pressione della motrice.

Le suddette aree sono quelle appunto che occorrono per procedere, nel modo già spiegato, alla determinazione del costo del combustibile per riscaldamento e forza motrice.

### ESEMPIO NUMERICO

Si debba trasformare un impianto di riscaldamento già esistente in altro a ricupero di vapore, disponendo di vapore surriscaldato alla pressione assoluta di  $12 \text{ kg/cm}^2$  e alla temperatura di  $275^\circ$ , ed occorrendo la pressione assoluta di  $2 \frac{1}{2} \text{ kg/cm}^2$  per il vapore di riscaldamento.

In base alle coppie di diagrammi giornalieri risulti quella della fig. 10 la coppia di diagrammi annuali, rispettivamente relativi al vapore per riscaldamento (diagramma  $o A B C D E F G H I L p_0$ ) e alla forza motrice effettiva (diagramma  $o a b c d e f g h i l m n o p p_0$ ). La retta di compenso di quest'ultimo diagramma dà quale potenza media dell'intera annata 118 HP effettivi; dal primo diagramma risulta invece di 1690 kg il consumo medio orario di vapore.

La motrice, che supporremo a stantuffo (è facile vedere che la turbina a contropressione, consumando un maggior peso di vapore, a parità di potenza ottenuta e delle altre condizioni del problema, mal si presterebbe per il nostro caso) abbia tali dimensioni che alla potenza di 118 HP presenti il rendimento totale massimo, che fisseremo di:

$$0,80 \times 0,83 = 0,664$$

dove 0,80 rappresenta il rendimento indicato e 0,83 il rendimento meccanico (1).

Considerando l'espansione adiabatica del vapore che s'inizia allo stato fisico corrispondente alla temperatura di  $275^\circ$  e alla pressione di  $12 \text{ kg/cm}^2$  e termina alla pressione di  $2 \frac{1}{2} \text{ kg/cm}^2$ , risulta la differenza tra i calori totali estremi

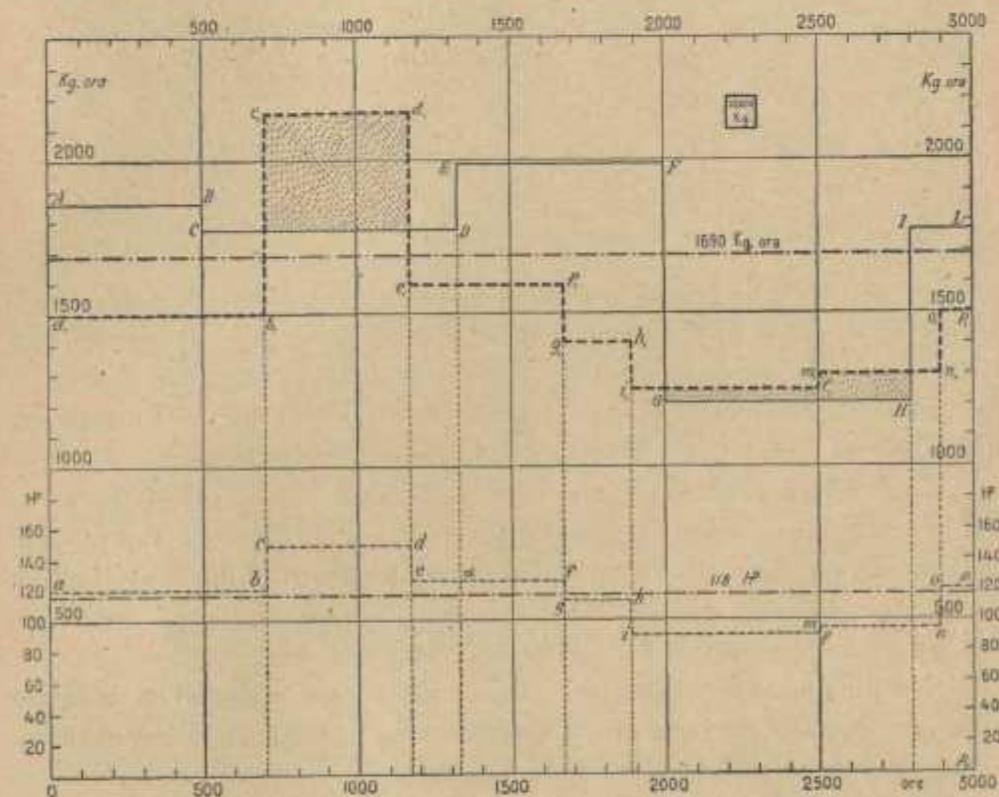


Fig. 10. — Studio d'impianto a ricupero — Prima trasformazione del diagramma di consumo di lavoro motore nel corrispondente diagramma di consumo di vapore — Area tratteggiata == peso approssimativo di vapore, che non trova immediata utilizzazione.

