

impiego degli scambiatori di calore per il recupero dell'energia negli impianti termotecnici

MARCO FILIPPI

1. IL SIGNIFICATO DEL RECUPERO TERMICO

Nei processi termici che avvengono negli impianti civili ed industriali l'energia termica disponibile si degrada spontaneamente ed irreversibilmente, trasferendosi da sistemi termodinamici a più elevata temperatura a sistemi termodinamici a più bassa temperatura. La sorgente di energia termica a più elevata temperatura è la fonte energetica primaria, mentre il ricevitore a più bassa temperatura è l'ambiente circostante.

Disporre di energia termica ad elevata temperatura significa disporre di energia termica di qualità superiore e ciò è ben noto a tutti i termotecnici.

Questo assunto è stato di recente ribadito nel testo di uno studio compiuto da un gruppo di fisici statunitensi [1] allo scopo di individuare le possibilità e le modalità per un uso più efficiente dell'energia.

L'approccio metodologico proposto, non nuovo in campo termodinamico, consiste nell'associare ad ogni quantità di energia termica, originariamente disponibile alla temperatura T_1 , la quantità di lavoro (energia meccanica od elettrica) da essa ottenibile operando con un ciclo termodinamico di Carnot in un ambiente a temperatura T_0 . Poiché il rendimento di detto ciclo dipende soltanto dalle due temperature estreme, ad ogni temperatura T_1 si può associare un differente valore di rendimento e quindi una differente quantità di lavoro ottenibile.

In pratica la quantità di lavoro ottenibile è tanto minore quanto più prossima a T_0 è la temperatura T_1 alla quale l'energia termica è disponibile e ciò evidenzia che l'energia termica a

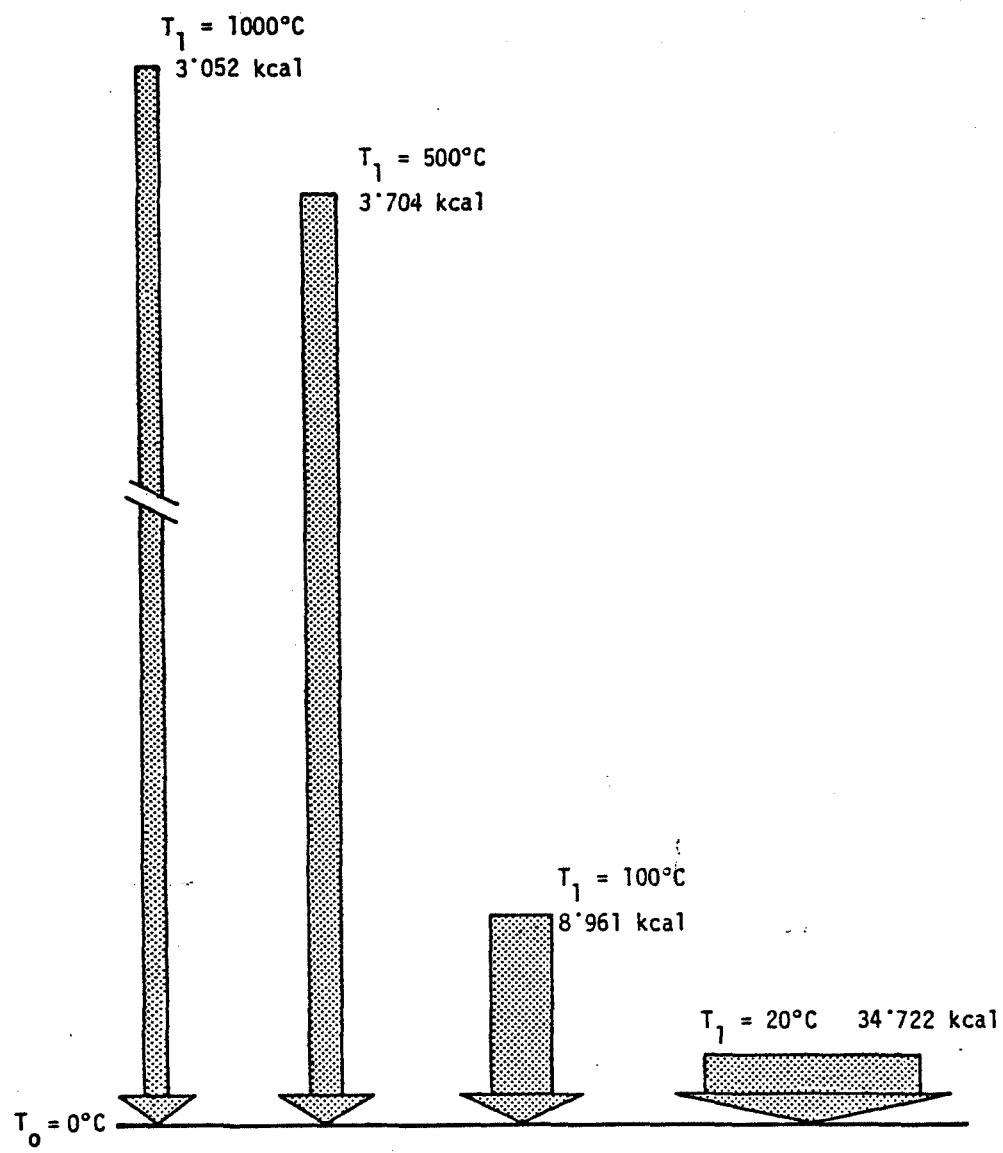
temperatura prossima a quella ambiente è energia meno preziosa, più degradata.

Riconoscendo l'esistenza di una scala qualitativa entro cui l'energia termica è collocabile in funzione del livello di temperatura al quale è disponibile, si può affermare che un uso razionale dell'energia termica comporta uno sfruttamento della stessa a tutti i livelli di temperatura superiori alla temperatura ambiente, ciò al fine di evitare ogni sua degradazione in forma improduttiva.

In gran parte degli impianti termici detto uso razionale dell'energia non avviene, anche perché l'efficienza energetica del processo viene valutata soltanto in termini di quantità di energia termica utilizzata riferita alla quantità di energia primaria consumata, senza alcuna ulteriore considerazione sulla degradazione che l'energia termica subisce nel suo decadere dai livelli di temperatura superiori ai livelli di temperatura inferiori. Il fatto stesso di assumere come livello di temperatura di riferimento quello relativo all'uso finale dell'energia, anziché quello dell'ambiente circostante, induce a disperdere rilevanti quantità di energia termica altrimenti utilizzabili.

