

# **Ricupero del calore ed utilizzazione del calore residuo**

**Progettazione, costruzione e funzionamento  
d'impianti per il ricupero del calore  
e l'utilizzazione del calore residuo**

**RAVEL nel settore del calore  
Fascicolo 2**

**«RAVEL nel settore del calore»  
in quattro fascicoli**

In un prossimo futuro le tecniche utilizzate nel settore energetico assumeranno un'importanza sempre maggiore. Nei libri di testo odierni è possibile reperire ben poco materiale concernente questo tema. In tre corsi RAVEL – «Ricupero del calore e utilizzazione del calore residuo», «Pompe di calore», nonché «Produzione combinata di forza e calore» – le progettiste ed i progettisti possono formarsi ulteriormente in questo settore promettente ed aperto al futuro. La collana di pubblicazioni che apparirà a questo proposito «RAVEL nel settore del calore» è composta da quattro fascicoli, dei quali il fascicolo 1 costituisce la base degli altri tre corsi. I fascicoli possono essere ordinati presso l'Ufficio centrale federale degli stampati e del materiale, 3003 Berna.

Fascicolo 1: Elettricità e calore – Basi e correlazioni  
(n. d'ord. 724.357i)

Fascicolo 2: Ricupero del calore ed utilizzazione  
del calore residuo (n. d'ord. 724.355i)

Fascicolo 3: Pompe di calore (n. d'ord. 724.356i)

Fascicolo 4: Produzione combinata di forza e calore  
(n. d'ord. 724.358i)



*Osservazioni importanti*



*Indicazioni nell'ambito della collana  
«RAVEL nel settore del calore» (cfr. sopra)*



*Bibliografia specializzata*



*Indicazioni concernenti i programmi  
per PC*



*Esempi di calcolo*



*Denominazioni, simboli  
ed abbreviature a pagina 55*

Indice *Indice analitico a pagina 56*

**Autori**

Robert Brunner, Dr. Brunner & Partner AG,  
Industriestrasse 5, 5432 Neuenhof

Viktor Kyburz, Infoenergie,  
Kindergartenstrasse 1, 5200 Windisch

**Esperti**

Hanspeter Pfenninger, Konvekta AG,  
9015 S. Gallo

Erich Thoma, F. Hoffmann - La Roche AG,  
4002 Basilea

**Redazione e veste tipografica**

Hans Rudolph Gabathuler, Gabathuler AG,  
Kirchgasse 23, 8253 Diessenhofen

**Grafica**

Monica Ehrat, 8240 Thayngen

**Organizzazione responsabile**

SBHI Società svizzera degli ingegneri consulenti  
per l'impiantistica e l'energia,  
Schermenwaldstr. 10.  
3063 Ittigen

**Patronato**

ATS Associazione tecnici svizzeri  
SITC Società svizzera degli ingegneri termici  
e climatici

ASIRA Associazione svizzera delle imprese  
di riscaldamento e aerazione

VSSH Associazione svizzera dei tecnici sanitari  
e del riscaldamento

ISBN 3-905233-30-4

Edizione originale: ISBN 3-905233-08-8

Copyright © Ufficio federale dei problemi congiunturali,  
3003 Berna, gennaio 1993.

La riproduzione parziale è autorizzata purché sia citata la fonte.  
Il presente manuale può essere ordinato presso l'Ufficio  
centrale federale degli stampati e del materiale (UCFSM),  
3003 Berna ((n. d'ord. 724.355 i)

# Prefazione

Il programma di promozione «Edilizia ed Energia», della durata totale di 6 anni (1990-1995), è composto dai tre programmi d'impulso seguenti:

- PI EDIL - Manutenzione e rinnovamento delle costruzioni
- RAVEL - Uso razionale dell'elettricità
- PACER - Energie rinnovabili.

Questi tre programmi d'impulso sono realizzati in stretta collaborazione con l'economia privata, le scuole e la Confederazione. Il loro scopo è quello di promuovere una crescita economica qualitativa. In tale ottica essi devono sfociare in un minor sfruttamento delle materie prime e dell'energia, con un maggiore ricorso al capitale costituito dalle capacità umane.

Il fulcro delle attività di RAVEL è costituito dal miglioramento della competenza professionale nell'impiego razionale dell'energia elettrica. Oltre agli aspetti della produzione e della sicurezza, che finora erano in primo piano, deve essere dato ampio risalto all'aspetto costituito dal rendimento. Sulla base di una matrice del consumo, RAVEL ha definito in modo esteso i temi da trattare. Oltre alle applicazioni dell'energia elettrica negli edifici vengono presi in considerazione anche i processi nell'industria, nel commercio e nel settore delle prestazioni di servizio. I gruppi mirati sono svariati in modo adeguato: comprendono i professionisti di ogni livello, nonché i responsabili delle decisioni che debbono esprimersi in merito a decorsi ed investimenti essenziali per quanto concerne il consumo dell'energia elettrica.

## **Corsi, manifestazioni, pubblicazioni, videocassette, ecc.**

Gli obiettivi di RAVEL saranno perseguiti mediante progetti di ricerca volti all'ampliamento delle conoscenze di base e - a partire dallo stesso principio - mediante la formazione, il perfezionamento e l'informazione. La divulgazione delle conoscenze è orientata verso l'impiego nella prassi quotidiana e si basa essenzialmente su manuali, corsi e manifestazioni. Si prevede di organizzare ogni anno un congresso RAVEL durante il quale, di volta in volta, si informerà, discutendone in modo esauriente, in merito ai nuovi risultati, sviluppi e tendenze della nuova ed affascinante disciplina costituita dall'impiego razionale dell'elettricità. Il bollettino «IMPULSO», pubblicato due o tre volte all'anno, fornirà dettagli concernenti queste attività ed informerà gli interessati in merito all'offerta di perfezionamento ampia ed orientata a seconda dei singoli gruppi d'interesse. Tale bollettino può essere ordinato in abbonamento (gratuito) presso l'Ufficio federale dei problemi

congiunturali, 3003 Berna. Ogni partecipante ad un corso o ad una manifestazione organizzati nell'ambito del programma riceve una documentazione. Essa consiste essenzialmente della pubblicazione specializzata elaborata a questo scopo. Tutte queste pubblicazioni possono parimenti essere ordinate presso l'Ufficio centrale federale degli stampati e del materiale (UCFSM), 3003 Berna.

## **Competenze**

Per poter fronteggiare questo programma ambizioso di formazione è stato scelto un concetto di organizzazione e di elaborazione che, oltre alla collaborazione competente di specialisti, garantisce anche il rispetto dei punti d'interazione nel settore dell'impiego dell'energia elettrica, nonché dell'assistenza necessaria da parte di associazioni e scuole del settore interessato. Una commissione composta dai rappresentanti delle associazioni, delle scuole e dei settori professionali interessati stabilisce i contenuti del programma e garantisce la coordinazione con le altre attività che perseguono l'uso razionale dell'elettricità. Le associazioni professionali si assumono anche l'incarico di organizzare i corsi di perfezionamento professionale e le campagne d'informazione. Della preparazione di queste attività è responsabile la direzione del progetto composta dai signori dott. Roland Walthert, Werner Böhi, dott. Eric Bush, Jean-Marc Chuard, Hans-Ruedi Gabathuler, Jürg Nipkow, Ruedi Spalinger, dott. Daniel Spreng, Felix Walter, dott. Charles Weinmann, nonché Eric Mosimann, UFCO. Nell'ambito delle competenze ad hoc l'elaborazione viene eseguita da gruppi di progettazione che devono risolvere singoli problemi (progetti di ricerca e di trasformazione) per quanto concerne il contenuto, l'impiego del tempo ed i costi.

## **Documentazione**

Dopo una procedura di consultazione e la prova d'impiego nel corso di una manifestazione pilota, la presente documentazione è stata rielaborata con cura. Gli autori erano tuttavia liberi di valutare, tenendone conto secondo il proprio libero apprezzamento, i diversi pareri in merito ai singoli problemi. Essi si assumono anche la responsabilità dei testi. Le lacune che venissero alla luce durante l'applicazione pratica potrebbero essere eliminate in occasione di un'eventuale rielaborazione. L'Ufficio federale dei problemi congiunturali, il redattore responsabile o il direttore del corso (cfr. p. 2) saranno lieti di ricevere suggestioni a tale proposito. In questa sede desideriamo ringraziare tutte le persone che hanno contribuito alla realizzazione della presente pubblicazione.

# Indice

<b>1. RDC/UCR ed impiego razionale dell'elettricità</b> .....	<b>5</b>	<b>4. Indicazioni concernenti la progettazione</b> .....	<b>33</b>
1.1 La posizione di RDC/UCR nel concetto dell'energia .....	5	4.1 Liste di controllo RAVEL .....	33
Concetti .....	5	Diminuire dapprima il consumo di energia! .....	33
Limiti .....	5	Utilizzazione delle liste di controllo RAVEL .....	33
Misure .....	5	Parametri delle fonti e degli utilizzatori .....	34
1.2 RDC/UCR e RAVEL .....	6	Parametri del raccordo .....	34
Quale è la relazione tra RDC/UCR e RAVEL? .....	6	Aspetti ulteriori del raccordo .....	36
Campi d'applicazione in vista di RAVEL .....	6	Criteri economici .....	36
<b>2. Componenti e sistemi</b> .....	<b>9</b>	Costi esterni .....	37
2.1 Vista d'insieme del sistema .....	9	4.2 Metodi di misurazione .....	37
Categorie .....	9	4.3 Ricerca della soluzione .....	39
Procedimento per RDC da aria di smaltimento .....	9	4.4 Fasi di progettazione .....	40
RDC in impianti industriali per l'aria di smaltimento .....	9	<b>Appendice</b> .....	<b>41</b>
Procedimento per RDC/UCR da gas e da liquidi .....	10	A. Campi d'applicazione .....	41
Circuiti idraulici .....	10	RDC nel settore del comfort .....	41
Regolazione della potenza .....	10	RDC nell'industria .....	41
Pericolo di formazione di ghiaccio .....	11	Impianti della tecnica di ventilazione e di condizionamento per i processi industriali .....	41
Contaminazione .....	11	Impianti frigoriferi .....	41
Energia ausiliaria .....	11	Produzione di aria compressa .....	42
Possibilità di pulitura .....	11	Situazione generale nell'industria .....	42
Dimensioni fornibili .....	14	Esempio industria chimica .....	43
Dati concernenti le prestazioni .....	14	Trasmissione del calore attraverso le barriere di sicurezza .....	44
2.2 Sistemi di ricupero .....	14	Produzione combinata di forza e calore .....	44
Scambiatori di calore a piastre ed a tubi per l'aria .....	14	Impianti ORC .....	44
Scambiatori di calore a piastre per i liquidi .....	15	B. Casi pratici .....	45
Scambiatori di calore a tubi .....	16	Ditta per lo sviluppo dei film .....	45
Impiego degli scambiatori di calore a tubi come condensatori nella tecnica del freddo .....	17	«Raffreddamento debole» .....	46
Impieghi ulteriori degli scambiatori di calore di ricupero .....	17	Freddo di condizionamento in inverno .....	47
2.3 Sistemi rigenerativi .....	18	Interconnessione per la produzione del calore e per il raffreddamento .....	48
Interconnessione di circuiti .....	18	C. Pinch Design Method .....	49
Termocondotta .....	19	D. Liste di controllo RAVEL .....	51
Scambiatori di calore a rotazione .....	19	Lista di controllo RAVEL «Fonte di calore» .....	51
2.4 Pompe di calore e trasformatori di calore .....	20	Lista di controllo RAVEL «Utilizzatore del calore» .....	51
Pompe di calore .....	20	Interconnessione .....	51
Compressione del vapore di scarico .....	21	<b>Denominazioni, simboli, abbreviature</b> .....	<b>55</b>
Trasformatori di calore .....	22	<b>Indice analitico</b> .....	<b>56</b>
<b>3. Basi</b> .....	<b>23</b>		
3.1 Calore residuo .....	23		
3.2 Scambiatori di calore .....	24		
Trasmissione del calore .....	24		
Caduta di pressione .....	25		
3.3 Parametri .....	26		
Rendimenti dello scambio di calore .....	26		
Amplificazione elettrotermica .....	27		
3.4 Dimensionamento ed ottimizzazione .....	27		
Prudenza nel caso di dati concernenti il rendimento della temperatura! .....	27		
Quantità di calore recuperato annualmente .....	28		
Ottimizzazione .....	30		
Massimo ricupero netto d'energia .....	30		
Guadagno finanziario massimo .....	30		
3.5 Redditività .....	31		

# 1. RDC/UCR ed impiego razionale dell'elettricità

## 1.1 La posizione di RDC/UCR nel concetto dell'energia

### Concetti

Il recupero del calore (RDC) e l'utilizzazione del calore residuo (UCR) costituiscono tecniche per l'impiego razionale dell'energia. Essi permettono di sviluppare processi più economici e contribuiscono al rispetto dell'ambiente. RDC ed UCR si differenziano l'uno dall'altro per la trasmissione del flusso del calore residuo per quanto concerne i limiti del sistema (riquadro 1)<sup>1</sup>.