equivalente a 76,5 calorie, quindi il consumo minimo di vapore agente nella motrice per ogni HP effettivo è dato da:

$$\frac{635}{76,5 \times 0,80 \times 0,83} = \text{kg } 12,5$$

I fattori per cui deve essere moltiplicato tale consumo per avere quello presumibile in corrispondenza di ogni striscia verticale del diagramma di forza

(1) Il rendimento indicato può nel presente caso essere praticamente superiore a 0,80; in calcoli di questa natura conviene però per prudenza attenersi sempre ai limiti inferiori.

motrice, fattori supposti determinati facendo uso della fig. 4 e tenendo conto della forma dei vari diagrammi giornalieri, sono stati fissati come segue:

	Fattore	Consumo probabile per HP
Striscia <i>ab</i>	1,0	12,5
» <i>ed</i>	1,15	14,4
» <i>ef</i>	1,015	12,7
» <i>gh</i>	1,0	12,5
» <i>il</i>	1,115	13,95
» <i>mn</i>	1,11	13,9
» <i>op</i>	1,0	12,5

In base ai detti consumi parziali si è tracciato il diagramma  $o a_1 b_1 c_1 d_1 e_1 f_1 g_1 h_1 i_1 l_1 m_1 n_1 o_1 p_1 p_0$  di consumo annuale di vapore per forza motrice. Dal paragone di tale diagramma con quello annuale di riscaldamento si ricava che dall'ordinata 700 a quella 1170 e dall'ordinata 2000 a quella 2800 il consumo di vapore per forza motrice è maggiore di quello per riscaldamento.

Risulterebbe quindi, adottando il ricupero totale, uno spreco di vapore, in via di prima approssimazione, cioè astraendo dallo stato fisico del vapore all'uscita della motrice e dalla forma dei diagrammi giornalieri, equivalente a circa :

$$182.400 + 51.000 = \text{kg } 239.400.$$

Non per questo dobbiamo però subito scartare la soluzione di un impianto a ricupero totale, chè anzi un esame anche superficiale del diagramma fa subito rilevare la possibilità di un annullamento o almeno di una riduzione molto grande di tale spreco di vapore. Se infatti invece della motrice progettata ne consideriamo un'altra, avente il minimo consumo di vapore in corrispondenza dei tratti *il*, *mn*, cioè quando sviluppa circa 90 HP effettivi, si vede subito che, trasformando per i tratti stessi (fig. 11) il diagramma di forza motrice in quello di consumo di vapore otterremo i nuovi tratti  $i_1 l_1$  e  $m_1 n_1$  che, contrariamente al risultato precedente, rimangono al disotto del diagramma relativo al riscaldamento. Per tali tratti non è poi il caso di tener conto dello stato fisico del vapore all'uscita della motrice perchè, avendo supposto minimo il consumo di vapore e quindi il rendimento indicato di 0,80, risulta dal diagramma del Mollier che il vapore di scarico è leggermente surriscaldato e può perciò ritenersi con errore poco sensibile saturo e secco.

Il risultato ottenuto non autorizza però a ritenere che, negli intervalli considerati, non vi sia spreco di vapore nell'atmosfera, ciò accadendo, come

sappiamo, solamente quando tutte le coppie dei diagrammi giornalieri, rispettivamente di consumo di vapore per forza motrice e per riscaldamento, non siano intrecciate.

Rappresenti la fig. 12 una di tali coppie in corrispondenza del tratto *il* della fig. 11. In essa si è messo in evidenza il fatto che generalmente si nota