Conducendo l'analisi energetica di un processo termico alla luce delle precedenti considerazioni sul nesso esistente tra energia termica e lavoro ottenibile, si nota come una modesta perdita di energia termica ad alta temperatura è del tutto equivalente ad una rilevante perdita di energia termica a bassa temperatura (fig. 1).

Il termine « recupero termico » assume quindi un ampio significato; riguardando l'utilizzazione non soltanto delle quote di energia termica sparse nell'evolversi del processo, ma anche dell'energia termica costituente l'uso finale del processo stesso.

**FIGURA 1**

Quantità di energia termica in kcal, disponibili a differenti temperature T_1 , necessarie per ottenere una quantità di lavoro pari a 10.000 kJ con il rendimento del ciclo di Carnot ($\eta = 1 - T_0/T_1$).

La determinazione di quale e quanta energia termica è opportuno recuperare diviene allora un problema a carattere sia tecnico che economico, da risolvere caso per caso nel modo ottimale.

Circa le *modalità operative* per effettuare il recupero di energia termica, se ne possono distinguere essenzialmente due:

- il trasferimento dell'energia termica da recuperare ad un sistema termodinamico a temperatura inferiore;
- il trasferimento dell'energia termica da re-

cuperare ad un sistema termodinamico a temperatura superiore.

Nel primo caso il trasferimento avviene spontaneamente mediante scambiatori di calore; nel secondo caso il trasferimento avviene artificialmente mediante sistemi a pompa di calore.

Il recupero termico mediante scambiatori di calore comporta, in base alle precedenti considerazioni a carattere termodinamico, una ulteriore degradazione dell'energia termica, in quanto l'energia termica recuperata risulta disponibile ad una temperatura inferiore a quella dell'energia termica da recuperare.

Il recupero termico mediante pompa di calore comporta invece, sia pure a spese di una certa quantità di lavoro, un miglioramento della qualità dell'energia termica da recuperare, in quanto provoca un innalzamento del suo livello di temperatura.

Negli impianti termici civili ed industriali le perdite di energia termica sono di varia natura e risulta praticamente recuperabile soltanto l'energia termica associata agli effluenti liquidi e gassosi. Nel dispositivo per il recupero termico, sia esso a scambio termico o a pompa di calore, avviene il trasferimento dell'energia termica associata a detti effluenti da essi ad un fluido termovettore che costituisce il veicolo per il ritorno dell'energia termica o allo stesso sistema impiantistico dal quale essa proviene o ad un altro distinto.

Si possono distinguere le *applicazioni* in almeno tre tipi fondamentali:

- recupero termico da impianto di processo a impianto di processo;
- recupero termico da impianto di processo a impianto di benessere;
- recupero termico da impianto di benessere a impianto di benessere.

Nelle applicazioni del primo tipo l'energia termica recuperata dagli effluenti di processo viene trasferita, mediante il fluido termovettore, al processo stesso. Si tratta in generale di applicazioni ad elevata temperatura caratterizzate da una buona efficienza energetica.

Nelle applicazioni del secondo tipo l'energia termica recuperata dagli impianti di processo viene direttamente utilizzata negli impianti di benessere, che generalmente operano a regimi termici caratterizzati da più basse temperature. A differenza del recupero termico da impianto di processo a impianto di processo, in questo caso è sempre necessario operare una modulazione dell'energia termica trasferita, in quanto non si ha contemporaneità tra disponibilità e domanda di energia in tutte le condizioni di funzionamento, e ciò implica una minore efficienza energetica globale.

Nelle applicazioni del terzo tipo il recupero termico ha carattere di reversibilità stagionale in quanto nel periodo invernale gli effluenti sono a più elevata temperatura rispetto al fluido ter-

movettore che riceve energia termica, mentre nel periodo estivo gli stessi effluenti sono a più bassa temperatura rispetto al fluido termovettore che cede energia termica. In queste applicazioni l'efficienza energetica è generalmente bassa, e quindi maggiore rilevanza assumono gli aspetti tecnici ed economici del problema.

2. L'EFFICIENZA DEI DISPOSITIVI DI RECUPERO TERMICO

Limitando la trattazione ai dispositivi di recupero dell'energia termica costituiti da uno scambiatore di calore a scambio indiretto, pare opportuno introdurre il concetto di efficienza del dispositivo di recupero termico per meglio affrontare gli aspetti tecnici ed economici connessi con l'impiego di detti dispositivi.

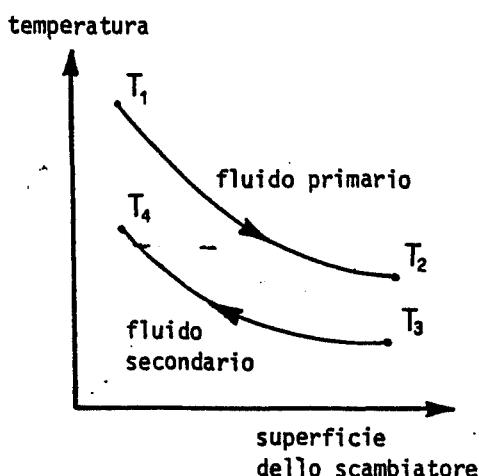
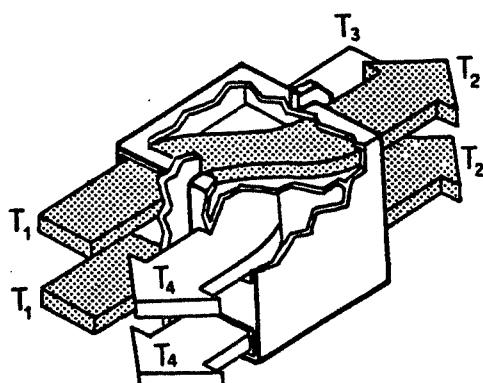
Esaminando i possibili modi di trasferire energia termica da un fluido ad un altro mediante uno scambiatore di calore a scambio indiretto (fig. 2), si nota come, in accordo con le leggi fisiche (postulato di Clausius), la massima temperatura che il fluido secondario può raggiungere all'uscita dallo scambiatore è sempre inferiore alla temperatura di ingresso del fluido primario nello scambiatore. Ciò conferma che è sempre presente una degradazione dell'energia termica, in quanto per ogni unità di energia termica trasferita vi è una perdita di lavoro ottenibile.

È comunque intuitivo che, operando ad elevate temperature nei confronti della temperatura ambiente, la differenza di temperatura tra fluido primario entrante e fluido secondario uscente poco influenza detta perdita di lavoro ottenibile in termini di percentuale. In altre parole, per un uso efficiente dell'energia termica disponibile, detta differenza di temperatura deve essere di piccola entità, soprattutto se il dispositivo di recupero termico opera a temperature prossime alla temperatura ambiente.