### Limiti

RDC/UCR sono utilizzati praticamente in tutti i settori tecnici. L'accento delle presenti considerazioni è posto su RDC/UCR nel settore dell'impiantistica e su UCR delle fonti di calore della tecnica dei processi per l'impiantistica (tabella 2). L'UCR delle fonti di calore dell'impiantistica per la tecnica dei processi costituisce un fatto raro. RDC/UCR nel settore della tecnica dei processi industriali costituiscono un campo speciale; le necessarie e molteplici condizioni marginali concernenti i processi uscirebbero già dai limiti della presente pubblicazione.

### Misure

L'utilizzazione del calore residuo, in linea di massima, da prevedere solo allorché sono state esaurite tutte le possibilità immaginabili per evitare l'insorgere di calore residuo, nonché per la copertura razionale del fabbisogno di calore. La figura 3 elenca una serie di misure efficaci che nel settore specifico si differenziano per quanto concerne la scelta del concetto. Nel settore industriale si tratta in prima linea della produzione e della sua razionalizzazione. Nel settore delle abitazioni ci si preoccupa invece della preparazione, con il minimo consumo possibile, di calore destinato al comfort.

Una libera scelta di misure concrete in vista dell'utilizzazione razionale dell'energia nel settore delle abitazioni ed in quello industriale, differenziata secondo il dispendio, è rappresentata alla figura 4. Le misure RDC/UCR sono – anche nel caso di costi d'investimento elevati – redditizie in molti casi, cosicché devono sempre essere intrapresi seri studi preliminari qualora si tratti di nuovi impianti e di risanamenti. Per la vera e propria funzione di impianto, RDC/UCR non sono certamente necessari ~~ma è possibile~~ un miglior sfruttamento globale dell'energia.

calcolata come RDC, poiché, si tratta di una riduzione del fabbisogno (minor ricambio d'aria)

#### Ricupero Del Calore, abbreviato in RDC

Il calore residuo che si produce inevitabilmente durante un processo viene addotto allo stesso processo senza ritardo sostanziale. Ideale è la concordanza tra fonte ed utilizzatore per quanto concerne tempo e quantità. Viene così ottenuto un rendimento più elevato dell'impianto.

#### Utilizzazione del Calore Residuo, abbreviato in UCR

Il calore residuo che si produce inevitabilmente durante un processo viene di nuovo utilizzato, contemporaneamente o con ritardo, in un altro processo. Occorre prestare un'attenzione del tutto particolare all'adattamento dell'offerta di calore e del fabbisogno di calore; spesso si rende necessario l'impiego di accumulatori termici. L'utilizzazione globale dell'energia è migliorata con la formazione d'interconnessioni, mentre il rendimento dei singoli impianti non viene tuttavia toccato. Per quanto concerne il luogo di utilizzazione del calore residuo occorre fare una distinzione tra l'utilizzazione all'interno dell'azienda, ma in un altro processo (UCR



Riquadro 1

		Utilizzatori	
		Impiantistica	Tecnica dei processi
Fonti	Impiantistica	<b>RDC UCR</b>	UCR (raramente)
	Tecnica dei processi	<b>UCR</b>	RDC UCR (settore speciale)

Tabella 2: delimitazione tra i settori in cui si lavora; la presente pubblicazione attribuisce la massima importanza al settore evidenziato

<sup>1</sup> Nota: l'aggiunta di aria riciclata negli impianti di ventilazione non è

		Impiego	Dispendio
1.	Evitare il consumo inutile	I	esiguo
	Ridurre il fabbisogno	IMP	esiguo
	Uso	I, IMP	esiguo
	Manutenzione	I, IMP	esiguo
2.	Diminuzione del fabbisogno specifico di energia	I	medio
	Diminuire le perdite	IMP	medio
3.	Aumento del grado di utilizzazione energetica	I	medio
	Regolazione buona	I, IMP	medio
	Utilizzazione del calore diffuso liberamente dalle fonti di calore	I, IMP	medio
4.	Ricupero dell'energia	I	grande
	Ricupero del calore (RDC)	I, IMP	grande
	Utilizzazione del calore residuo (UCR)	I, IMP	grande
5.	Utilizzazione di fonti d'energia rinnovabili	I, IMP	massimo
	Preparazione dell'energia residua (tutela ambiente e risparmio costi)	I, IMP	massimo

Tabella 3: catalogo delle misure principali per l'impiego dell'energia nel settore industriale e dell'abitazione, con indicazione del settore d'impiego e del dispendio (I = industria, IMP = impiantistica)

## 1.2 RDC/UCR e RAVEL

### Quale è la relazione tra RDC/UCR e RAVEL?

Si tratta di un rapporto molto importante! In correlazione con la produzione combinata di forza e calore, RAVEL vorrebbe perseguire una strategia ambientale. Ciò significa che, nonostante la produzione di elettricità con fonti di energia fossili, l'inquinamento dell'ambiente deve essere molto minore di quanto non lo fosse in precedenza. Ciò è possibile se una parte dell'elettricità prodotta mediante la combinazione di forza e calore è utilizzata in amplificatori elettrotermici. Il caso classico di un amplificatore elettrotermico è costituito dalla pompa di calore: a partire da 1 parte di elettricità vengono prodotte circa 3 parti di calore per il riscaldamento. Ma anche gli impianti RDC e UCR costituiscono veri e propri amplificatori elettrotermici: in questo caso, tuttavia, sono raggiunti fattori di amplificazione molto migliori che normalmente da 7 a 25!



Fascicolo 1, capitoli 2.5 e 3.4

### Campi d'applicazione in vista di RAVEL

In considerazione dell'uso razionale dell'elettricità nel settore del riscaldamento si può fare una distinzione in quattro casi come al riquadro 5. I punti da 2 fino a 4 sono importanti per le applicazioni

	Impiantistica	Tecnologia dei procedimenti industriali e di produzione
<b>Miglioramento mediante misure organizzative ed aziendali</b>	Rendere noto il consumo di energia; stabilire i flussi del calore residuo a seconda del tipo, della grandezza, del luogo e della stagione; regolare in modo razionale la proporzione tra l'aria di smaltimento e l'aria di alimentazione; ottimizzare l'esercizio dell'aria riciclata; ridurre le temperature dei locali	Verifica dei processi; analisi del flusso energetico; diminuire la temperatura; controllare i programmi a termine
<b>Miglioramento mediante misure che prevedono un investimento piuttosto modesto</b>	Ridurre le perdite di distribuzione; migliorare il comando e la regolazione; migliorare i rendimenti dei produttori di calore; installare dei temporizzatori	Sfruttamento della condensazione; coibentazione termica delle tubazioni; migliorare la regolazione; motori a regime variabile
<b>Miglioramento mediante misure che prevedono un investimento piuttosto elevato</b>	Ricupero del calore degli impianti di ventilazione e di condizionamento dei locali; sfruttare il calore residuo per la preparazione dell'acqua calda e quale ausilio per il riscaldamento; applicare la tecnica di gestione e di comando dell'impiantistica; utilizzare la refrigerazione libera; utilizzare il calore del condensatore della macchina	Ricupero del calore nel processo; compressione del vapore di scarico; utilizzazione del calore residuo nell'azienda; tecnica di gestione e di comando dei processi industriali; macchine di produzione con un grado di utilizzazione più elevato

Tabella 4: esempi di misure da adottare nel settore dell'abitazione ed in quello industriale

Non tutti i processi elettrici che creano calore permettono un'utilizzazione redditizia del calore residuo. Affinché esista la possibilità di un'utilizzazione proficua il calore deve poter essere accumulato e trasportato con un dispendio minimo. La valutazione delle fonti di calore residuo provenienti dall'elettricità può aver luogo vantaggiosamente sulla base di una lista di controllo (capitolo 4.1 e appendice D). Gli esempi tipici sono costituiti dai trasduttori elettrico-elettrici (trasformatori, elaboratori elettronici), dai trasduttori elettromeccanici (motori, generatori), dai trasduttori elettrochimici (elettrolisi, accumulatori) e dai trasduttori elettrotermici (stufe elettriche), nonché da ulteriori processi elettrici quali le sorgenti luminose, l'elettronica di svago, ecc. Le applicazioni elettrotermiche a bassa temperatura (riscaldamento elettrico, acqua calda, preriscaldamento dell'aria, ecc.) sono i candidati potenziali dell'alimentazione con calore residuo. Qualora esistano fonti di calore residuo e gli utilizzatori non siano suddivisi in unità troppo piccole, l'energia elettrica può essere sostituita in gran parte dal calore residuo. Durante questa sostituzione l'elettricità si trasforma da fonte principale di energia in fonte di energia ausiliaria. Negli impianti RDC/UCR il trasferimento del calore, la trasmissione del calore ed il comando dei flussi termici sono funzioni centralizzate. I componenti ausiliari a ciò necessari (pompe a funzionamento elettrico, ventilatori, ecc.) creano un elevato fabbisogno di elettricità. L'installazione di scambiatori di calore supplementari nelle condotte e nei canali aumenta la perdita di pressione e, di conseguenza, l'assorbimento di potenza elettrica da parte dei mezzi di trasporto utilizzati. Affinché il rapporto tra il calore residuo utilizzato, rispettivamente recuperato, ed il consumo supplementare di energia elettrica sia il massimo possibile, i motori, le pompe ed i ventilatori devono essere utilizzati con il rendimento ottimale.

**Quattro campi d'applicazione principali**

1. Trasformazione in elettricità del calore residuo ad alta temperatura: il vapore ad alta temperatura proveniente dal calore residuo di un processo aziona un generatore di corrente per mezzo di una turbina a vapore.
2. Utilizzazione del calore residuo di processi elettrici: il calore residuo proveniente da un trasformatore di grande potenza è utilizzato per il riscaldamento di locali.
3. Sostituzione di applicazioni elettrotermiche mediante utilizzazione del calore residuo: sostituzione della barra elettrica di riscaldamento nello scaldacqua con uno scambiatore di calore alimentato da calore residuo.
4. Impiego razionale dell'elettricità quale energia ausiliaria negli impianti RDC/UCR: utilizzare motori, pompe e ventilatori con rendimento ottimale.

*Riquadro 5*



## 2. Componenti e sistemi

### 2.1 Vista d'insieme del sistema

#### Categorie

Negli impianti RDC/UCR sono utilizzati quali componenti principali gli scambiatori di calore finché la temperatura delle fonti è superiore alla temperatura degli utilizzatori e le pompe di calore nel caso di condizioni di temperatura inverse. I sistemi sono suddivisi in quattro categorie (tabella 6 e riquadro 7). Tipici esempi di questi moduli RDC/UCR sono presentati nella figura 8.

Il RDC può basarsi su schemi prestabiliti e su apparecchi standardizzati, mentre nel caso dell'UCR i recuperatori ed i rigeneratori devono essere sempre progettati individualmente a causa della molteplicità delle possibilità d'impiego.