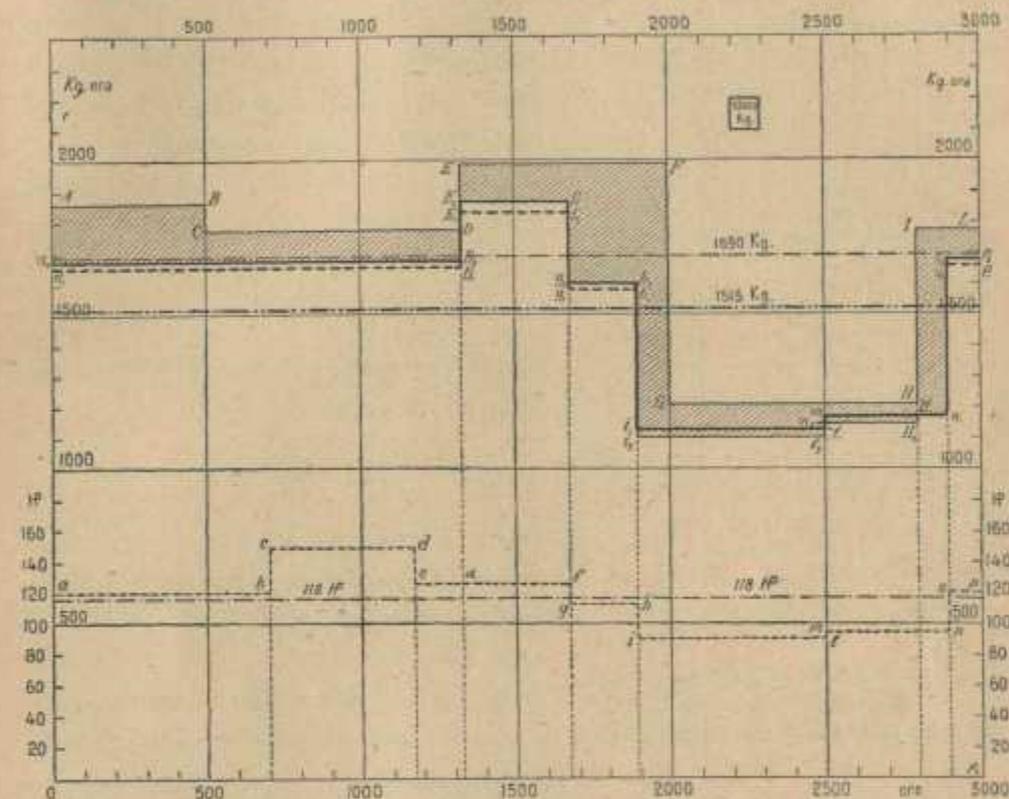


Fig. 11. — Studio d'impianto a ricupero — Soluzione I — Motrice di 90 HP e motrice elettrica svolgente nell'intera annata di lavoro circa 15400 HP-ora — Area tratteggiata == peso di vapore (saturo e secco) prelevato direttamente dalle caldaie.

nei diagrammi reali, cioè che poco dopo iniziato il lavoro nella fabbrica il consumo di vapore per riscaldamento è molto superiore al normale, e ciò dura per il breve periodo corrispondente al riscaldamento preventivo dei vari apparecchi utilizzatori del vapore; si nota altresì che mentre il consumo di vapore per forza motrice rimane pressochè costante per più o meno lunghi intervalli di tempo, quello per riscaldamento è molto oscillante in relazione alla apertura e alla chiusura delle prese di vapore alle singole macchine. Risulta perciò del tutto evidente che la serie delle coppie di diagrammi giornalieri relativa ai periodi *il*, *mn* considerati non si succederanno praticamente in modo del tutto identico o molto simile, tuttavia l'esame globale di quelle più caratteristiche darà una esatta idea

dell'andamento dei consumi e quindi dell'entità delle aree comprese tra i detti diagrammi e poste al disotto del diagramma di consumo di vapore per forza motrice. Nella fig. 12 è stata determinata la più grande di tale aree, quella tratteggiata, che risulta equivalente a circa 60 kg di vapore ed è stata presa di base per il calcolo di un accumulatore di calore ad umido.

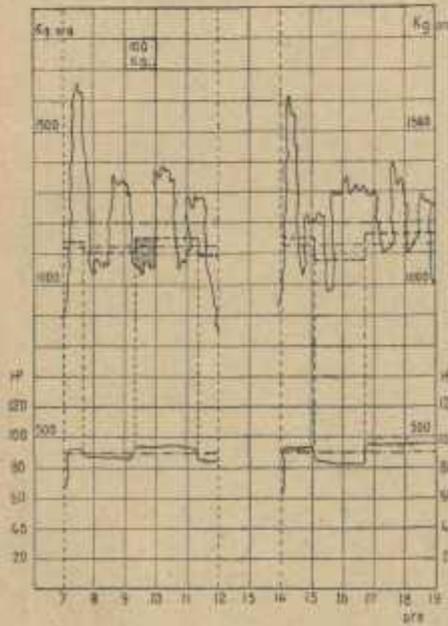


Fig. 12. — Studio d'impianto a ricupero — Diagrammi giornalieri in corrispondenza del tratto *il* del diagramma annuale (fig. 11).

Si dovrà allora considerare una perdita di vapore nell'atmosfera in corrispondenza delle aree che rappresentano un numero maggiore di 24 kg di vapore. La somma dei kg perduti nell'intera giornata di lavoro divisa per il numero delle ore ci darà una perdita media oraria che si suppone valutata di 25 kg, sia in corrispondenza del tratto  $i_1l_1$  che di quello  $m_1H_1$  del diagramma annuale (fig. 11). Il segmento che rappresenta tale perdita lo porteremo normalmente al disotto dei tratti stessi, e saranno così definiti i nuovi tratti  $i_3l_3$  e  $m_3H_3$

Si potranno ora studiare tre possibili soluzioni del problema, cioè :

1° - Costruzione di una motrice ad un solo cilindro, avente il massimo rendimento totale alla potenza di circa 90 HP effettivi.

In determinati intervalli di tempo la motrice dovrà funzionare ad una potenza minore di quella che occorre allo stabilimento e precisamente alla potenza

Supponendo che sia permessa la variazione di 2/10 di kg nella pressione di tale apparecchio, risulta di 2°,5 la variazione di temperatura corrispondente.