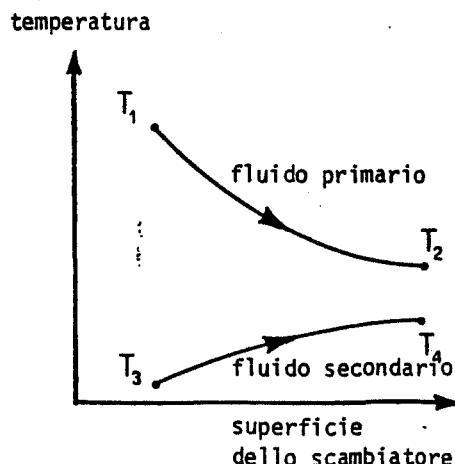
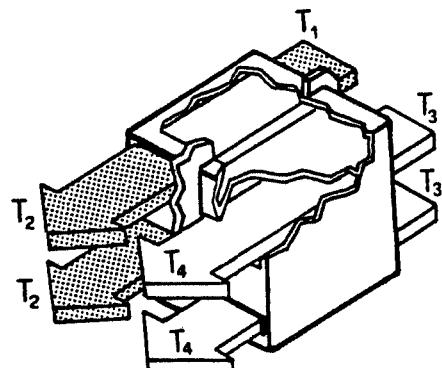
Osservando l'andamento delle temperature dei due fluidi, primario e secondario, da punto a punto attraverso lo scambiatore (fig. 2), si nota poi come la suddetta differenza di temperatura può essere ridotta impiegando scambiatori di calore con flussi in controcorrente, anziché con flussi in parallelo.

L'efficienza di un dispositivo di recupero termi-

FLUSSI IN CONTROCORRENTE



FLUSSI IN PARALLELO



co può essere definita, in generale, come il rapporto fra la quantità di energia termica effettivamente trasferita E_T e la massima quantità di energia trasferibile $E_{T,MAX}$ nell'unità di tempo.

Nei casi di uno scambiatore di calore liquido-liquido o gas-gas, nell'ipotesi di calore specifico costante e con riferimento ai simboli di figura 2, si può scrivere:

$$E_T = CM_p(T_1 - T_2) = CM_s(T_4 - T_3) \quad (1)$$

$$E_{T,MAX} = CM_{MIN}(T_1 - T_3) \quad (2)$$

in cui M_{MIN} è la portata in massa di valore più piccolo tra M_p , portata in massa del fluido primario, ed M_s , portata in massa del fluido secondario.

Le suddette relazioni (1) e (2) sono valide anche nel caso di uno scambiatore di calore aria-aria, purché si tratti di aria secca; qualora si considerino delle portate in massa di aria umida, per tenere conto dell'entalpia del vapore acqueo presente, occorre fare riferimento ai valori di entalpia della miscela aria-vapore acqueo e quindi le quantità di energia termica trasferita e trasferibile sono ottenibili dalle relazioni:

$$E_T = M_p(h_1 - h_2) = M_s(h_4 - h_3) \quad (3)$$

$$E_{T,MAX} = M_{MIN}(h_1 - h_3) \quad (4)$$

con ovvio significato dei simboli.

L'efficienza di un dispositivo di recupero del-

FIGURA 2

Trasferimento dell'energia termica in uno scambiatore di calore a scambio indiretto.

M_p - portata in massa del fluido primario

M_s - portata in massa del fluido secondario

l'energia termica costituita da uno scambiatore di calore a scambio indiretto ha dunque un valore dipendente da molte variabili tra le quali le portate in massa dei due fluidi, il loro rapporto e le caratteristiche di scambio termico del dispositivo.

Come si può facilmente desumere dalle precedenti relazioni (1) e (2), nel caso in cui la portata in massa di più piccolo valore sia la portata del fluido secondario, l'efficienza dipende soltanto dalla differenza fra le temperature T_1 e T_4 del fluido primario entrante e del fluido secondario uscente ed è da tale differenza maggiormente influenzata quanto più dette temperature sono prossime alla temperatura T_3 del fluido secondario entrante, coincidente quest'ultima, nella maggior parte dei casi, con la temperatura ambiente.

La temperatura del fluido secondario all'uscita dello scambiatore, desumibile dalla (1) e dalla (2), vale:

$$T_4 = T_3 + e \frac{M_{\text{MIN}}}{M_s} (T_1 - T_3) \quad (5)$$

Come si può vedere, a pari valore dell'efficienza, se la portata in massa del fluido secondario è molto più grande della portata in massa del fluido primario, la temperatura T_4 può essere molto diversa dalla temperatura T_1 del fluido primario all'ingresso nello scambiatore.

3. I DISPOSITIVI PER IL RECUPERO TERMICO

I dispositivi per il recupero termico basati sul principio del trasferimento di energia termica da un fluido ad un altro sono classificabili in relazione alla natura dei fluidi interessati allo scambio termico.

In particolare, poiché sia gli effluenti ai quali è associata l'energia termica da recuperare sia i fluidi termovettori ai quali detta energia deve essere trasferita sono fluidi allo stato liquido o gassoso, si possono distinguere scambiatori di calore liquido-liquido, gas-gas o liquido-gas.

Tra gli scambiatori liquido-liquido meritano una particolare citazione gli scambiatori del tipo a piastre, che consentono di ottenere minime differenze di temperatura tra fluido primario entrante e fluido secondario uscente e quindi ele-

vati valori di efficienza, a parità di altre condizioni.