Per quanto concerne l'acqua e l'aria, per principio vengono utilizzate diverse tecnologie per i componenti ed i sistemi. L'umidità svolge sempre un ruolo quando si tratta dell'aria. Nel caso dell'acqua si tratta generalmente di sistemi unari, motivo per cui occorre tener conto soltanto dei limiti delle variazioni degli stati di aggregazione.

#### Procedimento per RDC da aria di smaltimento

Una vista d'insieme del recupero del calore dall'aria di smaltimento è indicata alla tabella 10. Ulteriori informazioni sono reperibili nella documentazione seguente:



*Direttiva 89-1 SITC. Recupero del calore negli impianti di ventilazione e di condizionamento. Società svizzera degli ingegneri termici e climatici (SITC), Berna 1983 (può essere ordinato presso: SITC, casella postale 2327, 3001 Berna).*  
*VDI (Associazione tedesca degli ingegneri) 2071. Wärmerückgewinnung in raumluftechnischen Anlagen, Beuth Verlag, Berlin, Köln 1981 (Blatt 1), 1983 (Blatt 2) (reperibile presso: librerie, biblioteche).*

#### RDC in impianti industriali per l'aria di smaltimento

Gli impianti industriali per l'aria di smaltimento lavorano secondo gli stessi principi degli impianti nel settore del comfort. Nel settore molto vasto degli impianti della tecnologia dei procedimenti industriali, negli ultimi tempi il recupero del calore ha acquistato un'importanza viepiù crescente. Oggi esiste una vasta scelta di tecnica di commutazione adeguata, di materiali adatti e di accumulatori termici, nonché di termovettori

Sistema	Tipo	Categoria
Scambiatori di calore a piastre, a tubi ed a nido d'api	Ricuperatore	I
Interconnessione di circuiti, termocondotta	Rigeneratore	II
Scambiatore di calore a rotore	Rigeneratore	III
Pompa di calore ed altri sistemi		IV

Tabella 6: suddivisione dei sistemi RDC per gli impianti di ventilazione e di condizionamento dei locali secondo il tipo e la categoria giusta VDI 2071

#### Concetti

**Ricuperatore:** scambiatore di calore in cui lo scambio di calore ha luogo direttamente attraverso le superfici di separazione.

**Rigeneratore:** scambiatore di calore in cui durante il processo di scambio ha luogo un'accumulazione del calore in un mezzo che funziona da intermediario.

**Categoria I:** procedimento di ricupero con superfici di scambio fisse. Di regola viene trasmesso solo calore sensibile (scambiatori di calore con superfici di separazione).

**Categoria II:** procedimento rigenerativo con superfici di separazione. Sono utilizzati accumulatori termici che assorbono il calore e lo emanano di nuovo. In questo caso gli accumulatori termici sono liquidi o gassosi.

**Categoria III:** procedimento rigenerativo con superfici di contatto. Sono utilizzati accumulatori termici fissi che assorbono il calore o l'umidità oppure entrambi e li emanano di nuovo.

**Categoria IV:** procedimento con pompe di calore. È utilizzato un mezzo refrigerante che trasmette calore grazie all'apporto d'energia.



Per procedimenti ulteriori cfr. capitolo 2.4

Riquadro 7

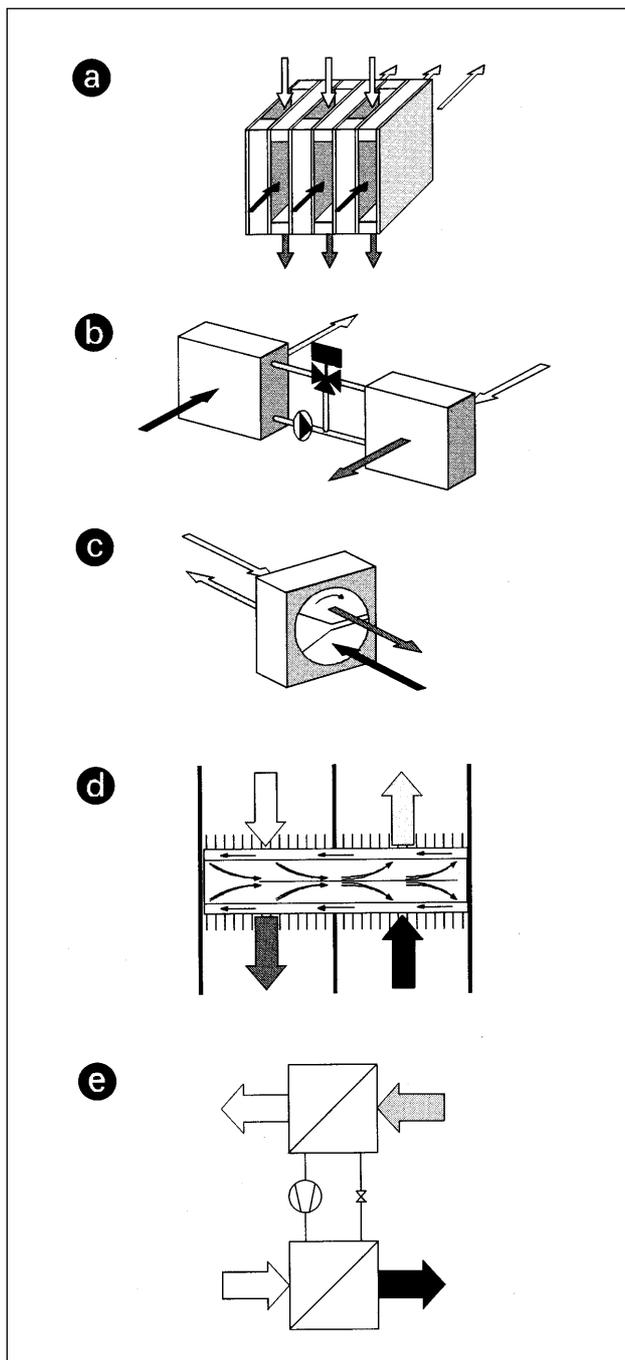


Figura 8: vista d'insieme dei procedimenti concernenti gli scambiatori di calore

- a) scambiatore di calore a flusso incrociato (cat. I)  
 b) interconnessione di circuiti (cat. II)  
 c) scambiatore di calore a rotore (cat. III)  
 d) termocondotta (cat. II)  
 e) pompa di calore (cat. IV)

### Procedimento per RDC/UCR da gas e da liquidi

Contrariamente al procedimento con l'aria di smaltimento, le possibilità d'impiego di RDC/UCR in relazione con mezzi liquidi (tabella 11) non sono note come unità.

Nell'ambito delle misure generali di risparmio energetico degli ultimi anni, l'interesse degli ingegneri si è fissato soprattutto sulle quantità di energia prodotte dalla tecnica del freddo e cedute all'ambiente senza essere utilizzate. Negli impianti frigoriferi può aver luogo in modo semplice un'utilizzazione del calore dei condensatori.

☞ «Impianti frigoriferi» nell'appendice A

### Circuiti idraulici

La figura 9 mostra quattro circuiti idraulici per sistemi interconnessi. Nel circuito A esiste un optimum evidente per quanto concerne la portata:

- nel caso di una portata troppo piccola, la potenza può essere trasferita solo in modo insufficiente
- nel caso di una portata troppo grande, la differenza di temperatura non può essere utilizzata in modo ottimale.

Nei circuiti B, C e D devono inoltre essere prese in considerazione nell'ottimizzazione anche le messe a punto dei valori nominali del regolatore. Per due pompe (circuiti C e D) la portata nel circuito delle fonti non può essere minore di quella del circuito degli utilizzatori, poiché altrimenti subentrerebbe una circolazione difettosa nell'accumulatore.

L'optimum deve essere accertato mediante il calcolo di tutti gli stati d'esercizio tipici. In tal caso occorre tener conto anche dei costi d'investimento e dell'energia ausiliaria. In ogni caso è necessaria un'equilibratura idraulica accurata.

☞ Fascicolo 1, capitoli 4 e 5

### Regolazione della potenza

Onde potersi adeguare alle condizioni della mezza stagione, è auspicabile che in un esercizio ottimale sotto l'aspetto energetico la potenza trasmessa dall'aria di smaltimento all'aria esterna possa essere regolata in modo mirato. La possibilità più conosciuta a questo scopo è costituita da un by-pass dal lato dell'aria esterna. Pure nelle termocondotte una regolazione potrà essere eseguita con successo utilizzando serrande by-pass. Nel caso di scambiatori di calore a rotazione la trasmissione del calore può essere modificata mediante il comando del regime dei giri, in modo tale da adeguare il rendimento al

### Pericolo di formazione di ghiaccio

Nei sistemi della categoria II (interconnessione di circuiti e termocondotte) la ripartizione della temperatura nel canale dopo il RDC è praticamente costante. Nel caso di scambiatori di calore a flusso incrociato essa è invece molto incostante, motivo per cui aumenta il pericolo di formazione di ghiaccio negli angoli. I recuperatori del calore a rotazione presentano le temperature massime nella zona di lavaggio e quelle minime nella parte rotante che si trova di fronte. In caso di formazione di ghiaccio diminuisce lo scambio di calore ed aumenta la caduta di pressione dal lato dell'aria. La formazione di ghiaccio deve perciò essere evitata con un bypass oppure con un preriscaldamento.

### Contaminazione

La contaminazione, ossia una trasmissione di polvere e/o di odori, dovrebbe per quanto possibile essere evitata. Nel caso dei procedimenti con superfici di separazione ciò ha luogo in ogni caso. Gli scambiatori di calore a rotazione lavorano con camere di lavaggio che secondo le più recenti misurazioni presentano tuttavia percentuali di perdita che non devono essere sottovalutate.

### Energia ausiliaria

In tutti i sistemi RDC esistono parti meccaniche che devono essere messe in movimento, motivo per cui è necessario un azionamento elettrico. Con l'impiego di motori a numero di giri regolabile elettronicamente in modo continuo, il consumo di corrente elettrica può essere adeguato, di volta in volta, alla portata richiesta. I procedimenti che richiedono un maggior consumo di energia, quali lo strozzamento dal lato del processo, dovrebbero essere utilizzati solo se non esistono altre possibilità.

### Possibilità di pulitura

La sporcizia dell'impianto dovuta a materiale in sospensione nell'aria viziata costituisce un problema serio, soprattutto negli impianti di ventilazione e di condizionamento delle aziende industriali. L'impiego di prefiltri adeguati è possibile in ogni caso, ma genera una caduta di pressione supplementare e, di conseguenza, un maggior dispendio per l'energia e la manutenzione. Se l'aria viziata è molto sporca è raccomandabile il montaggio di un separatore per polvere grossa (cicloni, deflettori di lamiera, diaframmi) prima dello scambiatore di calore.