La quantità di calore che i 60 kg di vapore cederanno all'accumulatore è rappresentata approssimativamente da :

$$\Delta Q = 521 \times 60 = \div 31200 \text{ calorie}$$

quindi l'accumulatore dovrebbe contenere un peso di acqua dato da :

$$M = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{31.200}{2,5} = 12.500 \text{ litri.}$$

Un tale apparecchio sarebbe evidentemente troppo costoso ed esigerebbe delle dimensioni troppo grandi, ci accontenteremo perciò di progettarne uno che elimini gli effetti di aree più piccole di quella considerata, ad esempio che contenga solo 5m<sup>3</sup> di acqua.

corrispondente alla utilizzazione completa del vapore di scarico. Il supplemento di lavoro motore necessario dovrà essere fornito mediante un motore indipendente, che supporremo elettrico.

2° - Costruzione di una motrice a due cilindri a ricupero totale, uno dei quali in determinate epoche dell'anno rimanga inattivo. Si potranno così ottenere rendimenti massimi nei tratti del diagramma ove vi è pericolo di perdite di vapore nell'atmosfera, rendendo così minime le perdite stesse ed evitando l'installazione di un condensatore.

3° - Costruzione di una motrice a cilindri paralleli e a ricupero parziale. In determinati periodi dell'anno funzionerà il solo cilindro ad alta restando completamente inattivi il cilindro a bassa e il condensatore.

In tutti tre i casi si ammettono le perdite per le tubazioni uguali a quelle già computate nel tracciamento del consumo di vapore per riscaldamento.

Prima di valutare il costo del combustibile nei tre casi, determiniamo quello che compete al vapore di riscaldamento nella supposizione che non esista motrice a ricupero.

Integrando il diagramma annuale di vapore per riscaldamento risulta l'ordinata media equivalente al peso di vapore di 1690 kg all'ora.

Il fabbisogno annuale di vapore sarà perciò:

$$1690 \times 3000 = \text{kg } 5.070.000$$

Per la produzione di un kg di vapore saturo e secco e alla pressione assoluta di 2' 2 kg/cm<sup>2</sup>, supponendo l'acqua di alimentazione a 10°, occorrono :

$$650 - 10 = 640 \text{ calorie}$$

quindi supponendo 0,75. il rendimento del generatore e 100 lire il costo della tonnellata di combustibile, il diagramma della fig. 6 ci darà subito in lire 11,35 il costo del combustibile relativo a 1000 kg di vapore.

Il costo totale annuale del combustibile sarà perciò:

$$5070 \times 11,35 = \text{L. } 57.500.$$

Veniamo ora al costo del combustibile totale (forza motrice e riscaldamento) in ciascuna delle tre soluzioni prospettate.

**1<sup>a</sup> Soluzione.** (fig. 11). Il massimo peso orario di vapore che la motrice può elaborare in corrispondenza del tratto *c d*, senza che vi sia pericolo di perdita di vapore nell'atmosfera, è stato fissato di 1650 kg. Se 1.10 è il

coefficiente di maggior consumo di vapore lungo il tratto stesso, la potenza sviluppata risulterà di:

$$\frac{1650}{12,5 \times 1,1} = 120 \text{ HP}$$

anzichè di 150.

Converrà pure ridurre a 120 HP la potenza sviluppata dalla motrice in corrispondenza di una parte del tratto *ef*, precisamente lungo il tratto  $e\alpha$  (1).

Dovranno quindi essere forniti elettricamente per un periodo di 480 ore 30 HP e per un periodo di 170 ore 6 HP, in totale circa 15400 HP-ora.

Prima di procedere nel nostro calcolo dovremo ora accertarsi che la motrice sia capace di sviluppare la potenza massima occorrente. Tale potenza nel diagramma annuale si riscontra lungo il tratto  $\alpha f$  ed è di 126 HP. Questo valore però rappresenta la media dei valori effettivi assunti durante una giornata, quindi può accadere, entro intervalli di tempo più o meno lunghi, che la motrice sia chiamata a sviluppare un maggior numero di cavalli. Si è per tale ragione supposta di 150 HP la potenza massima necessaria.

Si progetti una motrice a valvole con il grado d'introduzione massimo uguale a 0,65. Il coefficiente dello spazio nocivo sia 0,04, il grado di scarico *e*, 0,95. Il massimo rendimento totale della motrice si supponga si abbia (ed è questo il caso più probabile) quando la pressione finale dell'espansione superi di 0,4 kg/cm<sup>2</sup> quella dello scarico.