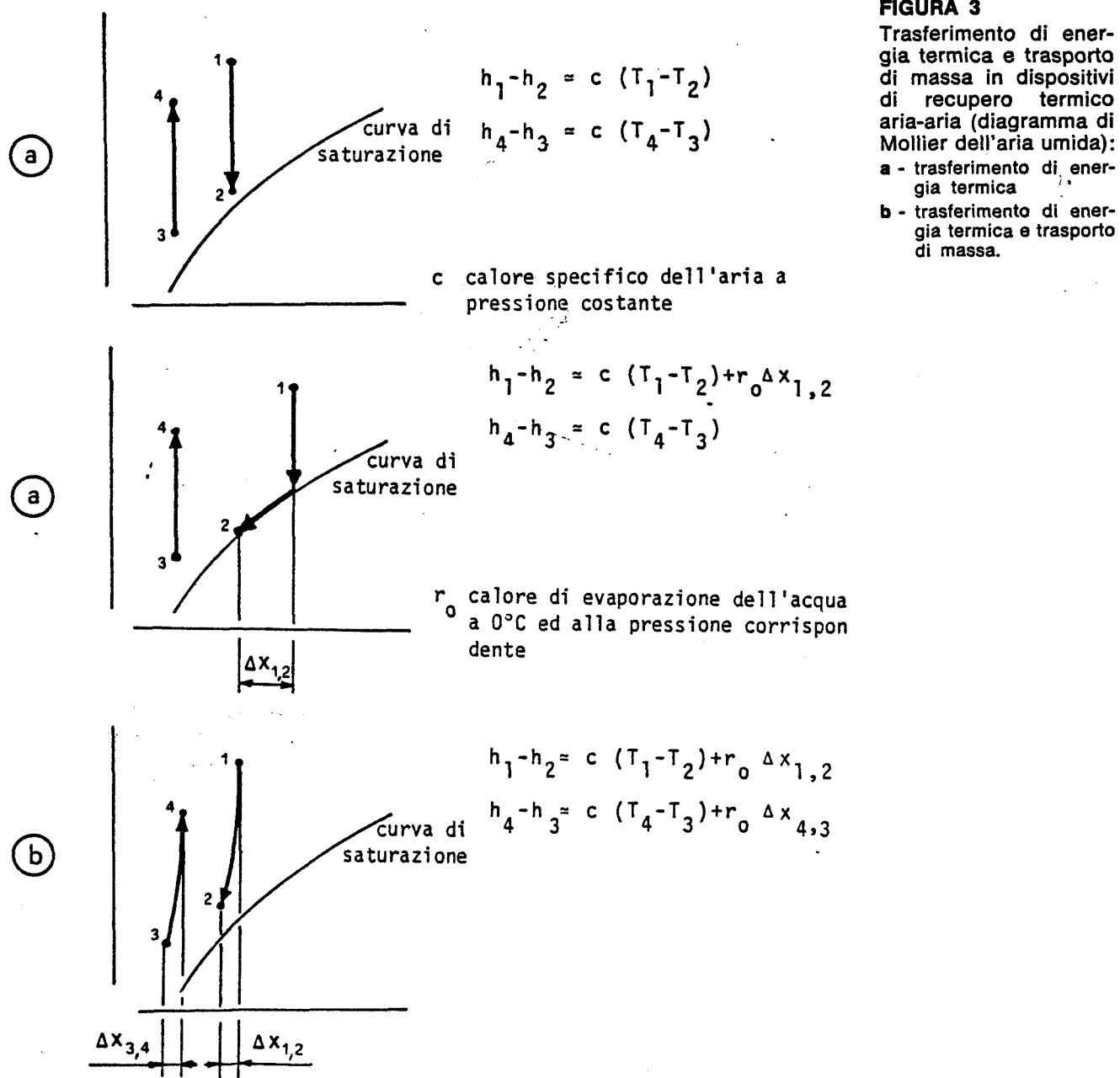
Ai fini di un panorama tipologico, appaiono particolarmente interessanti gli scambiatori aria-aria, aria-acqua, fumi-aria e fumi-acqua, anche perché intorno ad essi si è sviluppato uno specifico settore produttivo.

Come già accennato trattando dell'efficienza dei dispositivi di recupero termico, negli scambiatori di calore aria-aria è opportuno fare riferimento ai valori di entalpia, anziché ai valori di temperatura, in quanto l'entalpia della miscela (riferita all'unità di massa di aria secca) tiene conto anche dell'energia termica associata al vapore acqueo contenuto nell'aria umida e le variazioni di tale quota di energia sono di valore non trascurabile quando sono presenti fenomeni di condensazione e di evaporazione.

Ogni qualvolta avviene un fenomeno di condensazione o di evaporazione viene infatti messo in gioco il corrispondente calore di trasformazione, il cosiddetto calore latente, e vi sono dispositivi di recupero termico, che vengono denominati «recuperatori di calore totale (sensibile o latente)» od anche «scambiatori entalpici», nei quali avviene il trasferimento da un flusso di aria all'altro non solo dell'energia termica, ma anche di una parte della massa di acqua contenuta nell'aria umida attraverso un processo di condensazione e successiva evaporazione.

In pratica il flusso di aria primario, a più elevato valore entalpico, viene deumidificato ed il condensato viene trasferito mediante un opportuno mezzo fisico al flusso di aria secondario nel quale evapora umidificandolo. Il calore di condensazione, che incrementa la temperatura del condensato e del mezzo fisico di trasferimento del condensato da un flusso di aria all'altro, risulta pari al calore di evaporazione e quindi la temperatura del mezzo fisico di trasferimento del condensato ritorna ciclicamente al valore iniziale.

La deumidificazione del flusso di aria primario può avvenire mediante processi a carattere fisico-chimico quali l'assorbimento con soluzione di cloruro di litio o con gel di silice e l'adsorbimento su superfici metalliche; i materiali igroscopici impiegati costituiscono il mezzo fisico di trasferimento del condensato di cui si è detto.



Poiché la messa in gioco dell'energia termica di trasformazione connessa con la condensazione o l'evaporazione può avvenire anche in scambiatori di calore ove non si ha alcun trasporto di massa (¹), si ritiene qui opportuno distinguere i dispositivi di recupero termico aria-aria fra:

- dispositivi in cui viene effettuato soltanto il trasferimento di energia termica (fig. 3-a);

— dispositivi in cui viene effettuato sia il trasferimento di energia termica sia il trasporto di massa (fig. 3-b).

Ciò per non ingenerare confusioni sul cosiddet-

(¹) È condizione necessaria e sufficiente che il flusso di aria primario da raffreddare raggiunga una temperatura inferiore alla sua temperatura di rugiada per avere la deumidificazione e la conseguente messa in gioco del calore di condensazione.

to « trasferimento di calore latente » e per sottolineare che nei dispositivi del secondo tipo si ha il trasferimento di una certa parte dell'acqua contenuta nel flusso di aria primario da esso al flusso di aria secondario e che a detto trasferimento è naturalmente connesso un incremento entalpico del flusso di aria secondario in quanto la massa di vapore acqueo è caratterizzata da un valore di entalpia non nullo.

Quanto finora detto riguardo alle applicazioni nelle quali il flusso di aria primario ha un più elevato valore entalpico ha validità, con segno invertito, anche nelle applicazioni ove il flusso di aria primario ha un valore entalpico minore di quello del flusso di aria secondario. In genere si può quindi dire che nei dispositivi in cui viene effettuato anche il trasporto di massa è possibile riscaldare ed umidificare oppure raffreddare e deumidificare il flusso di aria secondario.