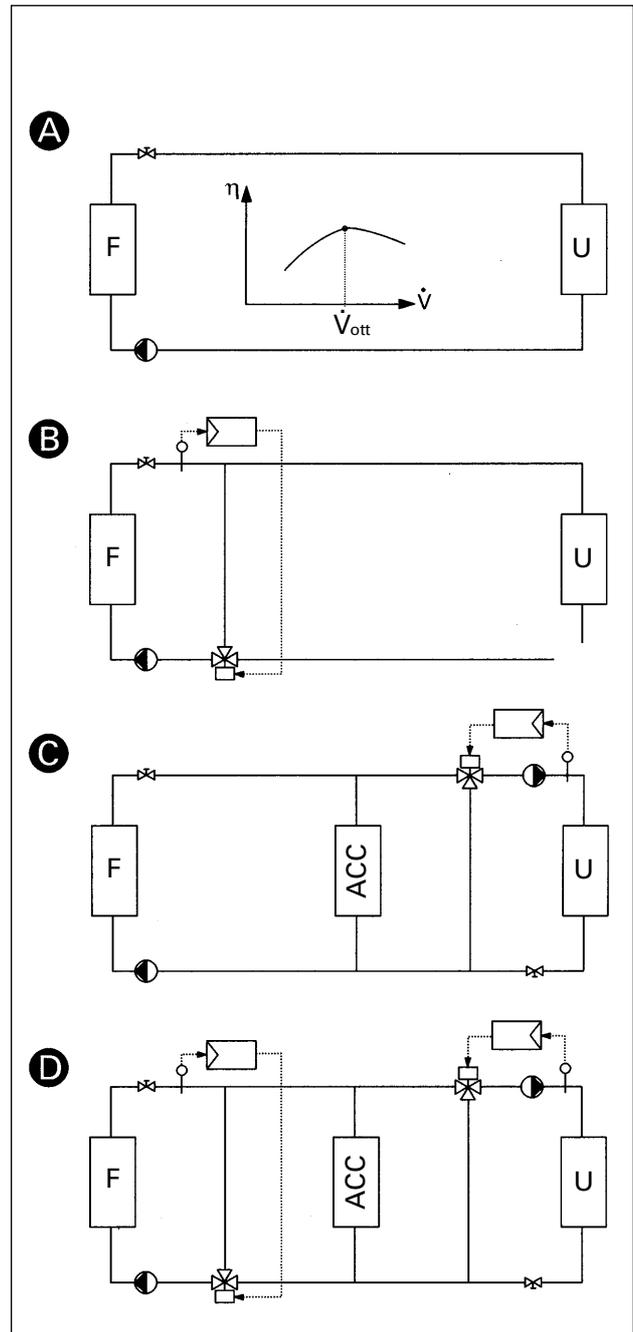


Figura 9: circuiti idraulici; la fonte «F» può per principio essere costituita da uno scambiatore di calore o da una pompa di calore

A) interconnessione non regolata

B) interconnessione regolata

C) interconnessione con accumulatore a carica graduale in parecchi passaggi

D) interconnessione con accumulatore a carica stratificata

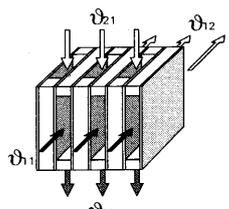
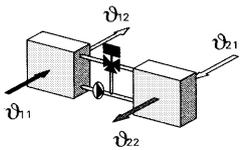
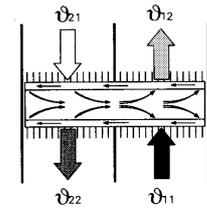
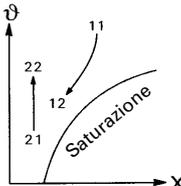
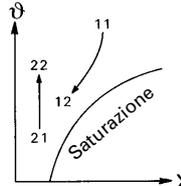
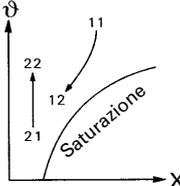
	<b>Ricuperatore</b>	<b>Rigeneratore con superfici di separazione fisse</b>	<b>Rigeneratore con superfici di contatto</b>
<b>Esempio</b>	Scambiatore di calore a tubi di vetro o a piastre	Interconnessione di circuiti	Termocondotta
<b>Figura</b>			
<b>Situazione di montaggio</b>	Correnti d'aria che s'incrociano	Scambiatore di calore qualsiasi, le correnti d'aria possono trovarsi molto lontane l'una dall'altra	Correnti d'aria l'una sopra l'altra o l'una accanto all'altra, non s'incrociano
<b>Diagramma di Mollier</b>			
<b>Regolazione della potenza</b>	By-pass	By-pass, valvola di regolazione	By-pass, inclinazione dello scambiatore di calore
<b>Pericolo di formazione di ghiaccio</b>	Relativamente elevato a causa del flusso incrociato (ripartizione irregolare della temperatura)	Esiguo (regolazione della temperatura con valvola)	Di media grandezza (ripartizione omogenea della temperatura)
<b>Scambio di sostanze</b>	No	No	No, se le lamiere di separazione sono ben ermetizzate
<b>Energia ausiliaria</b>	No	Sì (pompa)	No
<b>Elementi mobili</b>	Valvole by-pass	Pompa	Valvole by-pass, meccanismo di ribaltamento
<b>Volume d'ingombro tipico per 1'000 m<sup>3</sup>/h</b>	1,5 m <sup>3</sup>	0,5 m <sup>3</sup>	0,5 m <sup>3</sup>
<b>Caduta di pressione tipica</b>	150 Pa	120 Pa	120 Pa
<b>Rendimento della temperatura</b>	0,40...0,60	0,40...0,70	0,35...0,60
<b>Costi specifici</b>	Piuttosto bassi per piccole quantità d'aria < 10'000 m <sup>3</sup> /h	Piuttosto elevati	Medi
			Medi

Tabella 10: procedimenti diversi per il ricupero del calore dall'aria (rispettivamente dai gas)

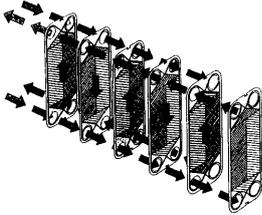
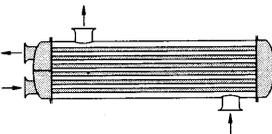
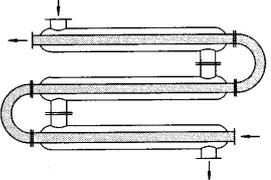
	<b>Scambiatore di calore a piastre</b>	<b>Scambiatore di calore a fascio tubiero</b>	<b>Scambiatore di calore a tubo doppio oppure coassiale</b>
<b>Figura</b>			
<b>Forma costruttiva, principio di funzionamento</b>	Tipo di costruzione compatta, superfici di separazione fisse, piastre profilate, piastre ermetizzate e saldate al telaio con viti di serraggio	Variatore di fase solido/liquido, tubi alettati, nessun scambio di sostanze	Variatore di fase solido/liquido, tubi alettati, nessun scambio di sostanze
<b>Settori di utilizzazione</b>	Chimica, farmacia, impiantistica, tecnica ambientale, industria alimentare e di	Condensatore nella tecnica del freddo o nei processi a vapore	Condensatore nella tecnica del freddo
<b>Materiali</b>	Acciaio per costruzioni, acciaio al cromo-nichel, leghe di alluminio, titanio, nichel, grafite	Involucro di acciaio, tubi alettati di acciaio, rame, cupronichel, ottone	Acciaio, rame, cupronichel, ottone (tubi)
<b>Termovettore</b>	Acqua, olio, glicole, prodotti chimici, raramente vapore o gas	Acqua, vapore acqueo, mezzi refrigeranti	Acqua, mezzo refrigerante
<b>Manutenzione, pulitura</b>	Mediante procedimento di lavaggio o smontaggio delle piastre (relativamente economico)	Semplice nei tubi, per l'involucro soprattutto chimica	Semplice nei tubi, dal lato dell'involucro soprattutto chimica
<b>Limite di temperatura</b>	Fino a circa 150°C, con guarnizioni speciali possibile fino a circa 300°C	Tecnica del freddo fino ad un massimo di 120°C, processi a vapore fino a circa 300°C	Fino ad un massimo di 120°C
<b>Caratteristiche particolari</b>	Potenze da piccole a grandi, peso minimo, buona convezione termica naturale, superficie variabile degli scambiatori, pezzi di ricambio fornibili velocemente	Grandi potenze, all'interno ed all'esterno tubi alettati, buona convezione termica naturale, grandi volumi dei termovettori	Piccole potenze, piccoli volumi per il termovettore, caduta di pressione relativamente elevata
<b>Costi specifici</b>	Da medi ad elevati	Piuttosto elevati	Piuttosto bassi

Tabella 11: procedimenti diversi per il recupero del calore dall'acqua (rispettivamente dai liquidi)

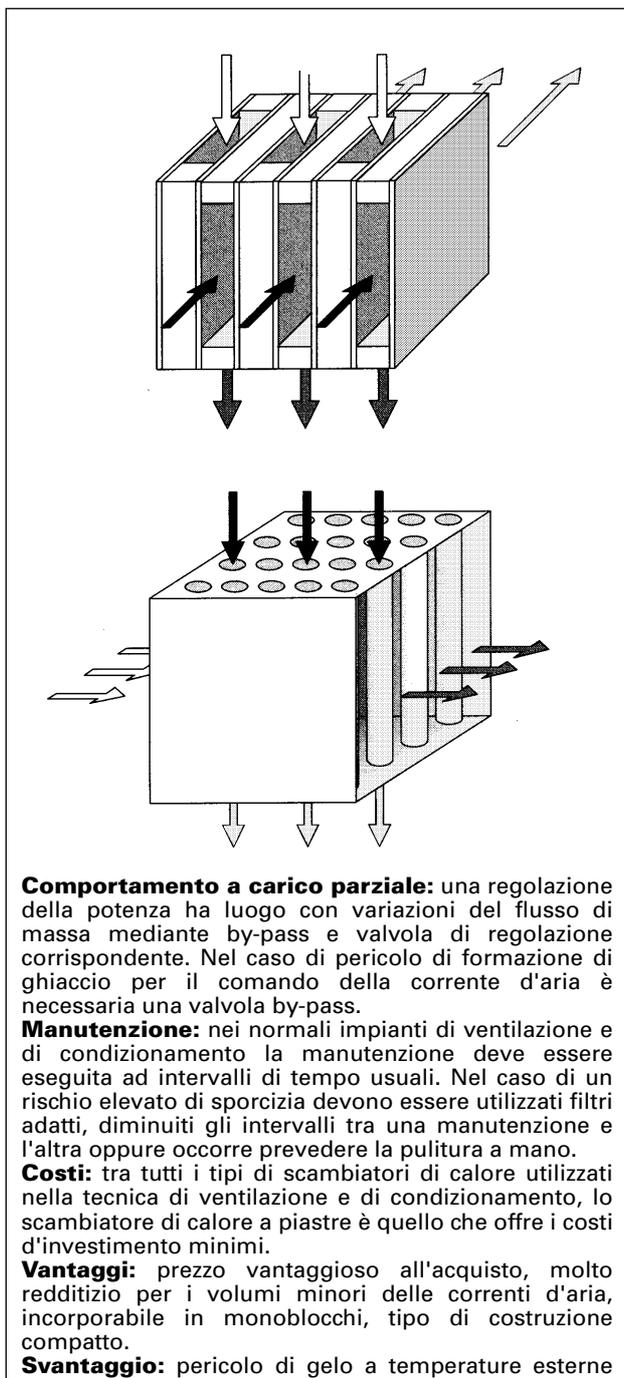


Figura 12: scambiatore di calore a piastre (in alto) e scambiatore di calore a tubi (in basso) per l'aria

### Dimensioni fornibili

Gli scambiatori di calore a piastre ed i rigeneratori a rotazione vengono forniti per sezioni d'entrata e profondità d'installazione di dimensioni differenti e prestabilite. Gli scambiatori di calore per sistemi interconnessi in un circuito e le termocondotte possono essere adattati a qualsiasi tipo di fabbisogno, utilizzando una lunghezza ben determinata del tubo ed una serie di tubi variabili in altezza, nonché una serie di tubi che offrano ampie possibilità per quanto concerne la direzione dell'aria. È possibile l'inserimento in monoblocchi oppure in apparecchi compatti di diverse dimensioni.

### Dati concernenti le prestazioni

I dati riguardanti il volume d'ingombro, la caduta di pressione ed il rendimento della temperatura sono normalizzati nella tabella 10 per gli impianti con 10'000 m<sup>3</sup>/h di aria esterna e 10'000 m<sup>3</sup>/h di aria di smaltimento, onde poter avere a disposizione una base di paragone. Ciò nonostante si presentano evidentemente alcune differenze da fabbricante a fabbricante.