Risulta allora, indicando con *E* il grado d'introduzione e ritenendo costante ed uguale a 11,4 kg/cm<sup>2</sup> la pressione di ammissione:

$$E = \frac{2,9}{11,4} (1 + 0,04) - 0,04 = 0,225$$

e quindi la pressione media teorica, supponendo sufficientemente approssimata la legge di espansione:  $p_v = \text{cost.}$

$$P_m = \left\{ 0,225 + 0,265 \times 2,303 \log_{10} \frac{1,04}{0,265} \right\} 11,4 - \left\{ 0,95 + 0,09 \times 2,303 \log_{10} \frac{0,19}{0,04} \right\} 2,5 = \text{kg./cm}^2 4,15$$

(1) Essendo molto piccolo lo spreco di vapore nell'atmosfera lungo i tratti *il*, *e*, *nin* e presumibilmente quello effettivo ancora minore di quello preventivato, per la prudenza che sempre deve accompagnare un tal genere di calcoli, si è supposto non conveniente azionare nei tratti stessi la motrice elettrica, però anche tale eventualità dovrà essere oggetto di esame quando si voglia ad esempio ridurre il volume dell'accumulatore progettato o sostituirlo con accumulatore a secco, e quando l'energia elettrica potrà ottenersi a favorevoli condizioni. Solo l'esperienza ad impianto eseguito può però generalmente consigliare sulla entità precisa della forza motrice totale che converrà produrre e su quella che converrà acquistare.

Quando la motrice funziona a carico massimo, essendo  $E = 0,65$ , la pressione media diventa:

$$P_m = \left\{ 0,65 + 0,69 \times 2,303 \log_{10} \frac{1,04}{0,69} \right\} 11,4 - \left\{ 0,95 + 0,09 - 2,303 \log_{10} \frac{0,09}{0,04} \right\} 2,5 = \text{kg./cm}^2 8,09.$$

Supponendo in ambedue i casi uguale il coefficiente di riduzione della pressione media, la motrice a carico massimo potrà sviluppare:

$$90 \times \frac{8,09}{4,15} = 175 \text{ HP}$$

cioè un numero di cavalli maggiore di quello stabilito.

Procediamo ora alla correzione dei coefficienti prima stabiliti per la ricerca del consumo di vapore alle varie andature del motore, avendo presente che la potenza di minor consumo è ora di 90 HP anzichè di 118 HP.

I nuovi coefficienti e quindi i consumi di vapore per HP-ora sono stati fissati come segue:

Fattore Consumo probabile per HP

Striscia <i>ab</i>	1,1	13,7
• <i>cd</i> (120 HP)	1,1	13,7
• <i>eα</i> (120 HP)	1,1	13,7
• $\alpha f$ (126 HP)	1,15	14,4
• <i>gh</i>	1,09	13,6
• <i>il</i>	1,0	12,5
<i>mn</i>	1,0	12,5
<i>op</i>	1,1	13,7

In base ai detti consumi è stato tracciato con linea tratteggiata il nuovo diagramma di consumo di vapore per forza motrice e da quest'ultimo diagramma si è ricavato quello, disegnato con linea continua e più marcata, che rappresenta il peso di vapore all'uscita della motrice, ridotto allo stato saturo e secco. A tale scopo sono stati fissati, servendosi della fig. 4, per ogni striscia i presumibili rendimenti indicati e determinati, con l'aiuto del diagramma del Mollier, i rapporti  $\frac{\lambda'_2}{\lambda_2}$ . I risultati sono stati consegnati nella seguente tabella:

	Rendimento indicato	$\frac{\lambda'_2}{\lambda_2}$
Striscia <i>ab</i>	0,73	$\frac{660}{650}$
» <i>cd</i>	0,73	$\frac{660}{650}$
» <i>ex</i>	0,73	$\frac{660}{650}$
» <i>xf</i>	0,705	$\frac{662}{650}$
» <i>gh</i>	0,735	$\frac{360,5}{650}$
» <i>il</i>	0,80	$\frac{653}{650} = \div 1$
» <i>mn</i>	0,80	$\frac{653}{650} = \div 1$
» <i>op</i>	0,73	$\frac{660}{650}$

Integrando il diagramma di consumo di vapore per forza motrice  $o a_1 D_1 E_1 f_1 g_1 h_1 i_1 l_1 m_1 n_1 o_1 p_1 p_0$  si ha come ordinata media 1500 kg, cui corrisponde il consumo di vapore annuale:

$$1500 \times 3000 = \text{kg } 4.500.000.$$

L'area tratteggiata in figura corrisponde al vapore prelevato direttamente dalle caldaie. Poichè dall'integrazione del diagramma  $o a_2 D_2 E_2 f_2 g_2 h_2 i_2 l_2 m_2 n_2 o_2 p_2 p_0$ , si ha come ordinata media 1515, la suddetta area risulta equivalente a:

$$(1690 - 1515) 3000 = \text{kg } 525.000.$$

Supponendo il vapore in caldaia prodotto alla pressione di  $12 \frac{1}{2} \text{ cm}^2$  e alla temperatura di  $300^\circ$  le calorie di produzione saranno, ricordando che  $10^\circ$  è la temperatura dell'acqua di alimentazione:

$$729 - 10 = 719 \text{ calorie}$$

quindi, assumendo gli altri dati uguali a quelli precedenti, si ricava subito dalla figura 6 che il costo del combustibile relativo a 1000 kg di vapore è di lire 13. Poichè quello di ugual peso di vapore allo stato saturo e secco e alla pressione di  $2 \frac{1}{2} \text{ kg/cm}^2$  è, come abbiamo trovato, di lire 11,35 il costo totale del combustibile risulterà:

$$4500 \times 13 + 525 \times 11,35 = \div \text{L. } 64.400$$

e quindi per la sola forza motrice a vapore occorreranno:

$$64400 - 57500 = \text{L. } 6900$$

pari a:

$$\frac{6900}{118 \times 3000 - 15400} = \text{L. } 0,0204 \text{ per HP-ora.}$$

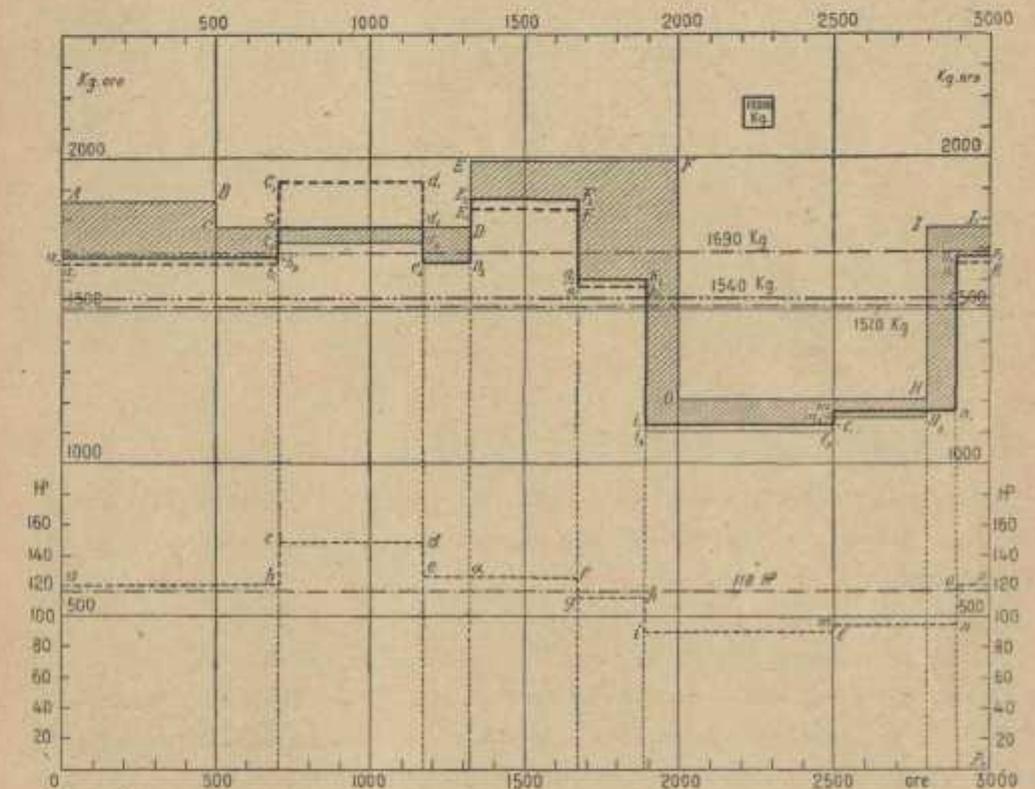


Fig. 13. — Studio d'impianto a ricupero — Soluzione II — Motrice composta di due cilindri, aventi rendimento massimo rispettivamente alle potenze di 90 HP e di 60 HP — Area tratteggiata == peso di vapore di prelievo diretto.

**2° Soluzione.** È evidente che in tal caso converrà, nei periodi in cui non vi è pericolo di disperdimento di vapore nell'atmosfera, tenere in azione un solo cilindro affinché il rendimento meccanico del motore, che soltanto ha importanza nei detti periodi, sia il più alto possibile.

La trasformazione del diagramma rispetto quello precedente è perciò limitata ai soli tratti *cd*, *ex* (fig. 13).

Appare subito dalla figura che il nuovo cilindro dovrà calcolarsi in modo che si abbia il minimo consumo di vapore in corrispondenza del tratto *cd*, cioè quando esso deve produrre  $150 - 90 = 60 \text{ HP eff.}$

Ritenendo ancora 0,80 il rendimento indicato complessivo della motrice e 0,81

quello meccanico (inferiore del precedente per la presenza del secondo cilindro, svolgente una potenza minore) il consumo minimo di vapore risulterà (tratto  $e d$ )

$$\frac{635}{76,5 \times 0,80 \times 0,81} = 12,8.$$

Poichè nel tratto  $e \dots$  il secondo cilindro deve svolgere 36 HP si è ritenuto 0,73 il rendimento indicato che ad esso compete e quindi 0,78 quello complessivo della motrice. Il consumo di vapore per HP-ora risulta perciò:

$$\frac{635}{76,5 \times 0,78 \times 0,81} = \text{kg } 13,2.$$

Abbiamo così tutti gli elementi per la determinazione del diagramma di consumo di vapore per forza motrice, diagramma che nella figura è stato disegnato con linea tratteggiata. L'ordinata media ad esso corrispondente risulta di 1540 kg quindi il detto consumo sarà:

$$1540 \times 3000 = \text{kg } 4.620.000.$$

Non si è, in corrispondenza dei tratti considerati, ritenuto necessario di tener calcolo delle variazioni dovute allo stato fisico del vapore all'uscita della motrice, poichè tale vapore, essendo leggermente surriscaldato, può ritenersi saturo e secco.