Volendo effettuare un esame tipologico degli scambiatori di calore aria-aria impiegati per il recupero termico, a partire dalle loro caratteristiche costruttive e funzionali, si possono distinguere i seguenti tipi di scambiatori:

- scambiatori rotativi;
- scambiatori a piastre fisse;
- scambiatori a torre multipla;
- scambiatori a tubi alettati.

Questa classificazione è stata proposta dalla statunitense Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association (SMACNA) in un manuale edito nel 1978 [2].

Lo scambiatore rotativo (fig. 4) è costituito da un cilindro rotante tra due condotti di aria adiacenti; il cilindro è caratterizzato da una elevata permeabilità all'aria e da una elevata capacità termica, proprietà ottenute realizzando il cilindro stesso con fitte maglie di rete metallica o con pacchi di lamierini metallici o con sottili dischi di materiale ceramico. I materiali costituenti il cilindro sono poi impregnati o trattati superficialmente con sostanze igroscopiche per consentire, oltre al trasferimento dell'energia termica, anche il trasporto di massa.

Lo scambiatore a piastre fisse (fig. 5) può essere costituito da un fascio tubiero e da un involucro (mantello) oppure da una serie di piastre

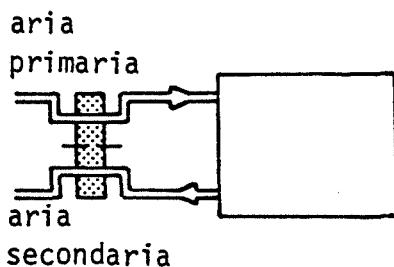


FIGURA 4
Schema scambiatore di calore rotativo

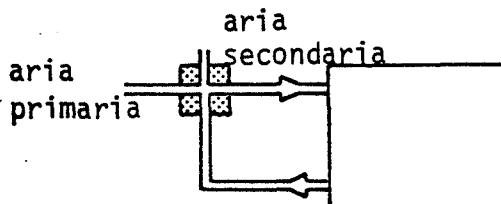


FIGURA 5
Schema scambiatore di calore a piastre fisse

sulle quali vengono ricavati dei canali alternati, percorsi rispettivamente dal flusso di aria primario e dal flusso di aria secondario. I due flussi di aria risultano separati da sottili pareti metalliche o da lastre di vetro e quindi non è possibile alcun trasporto di massa. Le configurazioni possono essere a flussi paralleli, incrociati od in controcorrente.

Lo scambiatore a torre multipla (fig. 6) è costituito da almeno due torri ove avvengono rispettivamente il contatto tra una soluzione assorbente e deassorbente ed il flusso di aria primario, ed il contatto tra la stessa soluzione ed il flusso di aria secondario. Il dispositivo consente una totale separazione fisica tra i due condotti dell'aria primaria e secondaria, ma comporta la continua circolazione ed irrorazione della soluzione. In base al processo chimico-fisico dell'assorbimento si ha il trasporto di massa; il trasferimento dell'energia termica è connesso con il riscaldamento ed il successivo raffreddamento della soluzione circolante. Nei dispositivi di questo tipo il trasferimento di energia termica è in genere quantitativamente trascurabile e pertanto essi risultano prevalentemente impiegati quando il trasporto di massa assume una certa importanza.

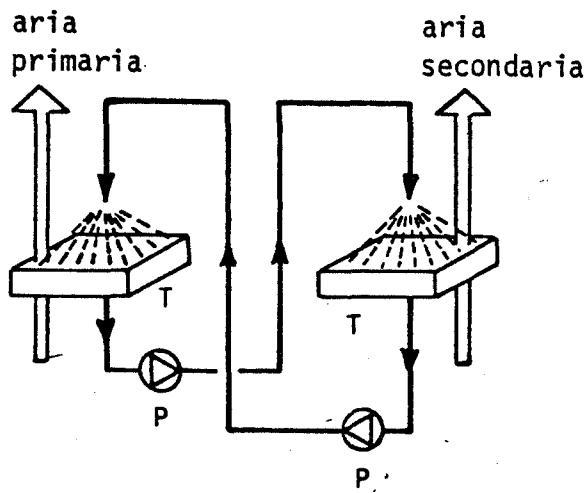


FIGURA 6
Schema scambiatore di calore a torre multipla
T - torre di irrorazione
P - pompa di circolazione

Tra gli *scambiatori a tubi alettati* sono classificati tutti quei dispositivi nei quali il trasferimento di energia termica tra un flusso di aria e l'altro avviene mediante un fluido termovettore contenuto entro un circuito sigillato. Ciò implica che non vi è scambio diretto tra il flusso di aria ed il fluido termovettore, come nel caso dello scambiatore a torre multipla, e che sono comunque previste batterie di scambio termico a superfici alettate per effettuare lo scambio indiretto aria-fluido termovettore.

Il fluido termovettore può essere un liquido, come ad esempio il glicole etilenico, che viene fatto circolare mediante una pompa tra lo scambiatore aria primaria-liquido e lo scambiatore liquido-aria secondaria, scambiatori che si trovano sui condotti dell'aria primaria e secondaria anche fisicamente lontani uno dall'altro (fig. 7-a).

In altri casi il fluido termovettore è un fluido bifase che condensa nel lato freddo del circuito ed evapora nel lato caldo di esso, trasportando energia termica da un lato all'altro. È questo il principio del tubo di calore che trova pratica applicazione in un insieme di tubi fra loro paralleli, parzialmente riempiti con un opportuno fluido, ad esempio R22, e sigillati; detti tubi, riuniti in un solo scambiatore, sono lambiti da una

parte dal flusso di aria primario e dall'altra parte dal flusso di aria secondario. Il ritorno del condensato al lato caldo è normalmente realizzato per gravità o per azione capillare (circolazione naturale).

In tutti i tipi di scambiatori su descritti lo scambio termico avviene fondamentalmente per conduzione e convezione; l'irraggiamento è una modalità di scambio termico generalmente non significativa. Ciò implica che la quantità di energia termica trasferita dipende dalla differenza di temperatura tra i due flussi di aria, dalle velocità di detti flussi, dalle configurazioni geometriche delle superfici di separazione e dalle loro pulizie.

Nella scelta dell'uno o dell'altro dispositivo di recupero termico deve essere considerato il tipo di applicazione: da impianto di processo a impianto di processo, da impianto di processo a impianto di benessere oppure da impianto di benessere a impianto di benessere.