## 2.2 Sistemi di recupero

Nel presente capitolo saranno trattati soltanto i più importanti scambiatori per il recupero del calore, con riferimento ad impieghi RDC e UCR. Oltre a ciò esistono molte altre forme e sistemi di costruzione speciali, come ad esempio gli scambiatori di calore a fascio tubiero, a serpentina, a tubo doppio, a letto fluido, i condensatori, i compressori, ecc. che spesso svolgono compiti speciali nella tecnologia dei procedimenti industriali. Non ci è possibile, in questa sede, entrare in ulteriori dettagli a questo proposito.

### Scambiatori di calore a piastre ed a tubi per l'aria

Come si può facilmente concepire, il funzionamento di questi scambiatori di calore è semplice giacché le valvole by-pass ne costituiscono gli unici elementi mobili. Nello scambiatore di calore a piastre le correnti d'aria calde e fredde, separate da piastre metalliche, si spostano l'una accanto all'altra suddivise in modo preciso in scompartimenti. Un trasferimento d'impurità, di odori, di batteri e di umidità di regola non avviene, ma è tuttavia possibile in caso di condizioni estreme di pressione oppure di scambiatori di calore difettosi. Lo scambiatore di calore a tubi offre una stabilità più elevata, possedendo tuttavia una superficie di scambio minore per un volume uguale. Nella figura

Per il gruppo di scambiatori formato da piastre profilate esistono, a dipendenza dallo scopo cui sono destinati e dal sistema di trasferimento dell'aria, diverse **forme costruttive** e cioè: blocchi da inserire, profili cavi, moduli combinabili liberamente, sistemazione diagonale situata sull'angolo ed estraibile per una manutenzione semplice, ecc.

Il **settore d'impiego** comprende gli impianti di ventilazione e di condizionamento nel settore usuale del comfort, nonché degli ospedali, delle piscine coperte e degli impianti sportivi. A causa della separazione dei materiali esso comprende spesso anche la tecnica di essiccazione degli impianti di verniciatura e la ventilazione dei capannoni industriali.

Quali **materiali** sono utilizzati l'alluminio, le materie sintetiche e l'acciaio inossidabile.

### Scambiatori di calore a piastre per i liquidi

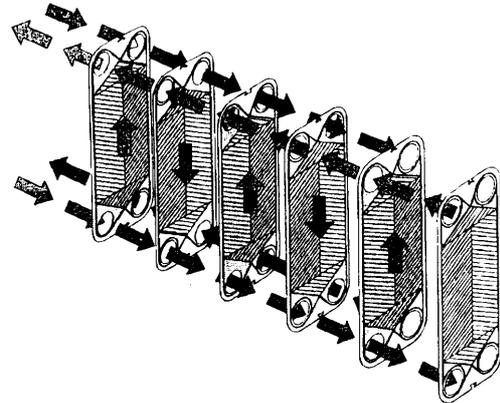
Gli scambiatori di calore sono compatti, di facile manutenzione e resistenti alla corrosione. Per le guarnizioni sono oggi a disposizione materiali più resistenti. È possibile effettuare smontaggi frequenti a scopo di pulitura (ad es. nell'industria alimentare). Per pressioni più elevate le piastre vengono saldate ai bordi oppure nei punti di contatto. Per gli impieghi nella tecnica del freddo gli scambiatori di calore a piastre possono essere utilizzati sia come evaporatori, sia come condensatori (trasformazioni di fase) con sezioni variabili. In esecuzione similare sono utilizzati anche per l'UCR da acqua di scarico fortemente inquinata.

Il **principio di funzionamento** consiste nello scambio di calore attraverso superfici di separazione fisse, senza che abbia luogo uno scambio di sostanze.

Lo scambiatore di calore a piastre presenta una **forma costruttiva** a mo' di pacchetto, a causa della disposizione tipica delle piastre. Queste ultime vengono saldate lungo il perimetro o munite di guarnizioni. Sono inoltre tenute distanti l'una dall'altra per mezzo di una struttura in rilievo. A seconda del circuito idraulico, dimensionato individualmente, le piastre vengono incorporate in un telaio e fissate insieme tra una piastra fissa del telaio ed una piastra mobile del coperchio mediante viti di serraggio (figura 13). A causa del suo elevato coefficiente di trasmissione del calore in un piccolo volume dal peso minimo, lo scambiatore di calore a piastre è spesso

utilizzato negli impianti RDC/UCR. Ulteriori caratteristiche sono descritte nel riquadro 14.

I **settori di utilizzazione** dello scambiatore di calore a piastre sono la chimica, la farmacia,



**Comportamento a carico parziale:** la regolazione della potenza avviene mediante la variazione di uno dei due flussi massici.

**Manutenzione:** a causa della turbolenza elevata esistente nei canali delle piastre, la sporcizia sulle piastre stesse risulta diminuita. Se necessario si può eseguire la pulitura in modo economico con un efficace procedimento di lavaggio. In casi difficili lo scambiatore di calore a piastre può essere smontato completamente. Grazie alla struttura modulare i singoli elementi possono essere sostituiti in modo economico.

**Costi:** il prezzo è determinato essenzialmente dal principio di costruzione, dai materiali utilizzati, nonché dalla superficie dello scambiatore.

**Vantaggi:** tipo di costruzione compatta, nessuna perdita di calore, piccole differenze di temperatura, elevati coefficienti di convezione termica naturale, adattamento flessibile a determinate condizioni, buon rapporto prezzo-prestazioni.

**Svantaggi:** molte guarnizioni, idoneità meno buona nel caso di differenze di temperatura elevate tra il lato primario e quello secondario, sensibilità alla sporcizia in caso in cui fossero presenti particelle solide.

Figura 13: scambiatore di calore a piastre per liquidi

### Dati tecnici scelti di scambiatori di calore a piastre per liquidi

Mezzi primario-secondario: acqua-acqua, acqua-olio, acqua-glicole, liquidi organici ed inorganici, raramente gas o vapore

Campo di temperatura: fino a circa 150°C con guarnizioni normali, 200...300°C possibili con guarnizioni speciali

Campo di portata 5...2'500 m<sup>3</sup>/h

Velocità del mezzo 0,2...2 m/s

Caduta di pressione 10...100 kPa

Valore k 2000...6000 W/m<sup>2</sup>K

Superficie di scambio 1...300 m<sup>2</sup>

Differenza di temperatura

primario-secondario 2...5 K

Rendimento della temperatura 50...90%

Pressione d'esercizio fino a ca 25 bar

Riquadro 14

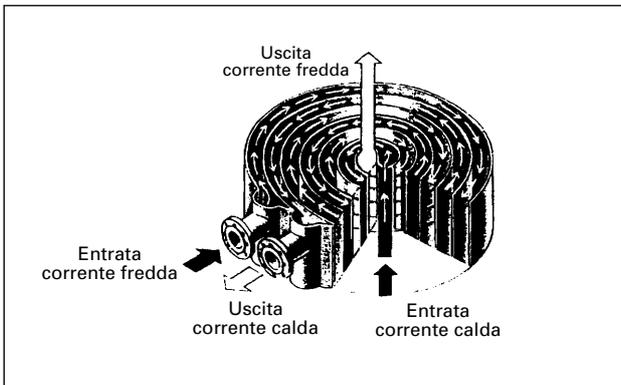
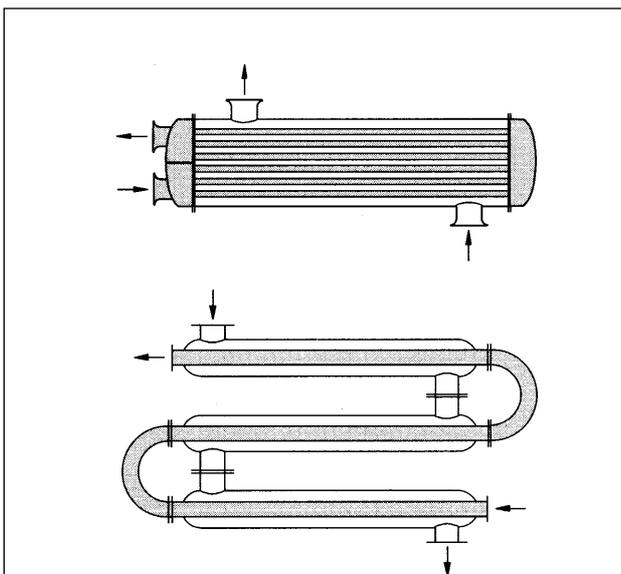


Figura 15: struttura di uno scambiatore di calore a serpentina per liquidi



**Manutenzione:** pulitura semplice nei tubi, difficile dal lato dell'involucro; la pulitura deve aver luogo per lo più chimicamente.

**Costi:** le esecuzioni a fascio tubiero ed a doppio tubo sono più economiche di quelle cilindriche.

**Vantaggi del fascio tubiero:** componenti poco costosi.

**Svantaggi del fascio tubiero:** grande volume dei liquidi, sicurezza limitata contro le perdite.

**Vantaggi del tubo doppio:** necessita di una quantità minore di mezzo refrigerante, forma di costruzione sicura.

**Svantaggio del tubo doppio:** perdita di pressione piuttosto elevata.

Figura 16: scambiatori di calore a tubi; scambiatore di calore a fascio tubiero (in alto) e scambiatore di calore a tubo doppio (in basso)

l'industria alimentare, la tecnica dei processi, quella dell'ambiente, nonché quella di riscaldamento. Gli scambiatori di calore a piastre sono utilizzati di preferenza insieme con liquidi esenti da sostanze solide, ma anche quali evaporatori e condensatori.

A seconda del tipo d'impiego, quale **materiale** sono utilizzati acciaio per costruzioni, acciaio inossidabile, leghe di alluminio, titanio, nichel e grafite; grazie alle superfici di separazione sottili il fabbisogno di materiale è esiguo.

Una forma di costruzione particolare dello scambiatore di calore a piastre è costituita dallo **scambiatore di calore a serpentina**. Esso acquista viepiù importanza, soprattutto quale variante preferita ed economica per RDC/UCR dai flussi dei gas di scarico. Esso presenta caratteristiche simili a quelle dello scambiatore di calore a piastre. La struttura è illustrata alla figura 15.

### Scambiatore di calore a tubi

Utilizzando i tubi quale elemento di base possono essere costruiti diversi tipi di scambiatore di calore. I modelli più frequenti sono lo scambiatore di calore a fascio tubiero e quello a tubo doppio. La struttura di base è visibile alla figura 16.

Il **principio di funzionamento** consiste nello scambio di calore attraverso superfici di separazione fisse che possono essere ampliate sia sul lato primario, sia su quello secondario mediante alette o lamelle. Non ha luogo alcun scambio di sostanze.

La **forma costruttiva** caratteristica risulta dalla sistemazione di un fascio tubiero in una caldaia. Il flusso viene suddiviso nei diversi tubi. Un punto debole è costituito dalla predisposizione alle correnti di fuga tra il fascio tubiero e l'involucro della caldaia, ciò che ne può ridurre fortemente l'efficacia. Tali correnti di fuga sono causate da tolleranze di fabbricazione, ma anche dalle dilatazioni termiche diverse dei singoli elementi alla temperatura d'esercizio. Nei nuovi tipi si è rimediato mediante guarnizioni flessibili sulle lamiere verticali e trasversali. In tal caso si tratta di gruppi elastici costituiti da molle; essi vengono spostati sulla lamiera di separazione senza esservi fissati con delle viti e compensano in questo modo tutte le tolleranze e le dilazioni. Altre innovazioni impediscono la formazione di flussi di fuga nei tubi situati nella zona della piastra tubiera.

Il **campo d'utilizzazione** varia dalla tecnica del freddo fino all'impiego come generatore di vapore

### Impiego degli scambiatori di calore a tubi come condensatori nella tecnica del freddo

Esiste un grande numero di condensatori nella tecnologia dei procedimenti industriali e nella tecnica del freddo. La presentazione che segue si limita perciò ai condensatori della tecnica del freddo raffreddati da liquidi, un settore di particolare importanza per l'UCR (figura 17 e riquadro 18).