Supponendo invece che in corrispondenza del tratto  $c d$  le coppie di diagrammi giornalieri risultino intrecciate e si abbia per tal ragione un maggior consumo di vapore prelevato direttamente dalle caldaie equivalente alla media di 50 kg ogni ora, abbiamo tracciato la linea  $c_3 d_3$  alla distanza corrispondente a 50 kg dalla  $CD$ , onde risulta l'area tratteggiata in figura quella che rappresenta il consumo di vapore prelevato direttamente dalle caldaie.

I due diagrammi  $o ABCDEFGHILp_o$  e  $o a, b_2 c_3 d_3 e_2 D_2 E_2 F_2 g_2 h_2 i_3 l_3 m_3 H_3 n_1 o_2 p_2 p_o$  tra i quali essa è compresa hanno rispettivamente per ordinata media 1690 kg e 1510 kg, quindi il suddetto consumo sarà di:

$$(1690 - 1510) 3000 = \text{kg } 540.000.$$

Il costo totale del combustibile risulterà perciò:

$$4620 \times 13 + 540 \times 11,35 = \text{L. } 66200$$

e quindi quello relativo alla sola forza motrice:

$$66200 - 57500 = \text{L. } 8700$$

pari a:

$$\frac{8700}{118 \times 3010} = \text{L. } 0,0246 \text{ per HP-ora.}$$

**3ª Soluzione**, (fig. 14) La nuova ricerca è anche qui limitata ai tratti  $ed$  e  $e^*$ . Cominciamo dal tratto  $ed$ . Ritenendo sia 0,70 il rendimento indicato del cilindro ad alta e 1000 kg/cm<sup>2</sup> la pressione nel condensatore, risulta dal diagramma del Mollier:

$$H' = \text{calorie } 76,5$$

$$H'' = \text{calorie } 119.$$

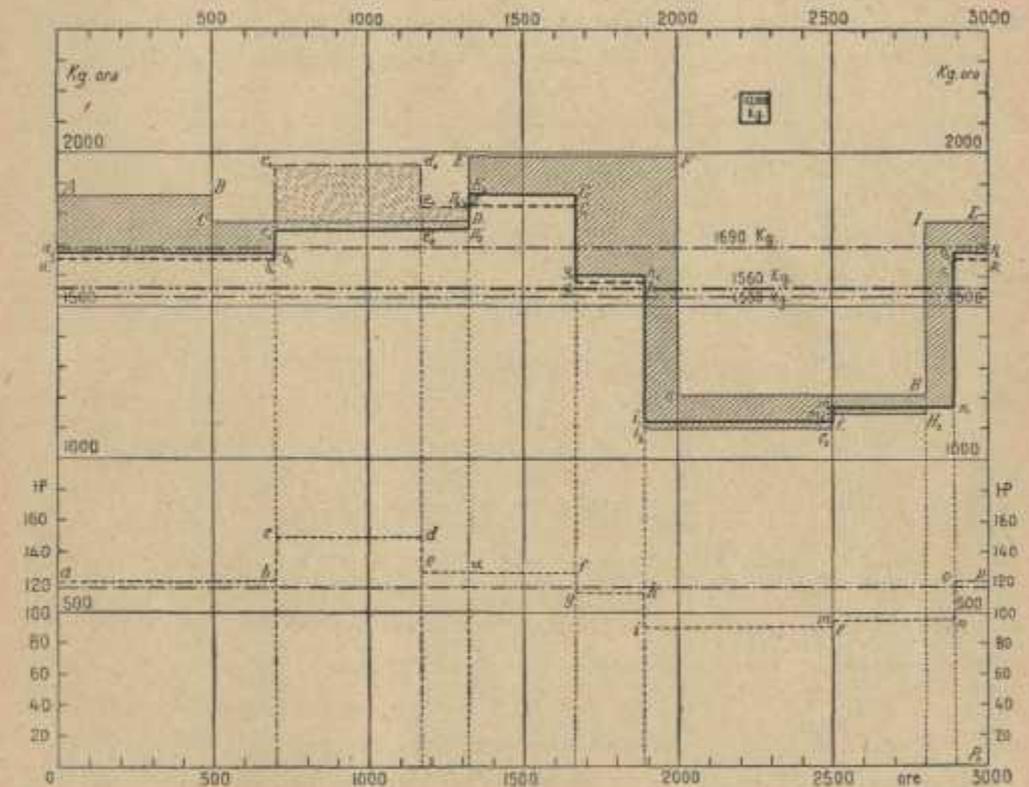


Fig. 14. — Studio d'impianto a ricupero — Soluzione III — Motrice a ricupero parziale — Aree tratteggiate con linee continue — pesi di vapore di prelevamento diretto — Aree tratteggiate con linee discontinue — peso di vapore che va al condensatore.