Nel primo caso vengono trattati flussi di aria con temperature fino a 900 °C (essiccati, forni ecc.) e devono essere particolarmente considerati gli

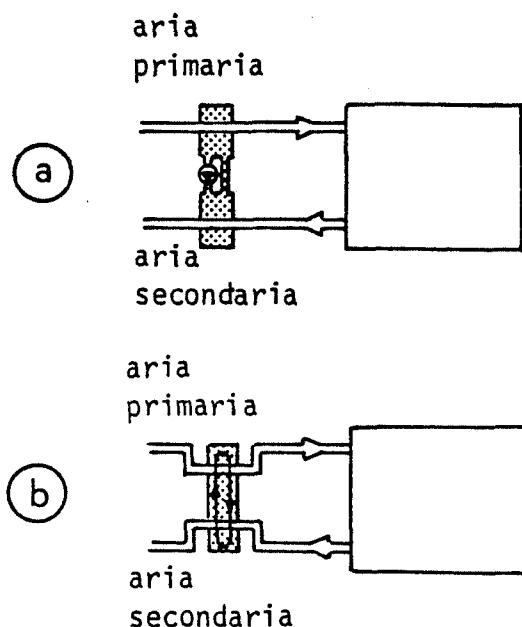


FIGURA 7
Schema scambiatori di calore a tubi alettati:
a - a liquido intermedio
b - a tubi di calore

effetti delle sostanze corrosive, condensabili o contaminanti contenute nell'aria effluente ai fini del mantenimento delle superfici di scambio termico; nella maggior parte dei casi non è richiesto il trasporto di massa, ma solo il trasferimento di energia termica.

Anche nelle applicazioni del secondo tipo è generalmente richiesto il solo trasferimento di energia termica e ciò è ben compatibile con la separazione fisica tra flusso di aria primario e flusso di aria secondario che normalmente contraddistingue queste applicazioni, nonché con la necessità di modulare la quantità di energia termica trasferita.

Nel recupero termico da impianto di benessere a impianto di benessere il flusso di aria uscente dall'edificio è stagionalmente caratterizzato da valori entalpici superiori od inferiori nei confronti del flusso di aria entrante e quindi si ha inversione stagionale del trasferimento dell'energia termica. In questo tipo di applicazioni è conveniente effettuare sia il trasferimento di energia termica che il trasporto di massa (fig. 8) ma, essendo presente detto trasporto di massa, nascono problemi di contaminazione tra i due flussi di aria e, se si impiegano scambiatori rotativi, nasce l'esigenza di una vicinanza tra i due condotti di aria primaria e secondaria.

La presenza di polvere od altri residui nell'aria effluente consiglia l'adozione di opportuni filtri collocati prima del dispositivo di recupero termico, mentre la presenza di gas o vapori contaminanti di vario tipo può indirizzare verso l'impiego di scambiatori a torre multipla, anziché rotativi; infatti alcune soluzioni assorbenti e deassorbenti svolgono una efficace azione sterilizzante. Gli scambiatori di calore a torre multipla consentono poi la collocazione dei condotti di aria primaria e secondaria in posizioni lontane l'una dall'altra, e ciò risulta essere in molti casi un notevole vantaggio.

A margine va poi sottolineato il problema della brina, un problema che si presenta nei climi freddi, soprattutto se l'umidità all'interno dell'edificio è controllata anche nel periodo invernale; per prevenire la brina e comunque per garantire delle corrette condizioni di funzionamento, nel caso del recupero termico da impianto di benessere a impianto di benessere, è sempre bene verificare il funzionamento del di-

spositivo nelle diverse situazioni climatiche che si possono registrare nel corso dell'anno.

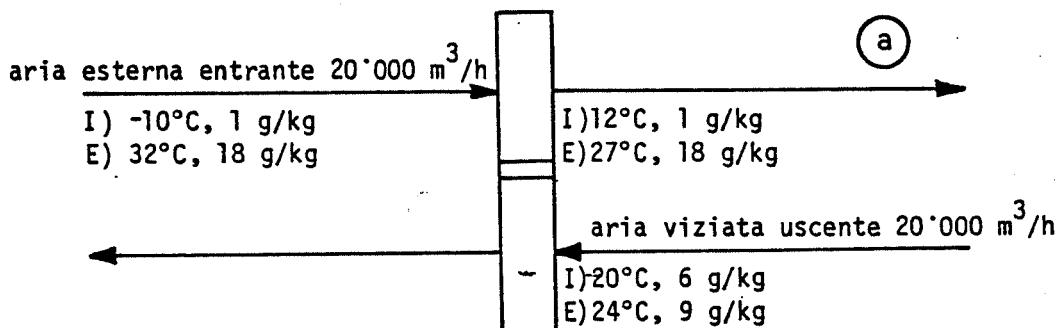
Per concludere la descrizione degli scambiatori di calore aria-aria impiegati per il recupero termico si possono citare i valori di efficienza che generalmente si ottengono con i differenti tipi di dispositivi [3]:

- scambiatori rotativi igroscopici - i valori di efficienza, riferiti ai salti entalpici e comprensivi dell'effetto del trasporto di massa, sono pari al 75÷85% con una velocità di rotazione del cilindro pari a 15÷20 giri al minuto;
- scambiatori a piastre fisse - i valori di efficienza sono pari al 50÷80% nei dispositivi con flussi in controcorrente od incrociati in modo opportuno (cioè in modo da avvicinarsi alla configurazione in controcorrente);
- scambiatori a tubi di calore - i valori di efficienza sono pari al 50÷80% e dipendono dalla configurazione (con flussi in parallelo si ha un decremento di circa il 20% rispetto al caso con flussi in controcorrente) e dal numero di ranghi della batteria di scambio termico;
- scambiatori con liquido intermedio circolante - i valori di efficienza sono pari al 40÷60% e si possono facilmente ottenere come prodotti delle efficienze proprie dei due scambiatori aria-liquido e liquido-aria costituenti il circuito;
- scambiatori a torre multipla - i valori di efficienza sono pari al 60÷70%.

Gli scambiatori di calore aria-acqua, fumi-acqua e fumi-aria rientrano, sotto l'aspetto tipologico, fra quelli descritti in precedenza.

Gli scambiatori aria-acqua e fumi-acqua sono costituiti da batterie di scambio termico a tubi alettati nelle quali l'acqua circola al di fuori od entro i tubi. Quando il fluido primario è costituito da fumi il fluido secondario può anche essere olio diatermico o vapore acqueo, in tal caso si hanno le cosiddette caldaie a recupero.