La superficie per lo scambio del calore consiste di una quantità di tubi sottili ed in parte alettati da ambedue i lati. Tali tubi sono inseriti in un involucro dalla forma per lo più cilindrica. Nel caso di condensatori raffreddati con liquidi il mezzo refrigerante è attorno ai tubi, mentre il liquido stesso scorre nei tubi. Sono molto impegnativi il calcolo e l'ottimizzazione termodinamici a causa del calcolo poco sicuro della convezione termica naturale nel caso di una variazione di fase del mezzo refrigerante.

Oggi sono utilizzati quasi esclusivamente tubi dalle prestazioni elevate (alettati all'interno ed all'esterno, figura 19) che – grazie alle tecniche di fabbricazione migliorate – presentano la fidezza e la durata di vita usuali. A causa dell'efficacia più elevata, per un volume di costruzione che è contemporaneamente più ridotto, è stato possibile diminuire la quantità necessaria di mezzo refrigerante e, di conseguenza, anche il rischio potenziale per l'ambiente nel caso di una perdita.

### Impieghi ulteriori degli scambiatori di calore di recupero

Per gli scambiatori di calore che sfruttano i gas di scarico nel settore al di sotto del punto di rugiada, per i mezzi corrosivi (ad es. acido clorico, acido fluoridrico o acido solforico) sono utilizzati acciai di tipo speciale. Quale soluzione alternativa possono tuttavia essere utilizzati anche materiali non metallici e resistenti alla corrosione come la grafite, la ceramica oppure le materie sintetiche.

Nella produzione degli apparecchi per la chimica, per i flussi volumetrici piccoli sono spesso utilizzati scambiatori di calore di grafite. Per i grandi flussi volumetrici dei gas combustibili sono state utilizzate di recente strutture speciali a costruzione modulare. Lo spostamento del calore avviene mediante acqua che circola attraverso tubi di grafite.

Agli stessi scopi servono gli scambiatori di calore di materia sintetica flessibile (PTFE, PFA, PVDF). Essi vengono prodotti anche sotto forma di moduli e montati sul cantiere entro telai prefabbricati. Oltre ad un'elevata resistenza alla corrosione le materie sintetiche offrono anche un'elevata protezione

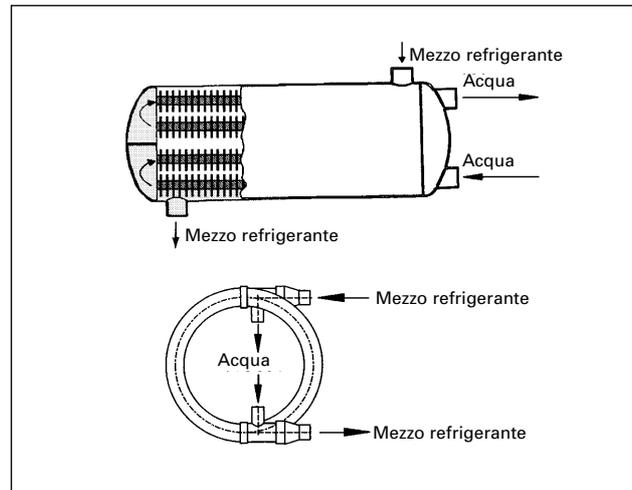


Figura 17: forma costruttiva di condensatori; fascio tubiero (in alto) e tubo doppio o coassiale (in basso)

### Dati tecnici scelti concernenti gli scambiatori di calore a tubi negli impianti frigoriferi

Mezzi	soprattutto acqua e mezzi refrigeranti
Limite della temperatura	fino a ca 120°C
Velocità del mezzo	2...3 m/s
Coefficiente k	300...1200 W/m <sup>2</sup>
Differenza di temperatura dal lato dell'acqua	ca 5 K
Pressione d'esercizio	fino a ca 25 bar

Riquadro 18

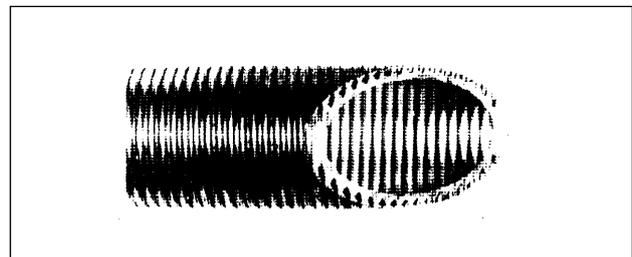


Figura 19: tubo per prestazioni elevate, con alettatura all'esterno ed all'interno

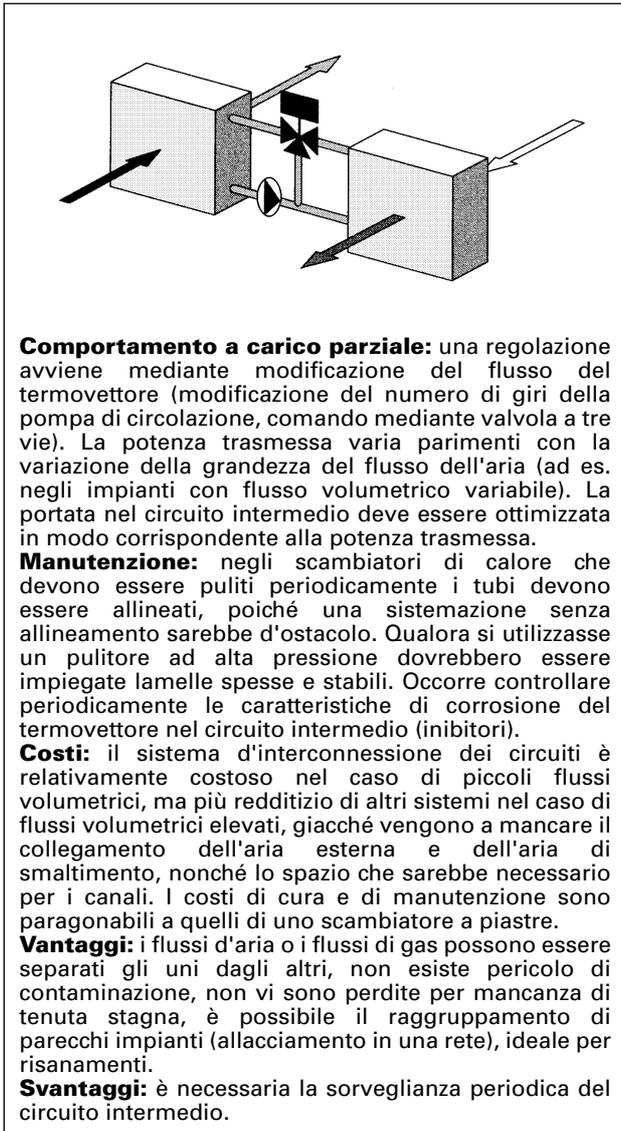


Figura 20: interconnessione di circuiti con due scambiatori di calore separati

contro la sporcizia e sono, di conseguenza, insensibili ai sedimenti di ogni tipo. Esse sono utilizzate fino a temperature d'esercizio superiori ai 200°C.

Per una temperatura elevata superiore a 500°C sono adatti gli scambiatori di calore di ceramica. Questi ultimi sono ancora più interessanti qualora si desideri allo stesso tempo anche una resistenza alla corrosione ed al logorio.

## 2.3 Sistemi rigenerativi

### Interconnessione di circuiti

Lo spostamento indiretto del calore mediante interconnessione di circuiti può essere combinato in diversi modi con altri sistemi. Il calore in eccesso può essere trasportato fino a diversi punti di prelievo che si trovano a distanze variabili. Questa caratteristica è molto importante nel caso di risanamenti e di nuovi impianti. Un aspetto ulteriore è costituito dall'elevata flessibilità del dimensionamento degli scambiatori di calore per quanto concerne l'ottimizzazione (costruzione del blocco degli scambiatori di calore e degli elementi, forma dei tubi, ripartizione degli stessi, diametro, superfici, scelta del materiale).

A seconda del livello di temperatura della fonte di calore residuo, il gestore può utilizzare tale calore in modo ottimale ed adeguato agli scopi che s'impongono come ideali per tale esercizio. Ciò può essere costituito ad esempio dal riscaldamento di aria fresca oppure dell'acqua o, nel caso di calore residuo a temperatura elevata, per la generazione di vapore per il processo di produzione.

Tipico per il **principio di funzionamento** di questo sistema è il circuito intermedio per il trasporto del calore dal lato freddo a quello caldo (figura 20). Attraverso lo scambiatore di calore i due flussi di calore vengono accoppiati in modo recuperativo al circuito intermedio. Il termovettore che circola nel circuito intermedio presenta un comportamento rigenerativo. Esso immagazzina e trasporta il calore.

Un **campo di applicazione** importante è costituito dalla tecnica di ventilazione e di condizionamento. Nel caso di risanamenti esso è spesso l'unica soluzione. In tale occasione vengono utilizzati soprattutto gli scambiatori di calore laminati. Nel caso di un superamento verso il basso del punto di rugiada del flusso dell'aria umida avviene anche il trasporto di calore latente. Non ha luogo alcun scambio di sostanze. D'inverno è necessaria una protezione antigelo. Il mezzo nel circuito intermedio deve essere a prova di gelo (miscela di acqua e di

### Termocondotta

Il **funzionamento** della termocondotta (in inglese detta «Heat Pipe») si basa sui procedimenti di trasporto diversi dei gas e dei liquidi. In un tubo laminato ed ermeticamente chiuso si trova un mezzo refrigerante (FC), che (differente a seconda dell'ubicazione) esiste in ambedue gli stati di aggregazione (figura 21).

Si distinguono due forme costruttive:

- nel caso della **termocondotta verticale** (detta anche termosifone a due fasi oppure termocondotta a gravitazione) il liquido viene riscaldato nel punto più basso, evapora e sale quindi sotto forma di gas verso il punto freddo, in cui si condensa e scorre verso il basso sotto forma di liquido.
- La **termocondotta orizzontale** (esecuzione classica) è provvista di un rivestimento poroso della parete che riconduce il prodotto di condensazione per capillarità.

Il **campo d'applicazione** si estende dall'impiego nelle piscine coperte, negli ospedali, nella tecnica di ventilazione in campo tessile, negli impianti di verniciatura e di essiccazione fino agli impianti per i gas combustibili.

Come **materiale** sono utilizzati alluminio e leghe di rame. Nel caso di gas corrosivi le lamine vengono munite di rivestimenti.

### Scambiatori di calore a rotazione

Lo scambiatore di calore a rotazione è stato sviluppato verso la fine degli anni cinquanta per l'impiego negli impianti di condizionamento americani. Nell'ambito della tecnica di ventilazione e di condizionamento esso fa parte già da anni del normale programma di equipaggiamento. Oggi esso prende vieppiù piede anche nel settore industriale, essendo in grado di recuperare anche l'umidità (calore latente) dai flussi di aria viziata o di gas combustibili, rendendo così possibile l'impiego in un vasto spettro di temperatura mediante nuovi componenti dei materiali.

Il **funzionamento** dello scambiatore di calore a rotazione consiste nel carico e nello scarico alternato, mediante calore ed umidità, di un accumulatore termico a rotazione.