Si prenda:

$$\eta = 0,70 \times \eta' = 0,553$$

$$\eta'' = 0,50.$$

Il calore totale del vapore all'uscita del cilindro ad alta pressione risulta, in base al rendimento indicato assunto di 0,70 :

$$V_2 = \text{calorie } 663$$

essendo invece  $\lambda = 650$  il calore totale del kg di vapore allo stato fisico, cui si riferisce il diagramma del consumo di vapore per riscaldamento, sarà :

$$P_r = 1775 \frac{650}{660} = \text{kg } 1750$$

al quale peso corrisponde nel diagramma il segmento  $c'_2 d'_2$

Dalla (3) si ha allora:

$$P_b = \frac{635 \times 150 - 0,553 \times 1750 \times 76,5}{0,553 \times 76,5 + 0,50 \times 119} = \text{kg } 208$$

e poichè per ogni HP-ora indicato svolto nel cilindro a bassa pressione occorrono:

$$\frac{635}{0,50 \times 119} = \text{kg } 10,7$$

di vapore, tale cilindro dovrà produrre:  $\frac{208}{10,7} = 19,5$  HP indicati e quello ad alta:  $\frac{150 - 19,5}{0,79} = 165$  HP indicati.

I rendimenti indicati attribuiti perciò ai detti cilindri si possono ritenere sufficientemente approssimati.

Per il tratto  $e \alpha$  riterremo ancora di 0,70 il rendimento indicato del cilindro ad alta (in realtà sarà un po' maggiore) quindi il segmento  $e'_2 D'$ , corrispondente a  $P_r$  sarà in prosecuzione di  $c'_2, e'_2$ .

Dall'esame del diagramma si vede poi subito che in corrispondenza di tale tratto il rendimento indicato del secondo cilindro sarà certamente basso, essendo piccola la potenza da esso sviluppata in confronto di quella di massimo rendimento. Supponendolo in prima approssimazione di 0,30 e fissando  $n' = 0,55$  (il rendimento indicato del cilindro ad alta aumenta, quello meccanico complessivo diminuisce) si ha:

$$P_b = \frac{635 \times 126 - 0,55 \times 1750 \times 76,5}{0,55 \times 76,5 + 0,30 \times 119} = \text{kg } 82,2$$

e poichè per ogni HP-ora indicato svolto nel cilindro a bassa occorrono:

$$\frac{635}{0,30 \times 119} = \text{kg } 17,7$$

tale cilindro dovrà sviluppare  $\frac{82,2}{17,7} = 4,65$  HP indicati, cui corrisponde una potenza di circa 0,24 della precedente di 19,5 HP. Il rendimento scelto risulta perciò eccessivamente basso, ritenendolo di 0,35, si avrà, rifacendo i calcoli:

$$P_b = 76,5$$

cui corrisponde la potenza di circa 5 HP. Tracciando nel diagramma della fig. 14 i segmenti  $c_4 d_4$  e  $e_4 D_4$  rispettivamente alle distanze corrispondenti a 208 kg e 76,5 kg si sarà completato il diagramma  $oa_1 b_1 c_4 d_4 e_4 D_4 E_1 f_1 g_1 h_1 i_1 l_1 m_1 n_1 o_1 p_1 p_0$ , che rappresenta il consumo di vapore per forza motrice.

L'ordinata media di tale diagramma risulta di 1560 kg e quindi il consumo di vapore di:

$$1560 \times 3000 = \text{kg } 4.680.000.$$

L'area tratteggiata con linea continua rappresenta anche qui il consumo di vapore prelevato direttamente dalle caldaie: i due diagrammi tra cui essa è compresa hanno rispettivamente le ordinate medie di 1690 kg e 1530 kg, quindi il consumo stesso risulterà di:

$$(1690 - 1530) 3000 = \text{kg } 480.000$$

ed il costo del combustibile totale:

$$4680 \times 13 + 480 \times U,35 = \text{L. } 66250.$$

Le quota spettante alla sola forza motrice sarà:

$$66250 - 57500 = \text{L. } 8750$$

pari a:  $\frac{8750}{118 \times 3000} = \text{L. } 0,0247$  per HP-ora.

**Conclusioni.** I risultati ottenuti dimostrano all'evidenza come del tutto dannosa riuscirebbe l'applicazione del ricupero parziale in sostituzione di quello totale.

Il confronto tra la prima e la seconda soluzione non può farsi completamente che con l'ausilio del costo dell'energia elettrica, nonché delle presumibili spese d'impianto, di manutenzione, delle quote d'interesse e ammortamento, relative ai due casi.

A parità di tutte queste ultime circostanze converrà evidentemente l'energia elettrica quando il costo del cavallo-ora elettrico sia minore di:

$$\frac{66100 - 64400}{15400} = \text{L. } 0,11$$

per HP-ora, ciò che nella pratica è generalmente verificato.