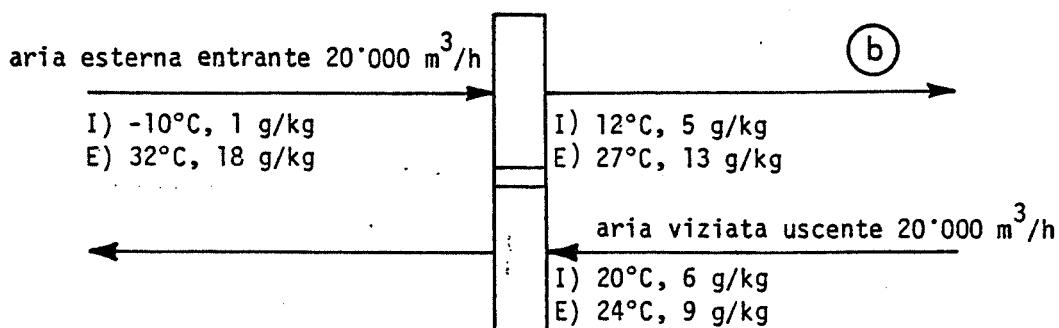
Gli scambiatori fumi-aria possono essere a tubi alettati, a piastre oppure a tubi lisci; quest'ultima soluzione diviene necessaria quando il contenuto in polveri è molto elevato e risulta necessaria una frequente pulizia della superficie di scambio termico.



ENERGIA RECUPERATA (nell'unità di tempo, in condizioni di progetto)

INVERNO (I) $147\,500 \text{ W}$ ($e = 52\%$)

ESTATE (E) $33\,400 \text{ W}$ ($e = 16\%$)



ENERGIA RECUPERATA (nell'unità di tempo, in condizioni di progetto)

INVERNO (I) $214\,000 \text{ W}$ ($e = 75\%$)

ESTATE (E) $114\,100 \text{ W}$ ($e = 55\%$)

FIGURA 8

Trasferimento di energia termica e trasporto di massa nel recupero termico da impianto di benessere a impianto di benessere (aria-aria):

a - trasferimento di energia termica

b - trasferimento di energia termica e trasporto di massa

La presenza dei fumi quale fluido primario esalta i problemi tipici degli scambiatori aria-aria con recupero termico da impianto di processo, e cioè l'effetto delle sostanze corrosive, delle particelle solide sospese e dei vapori condensabili. Si debbono impiegare materiali adatti ed evitare il raggiungimento in qualche parte dello scambiatore di temperature inferiori alla temperatura di rugiada dei fumi al fine di evitare dannosi fenomeni di condensazione.

Il trasporto di massa non assume in queste ultime applicazioni alcun motivo di interesse.

4. GLI ASPETTI ENERGETICI ED ECONOMICI DEL RECUPERO TERMICO

Ai fini del risparmio di energia e dell'uso razionale delle risorse energetiche il recupero di energia termica negli impianti termotecnici è

sempre conveniente e consigliabile; se però si esamina il problema del recupero termico con la metodologia propria dell'analisi economica si deve affermare che esso è conveniente solo quando il rapporto costi-benefici risulta vantaggioso.

Così, per gli impianti di riscaldamento, condizionamento dell'aria e ventilazione, le norme energetiche ASHRAE 90-75 [4] ed il regolamento di esecuzione della legge 373/76 consigliano od impongono, rispettivamente, il recupero termico solo nei casi in cui esso è vantaggioso sotto l'aspetto economico.

Si legge testualmente sulle norme ASHRAE citate:

« Si raccomanda che venga preso in maggior considerazione l'uso degli impianti di recupero in grado di risparmiare energia (purché la quantità spesa per il recupero sia inferiore alla quantità recuperata); se ciò è giustificato dal potenziale di energia trasferibile e dalla durata di funzionamento degli impianti »;

e sul regolamento di esecuzione della legge 373/76:

« Con esclusione degli edifici della categoria E.1, l'impiego di apparecchiature per il recupero del calore disperso per il rinnovo dell'aria, quando detto rinnovo avviene mediante ventilazione meccanica, è richiesto se la portata d'aria di ricambio G ed il numero di ore annue di funzionamento M, calcolato in base alla destinazione dell'edificio ed alla durata del periodo di riscaldamento indicata nel decreto, sono superiori ai valori fissati dal decreto stesso ».

Dalle suddette citazioni si desume che l'impiego dei dispositivi di recupero termico è considerato conveniente solo quando i consumi energetici per l'esercizio del dispositivo di recupero termico non superano quelli associati alla produzione della quantità di energia termica recuperata e quando i risparmi energetici ottenibili, tradotti in termini economici, risultano superiori ai costi connessi con l'installazione e la gestione del dispositivo stesso.

Per quanto riguarda il primo punto è chiaro che, nell'ipotesi di eguale fonte energetica primaria, i consumi energetici addizionali connessi con l'esercizio del dispositivo di recupero termico

devono essere sicuramente inferiori a quelli connessi con la produzione della quantità di energia termica recuperata; va però sottolineato che, nel caso di impiego di fonti energetiche primarie di natura diversa, il confronto deve essere effettuato direttamente in termini di costi e non in termini di quantità di energia.

I consumi energetici del dispositivo di recupero termico possono poi essere diretti o indiretti: del primo tipo sono ad esempio quelli connessi con la rotazione dei cilindri negli scambiatori rotativi oppure con il pompaggio del fluido termovettore negli scambiatori a liquido intermedio od a torri multiple; del secondo tipo sono ad esempio quelli dovuti all'incremento di potenza delle apparecchiature di pompaggio o di ventilazione per il superamento delle resistenze fluidodinamiche offerte dagli scambiatori di calore e dalle sezioni filtranti che normalmente li precedono.

Per quanto riguarda il secondo punto, cioè l'analisi del rapporto costi-benefici relativo all'installazione di un dispositivo di recupero termico, è opportuno sottolineare che i risultati che si possono ottenere dipendono strettamente dalle condizioni al contorno che si intendono porre. Fra queste le più importanti sono il periodo di ammortamento del dispositivo, il tasso di interesse del capitale investito, il costo dell'unità di energia termica prodotta, il tasso di incremento del costo della fonte energetica primaria ed il tasso di inflazione.

Il beneficio diretto che si ottiene installando un dispositivo di recupero termico è il risparmio della quantità di energia primaria necessaria per la produzione della quantità di energia termica recuperata. Vi possono poi essere dei benefici indiretti e collaterali, non sempre quantizzabili in termini economici, come ad esempio la riduzione dei costi di produzione dei prodotti e la riduzione dell'inquinamento dell'ambiente circostante.