L'accumulatore termico (rotore) ha la **forma** di un cilindro piatto. Questa caratteristica principale conferisce un'impronta alla forma costruttiva. Il rotore gira lentamente e riceve così aria calda da un lato ed aria fredda dall'altro (figura 22). Dal flusso di aria calda egli sottrae calore ed umidità per cederle

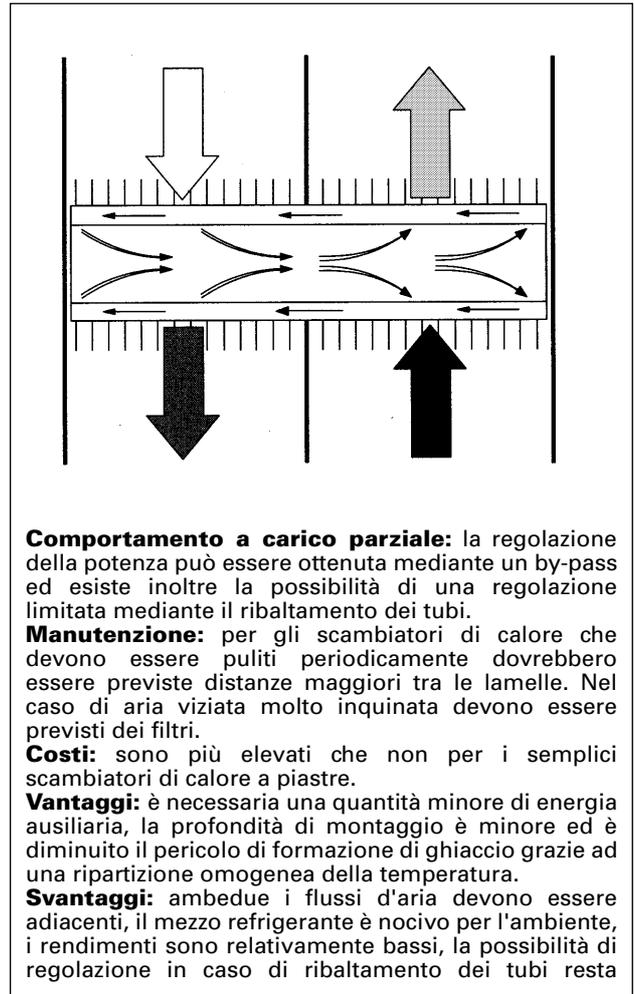
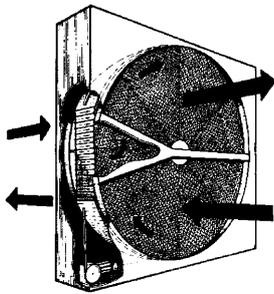


Figura 21: termocondotta



**Comportamento a carico parziale:** la potenza trasmessa e, di conseguenza, la temperatura dell'aria di alimentazione dipende dal regime del rotore e può essere quindi impiegata anche per la regolazione della temperatura dell'aria di alimentazione. Nell'ambito di un regime variabile da 0 fino a circa 10 giri al minuto è possibile ottenere un rapporto di regolazione elevato. Se il regime dei giri del rotore viene diminuito, il rendimento dell'umidità diminuisce in modo notevolmente maggiore del rendimento della temperatura. Ulteriori possibilità di regolazione sono costituite dall'inserimento sequenziale, dall'esercizio intermittente, ecc.

**Manutenzione:** pulizia periodica, controllo ed eventuale regolazione della tenuta ermetica all'aria. Sostituzione della cinghia trapezoidale a seconda del grado di logorio. Le strutture di alluminio a nido d'api devono essere sostituite dopo un periodo variante da 5 a 10 anni. Qualora necessario occorre prevedere filtri adeguati che dovranno essere controllati e puliti.

**Costi:** il tipo di costruzione dispendioso dello scambiatore di calore a rotazione si ripercuote sui costi degli apparecchi che sono più elevati se paragonati a quelli dei sistemi di scambiatori di calore a piastre. Fattori di costo sono: il maggior fabbisogno di spazio per il rotore, i canali, la conduzione dell'aria esterna e dell'aria di smaltimento, la facilità di pulizia, la resistenza alla corrosione, ecc. I costi di manutenzione dipendono dal concetto dell'impianto e dal settore d'impiego.

**Vantaggi:** trasmissione dell'umidità, elevato recupero del calore nel caso di un impiego ottimale.

Figura 22: scambiatore di calore a rotazione con zona di lavaggio

#### Dati tecnici scelti concernenti gli scambiatori di calore a rotazione

Mezzi	aria, gas
Limite della temperatura	0...300°C
Quantità d'aria	1'000...100'000 m <sup>3</sup> /h
Velocità di afflusso	1,5...5 m/s
Perdita di pressione	50...300 Pa
Regime del rotore	0...10 giri/min
Potenza del motore di azion.	0,09...0,75 kW
Dimensioni (diametro)	0,5...5,0 m
Rendimento della temperatura	50...75%
Rendimento dell'umidità	15...75%

Riquadro 23

al flusso di aria fredda. Oggi i rotori sono costituiti prevalentemente da strisce ondulate di alluminio oppure da una struttura a nido d'ape resistenti alla corrosione. I dati tipici concernenti gli scambiatori di calore rotanti sono evidenziati nel riquadro 23.

A causa della struttura geometrica del rotore si manifestano perdite per mancanza di tenuta stagna. Insieme con una caduta di pressione, una zona di lavaggio fa in modo che il flusso dell'aria di alimentazione riceva aria di smaltimento scarsamente inquinata. Per questo motivo, ad ogni modo, si manifestano anche perdite di energia. L'ubicazione dei ventilatori rispetto al rotore svolge qui un ruolo importante.

A seconda del caso di applicazione è auspicabile scambiare anche umidità tra i due flussi d'aria. Si distinguono due tipi di trasmissione d'umidità:

- scambio di sostanze mediante condensazione ed evaporazione. Nel caso in cui la ruota dell'accumulatore non lavori, oltre alla temperatura viene trasmessa umidità solo se il punto di rugiada dell'aria umida è superato verso il basso (rigeneratore a condensazione).
- scambio di sostanze mediante assorbimento e deassorbimento: nel caso di un rivestimento igroscopico (oppure sensibilizzato all'assorbimento) dell'accumulatore termico, oltre al calore sensibile è trasmessa anche umidità (rigeneratore ad assorbimento).

Il settore d'impiego comprende sia gli impianti di ventilazione e di condizionamento dei locali nel settore del comfort ed in quello industriale, sia anche gli impianti che concernono soltanto la tecnica di ventilazione e di condizionamento per i processi industriali. L'impiego è problematico nel caso di aria di smaltimento molto inquinata (cucine, cabine di spruzzatura, polvere proveniente da smerigliatura, chimica, ecc.). Gli accumulatori termici igroscopici possono essere utilizzati solo nel caso di mezzi puliti ed inerti.

## 2.4 Pompe di calore e trasformatori di calore

### Pompe di calore

La trasmissione del calore utilizzando un unico scambiatore di calore è possibile soltanto se la temperatura della fonte di calore è maggiore di quella dell'energia calorifica fornita. Anche l'energia di una fonte di calore di scarso valore può tuttavia essere sfruttata «pomandola» ad un livello di temperatura più elevato con l'ausilio di una pompa di calore.

Mentre nel settore del comfort sono spesso necessari dispendi elevati per lo sfruttamento di una fonte di calore, nel settore dell'artigianato e dell'industria è spesso disponibile calore residuo senza che si renda necessaria l'esecuzione di lavori dispendiosi. È possibile ottenere coefficienti di rendimento elevati nel caso di differenze di temperatura esigue tra il lato «freddo» e quello «caldo» della pompa di calore. In questi ultimi anni la pompa di calore si è imposta anche nell'industria e nell'artigianato.

I **campi d'applicazione** sono molteplici:

- riscaldamento, ventilazione, condizionamento
- riscaldamento dell'acqua
- approvvigionamento energetico integrato (calore-freddo-forza)
- tecnica di essiccazione
- separazione delle sostanze (distillazione, rettificazione)
- concentrazione di liquidi.

Il processo delle pompe di calore può aver luogo in una macchina chiusa in se stessa oppure integrata in un procedimento industriale. Le **tecniche di costruzione** sono rappresentate schematicamente nella figura 24. Nel caso della pompa di calore a compressione e della compressione meccanica del vapore di scarico viene aggiunta energia meccanica quale energia per il funzionamento, mentre è necessario un apporto di energia termica nel caso della pompa di calore ad assorbimento e della compressione del vapore di scarico a getto.

Grazie all'impiego nel settore del comfort **la pompa di calore a compressione** azionata elettricamente è conosciuto il maggior grado di popolarità.



*Fascicolo 1, capitolo 3.2; fascicolo 3*

### Compressione del vapore di scarico

Se invece di un mezzo refrigerante separato nella pompa di calore è utilizzato direttamente il vapore di processo, si parla della cosiddetta compressione del vapore di scarico, che costituisce un tipo di processo aperto. Nel caso della compressione del vapore di scarico, che può aver luogo termicamente o meccanicamente, il vapore di scarico, come si manifesta ad esempio nei processi di evaporazione, è portato ad una pressione elevata con l'ausilio di un compressore. Il vapore di scarico può, di conseguenza, essere riutilizzato per il riscaldamento dello stesso processo. Il vantaggio di questo procedimento consiste nella soppressione dello scambiatore di calore e della differenza di temperatura che ne consegue. Il processo può aver luogo anche a parecchi stadi.

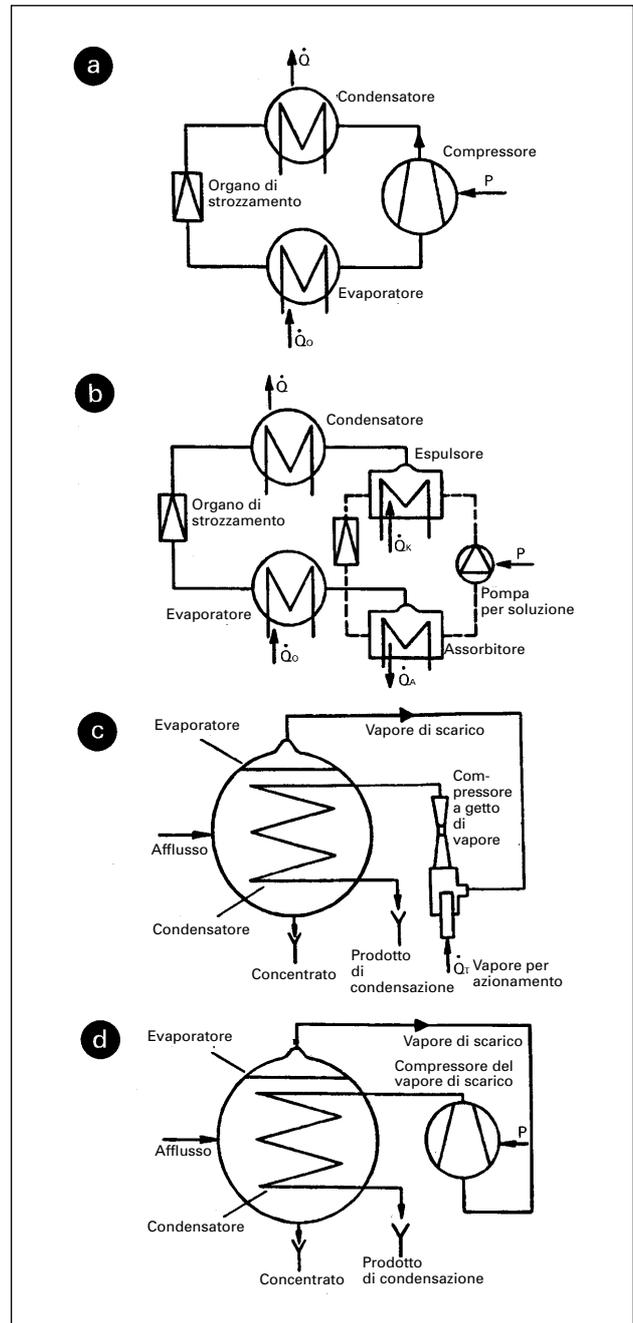


Figura 24: tecnica di costruzione delle pompe di calore; processo PC chiuso (a, b), processo PC aperto (c, d)  
 a) pompa di calore a compressione  
 b) pompa di calore ad assorbimento  
 c) compressione del vapore di scarico a getto  
 d) compressione meccanica del vapore di scarico

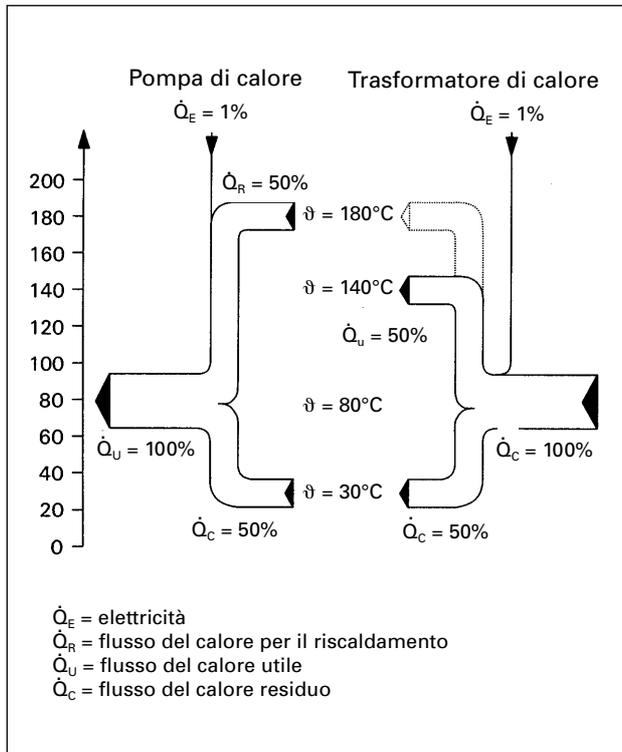


Figura 25: paragone tra i flussi energetici della pompa di calore ad assorbimento e del trasformatore di calore

### Trasformatori di calore

Il sistema di funzionamento delle pompe di calore è noto nelle sue linee essenziali. D'altro canto esiste in generale ancora una grande mancanza di chiarezza per quanto concerne le possibilità d'impiego dei trasformatori di calore. Questi ultimi appartengono, insieme con le pompe di calore meccaniche e chimiche, al gruppo dei sistemi attivi per lo sfruttamento del calore residuo.