Per valutare la quantità di energia primaria risparmiata occorre prima di tutto definire le condizioni di progetto e di esercizio del dispositivo di recupero termico (per quanto riguarda le portate massiche dei fluidi primario e secondario, le temperature in ingresso ed in uscita, le perdite di pressione per resistenze fluidodinamiche, i periodi di funzionamento ecc.) e suc-

cessivamente calcolare la quantità di energia recuperata in un determinato periodo, generalmente in un anno.

Nelle applicazioni in cui il recupero termico avviene da impianto di processo a impianto di processo è possibile, nella maggior parte dei casi, considerare la quantità di energia termica recuperata nell'unità di tempo costante per tutto il periodo di funzionamento dell'impianto. Lo stesso non si può dire invece nelle applicazioni da impianto di processo a impianto di benessere o da impianto di benessere a impianto di benessere dove la quantità di energia termica recuperata nell'unità di tempo è variabile in funzione di vari parametri, tra i quali il più importante è la temperatura esterna.

I dati dell'esempio riportato in figura 8 mostrano come l'efficienza di un dispositivo di recupero sia di valore molto differente passando dalle condizioni di funzionamento invernali a quelle estive. Detti dati si riferiscono in particolare alle due situazioni di progetto estiva ed invernale; ma per calcolare la quantità di energia termica recuperata nel corso di un determinato periodo occorre effettuare l'integrazione in funzione del tempo della potenza termica recuperata.

Alcuni autori suggeriscono di calcolare l'energia recuperata con il metodo dei gradi giorno, moltiplicando cioè la potenza termica per il numero di ore di funzionamento nel periodo considerato e per il rapporto:

$$\frac{T_1 - T_{3a}}{T_1 - T_3} \quad (6)$$

in cui:

T_1 è la temperatura di ingresso nello scambiatore del fluido primario (valore di progetto);

T_3 è la temperatura di ingresso nello scambiatore del fluido secondario (valore di progetto);

T_{3a} è la temperatura ambiente media nel periodo considerato (si considera che il fluido secondario entri nello scambiatore sempre a temperatura ambiente).

La temperatura T_{3a} è ottenibile dalla relazione:

$$T_{3a} = T_0 - \frac{D}{n} \quad (7)$$

in cui:

T_0 è la temperatura interna di riferimento utilizzata per il calcolo dei gradi-giorno;

D è il valore dei gradi-giorno nel periodo considerato;

n è il numero di giorni nel periodo considerato.

Altri autori suggeriscono invece di effettuare una vera e propria integrazione grafica usufruendo, nel caso dell'aria, del diagramma psicrometrico.

Proprio da queste considerazioni deriva il richiamo delle citate normative italiane e statunitense a verificare le quantità di energia trasferibili in rapporto alle durate di funzionamento dei dispositivi di recupero termico.

La vera e propria analisi economica dell'investimento può essere condotta associando un costo alla quantità di energia primaria risparmiata ed utilizzando una delle varie formule finanziarie che normalmente si impiegano per valutare l'economicità degli investimenti intesi a risparmiare energia [5]. L'installazione del dispositivo risulterà così consigliabile o meno in base al rapporto fra risparmi ottenibili e capitali investiti, tenendo conto delle già citate condizioni al contorno (tasso di interesse, periodo di ammortamento ecc.).

A margine è comunque opportuno sottolineare che nel caso di un impianto di benessere il risparmio ottenibile significa una riduzione delle spese di gestione, mentre nel caso di un impianto di processo esso significa una riduzione delle spese di produzione. Poiché la riduzione delle spese di produzione si traduce in un maggior utile di impresa, regolarmente tassato, è chiaro che in termini economici il risparmio effettivo risulta inferiore rispetto a quello teorico, in relazione al carico fiscale dell'impresa.

Al termine di queste brevi considerazioni sugli aspetti energetici ed economici del recupero termico è forse bene porsi un dubbio a carattere metodologico: è lecito considerare il dispositivo di recupero termico come un componente aggiuntivo ed opzionale dell'impianto, da valutare separatamente, sulla base di una analisi costi-benefici, anziché come un componente essenziale che fa parte di diritto dell'impianto stesso?

Il dubbio sussiste al di là di ogni considerazio-

ne economica, in quanto l'analisi energetica evidenzia che, operando con un processo termico in un ambiente a temperatura definita, ogni perdita di energia termica a temperatura diversa dalla temperatura ambiente è una perdita di lavoro ottenibile.

La soluzione è forse una sola: quella di una progettazione attenta e coerente che consideri

l'impianto termotecnico non come un sistema isolato, ma come un sistema integrato con altri sistemi impiantistici e caratterizzato da più utenze, una progettazione che acquisisca la « filosofia del recupero termico » al di là di ogni rigorosa valutazione dei rapporto costi-benefici associato all'uno o all'altro dispositivo di recupero.

Bibliografia

- [1] AIP Conference Proceedings n. 25 - *Efficient Use of Energy* - American Institute of Physics, New York, 1975
- [2] SMACNA - *Energy recovery equipment and systems, air to air* - Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association, Inc., 1978
- [3] Cataloghi di varie ditte produttrici di dispositivi di recupero termico
- [4] ASHRAE Standard 90-75 - traduzione italiana, da Condizionamento dell'aria n. 10 e n. 11, 1979, Editrice PEG, Milano
- [5] V. Ferro, M. Filippi, L. Lastella - *L'analisi degli investimenti nel settore del risparmio energetico* - in corso di pubblicazione
- [6] P.D. Lessieur - *Ricambio d'aria e riscaldamento di alloggi: il costo energetico delle differenti soluzioni di ventilazione - prima parte* - Condizionamento dell'aria n. 11, 1979, Editrice PEG, Milano
- [7] L. Simon - *Analisi comparativa del rendimento di un sistema di recupero di calore a mezzo di scambiatori con batterie alettate collegate da un circuito idraulico* - Condizionamento dell'aria n. 3, 1979, Editrice PEG, Milano
- [8] F. Gasparini - *Il recupero di calore dai fumi di forni industriali e di caldaie* - memoria presentata al Convegno ANTA, gennaio 1980
- [9] V. Carosella - *Il recupero di calore aria-aria per mezzo di scambiatori alettati* - memoria presentata al Convegno ANTA, gennaio 1980

Relazione presentata al Convegno A.I.CARR « La gestione dell'energia negli anni '80 » - Milano, 5-6 marzo 1980. '