La pompa di calore ad assorbimento è in grado di trasformare il calore residuo di un basso livello di temperatura in energia termica utilizzabile e con un livello di temperatura medio, qualora un flusso di calore approssimativamente della stessa grandezza venga portato ad un livello di temperatura elevato. Il trasformatore di calore esegue esattamente il processo inverso, assorbendo calore residuo ad un livello di temperatura medio e suddividendolo press'a poco in due flussi di calore della stessa grandezza, dei quali una metà è liberata a temperatura elevata, onde essere sfruttata, mentre l'altra metà è ceduta ad un utilizzatore del calore ad un livello di temperatura minore. Per l'azionamento del trasformatore è necessaria solo una piccola percentuale di energia elettrica ausiliaria variabile da 1 a 2%.

Nella figura 25 sono rappresentati ambedue i processi a mo' di paragone. Mediante la tecnica delle grandi apparecchiature è possibile elevare la temperatura del calore di processo da 60...110°C fino a 100...160°C, senza che ciò richieda un impiego supplementare di energia. Da alcuni anni in Germania sono in esercizio, con risultati soddisfacenti, parecchi impianti che funzionano a livello industriale.

Da un flusso di calore residuo di 2 MW, offerto sotto forma di vapore di scarico proveniente da una cucina e con una temperatura variabile da 96°C a 100°C, è possibile ottenere circa 1 MW di calore utile a 145°C mediante un trasformatore di calore. Esso è poi riutilizzato per il riscaldamento della cucina.

Ingwersen, H. H. (edit.): *Mehrfachnutzung industrieller Prozesswärme*. Gräfelfing/München, Resch-Verlag, 1986 (reperibile nelle librerie).  
 Schnell H. und B. Thier: *Wärmetauscher. Energieeinsparung durch Optimierung von Wärmeprozessen*. Essen, Vulkan-Verlag, 1991 (reperibile nelle librerie).

# 3. Basi

## 3.1 Calore residuo

La formazione del calore residuo è dovuto a diverse cause (riquadro 26). Al momento del suo sfruttamento occorre fare una distinzione tra calore residuo circoscritto e calore residuo diffuso:

- i **flussi circoscritti** di calore residuo sono combinati con i flussi dei mezzi. Di ciò fanno parte soprattutto i flussi di aria viziata e dei gas combusti, i liquidi refrigeranti, nonché l'entalpia di una sostanza che si sviluppa da un processo. In tal caso occorre distinguere tra calore latente (ad es. condensazione) e calore sensibile (variazione della temperatura).
- Il **calore residuo** diffuso si forma su un'ampia superficie, in prevalenza per irradiazione e per convezione (perdite in superficie da parte d'impianti, perdite per trasmissione in edifici riscaldati).

L'accumulo e lo sfruttamento del calore residuo circoscritto avvengono in modo più semplice che non nel caso del calore diffuso. La figura 27

### Cause della formazione di calore residuo

Durante la produzione di energia pregiata si forma anche energia di scarso valore – la cosiddetta anergia – a bassa temperatura ed a bassa pressione che non può più essere utilizzata ulteriormente.

Nei processi di trasformazione si forma tuttavia anche calore residuo che non è tecnicamente evitabile, ma che può tuttavia essere utilizzato ulteriormente.

Per motivi economico-aziendali o per motivi organizzativi, occorre tuttavia tenere conto del calore residuo che sarebbe di per se stesso tecnicamente evitabile (purtroppo anche per ignoranza o per indifferenza!). Deriva infine calore residuo anche dall'energia utilizzata per il processo (ad es. un prodotto molto caldo che deve essere raffreddato).



*Unicamente l'anergia non può più essere riutilizzata. Le altre forme di energia possono invece essere utilizzate ulteriormente mediante l'impiego di scambiatori di calore e di pompe di calore!*

Riquadro 26

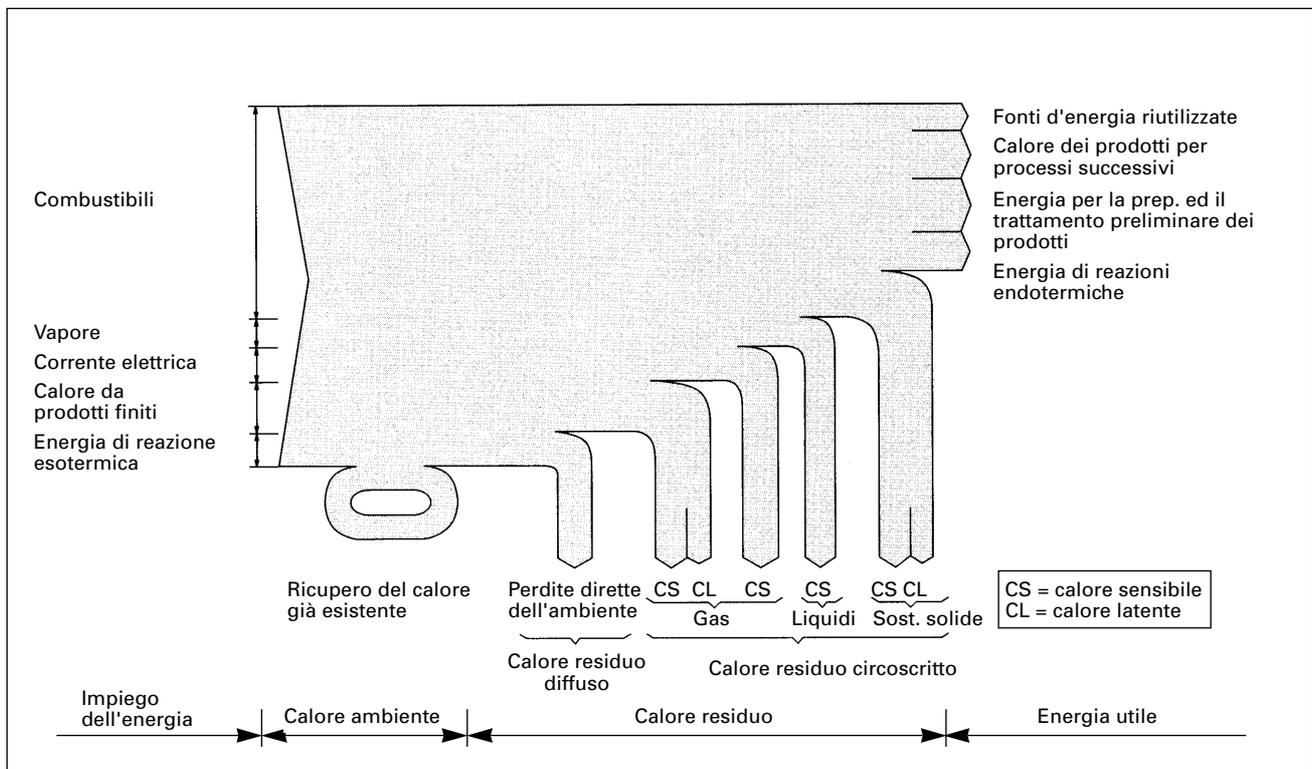


Figura 27: rappresentazione di principio dei flussi energetici e del calore residuo di un processo nel diagramma di Sankey

**Formola degli scambiatori di calore**

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m$$

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\Delta\vartheta_{gr} - \Delta\vartheta_{picc}}{\ln(\Delta\vartheta_{gr} / \Delta\vartheta_{picc})}$$

$\dot{Q}$  = flusso termico [W]

$k$  = coefficiente di trasmissione termica [W/m<sup>2</sup>K]

$A$  = superficie di trasmissione del calore [m<sup>2</sup>]

$\Delta\vartheta_m$  = differenza di temperatura log. media [K]

$\Delta\vartheta_{gr}$  = elevata differenza di temperatura [K]  
(cfr. figura 30)

$\Delta\vartheta_{picc}$  = esigua differenza di temperatura [K]  
(cfr. figura 30)

Il **coefficiente di trasmissione termica  $k$**  non è una grandezza di una sostanza, ma dipende bensì da una molteplicità di fattori, come ad esempio dallo stato di aggregazione del mezzo (vapore, gas, liquido), dalle caratteristiche dello stesso (massa volumetrica, capacità termica specifica, viscosità, conduttività termica), dalle grandezze di stato termodinamiche (pressione, temperatura), dalla velocità di flusso del mezzo, nonché dalle dimensioni e dalla forma geometrica dello scambiatore di calore.

La **differenza di temperatura logaritmica media** (conosciuta anche come «lunghezza termica») rappresenta la differenza di temperatura effettivamente esistente nello scambiatore di calore.

Riquadro 28

Tipo di costruzione	$k$ [W/m <sup>2</sup> K]
<b>Acqua/acqua</b> Scambiatore di calore a tubi Scambiatore di calore a tubo doppio	200...1000 350...1400
<b>Vapore/acqua</b> Scambiatore di calore a tubi (vapore nel tubo) Evaporatore (vapore attorno al tubo)	350...1200 600...1500
<b>Acqua/gas</b> Scambiatore di calore a tubi Caldaia a calore perduto (gas nel tubo)	15...70 15...45
<b>Gas/gas</b> Scambiatore di calore a tubi Scambiatore di calore a tubo doppio	6...35 2...35

Tabella 29: valori indicativi per i coefficienti di trasmissione termica

## 3.2 Scambiatori di calore

### Trasmissione del calore

Ai limiti di due sistemi con temperature diverse avviene uno scambio di calore senza che venga eseguito un lavoro. La grandezza del flusso termico è proporzionale alla superficie che trasmette il calore ed alla differenza di temperatura. Occorre fare una distinzione tra i seguenti processi di trasmissione del calore:

- trasmissione del calore senza modificazione dello stato di aggregazione dei flussi delle sostanze implicate (ad es. gas/gas, liquido/liquido, gas/liquido).
- Trasmissione del calore con modificazione dello stato di aggregazione di almeno uno dei flussi delle sostanze implicate (ad es. evaporazione, condensazione).
- Trasmissione combinata di calore e di sostanza - convezione ed evaporazione (ad es. raffreddamento da evaporazione acqua/aria).

Il tipo di trasmissione di calore e di sostanze dipende dalla direzione del flusso (flusso di uguale direzione, flusso e riflusso, flusso incrociato), nonché dal tipo della superficie di scambio del calore. Occorre fare una distinzione tra:

- **trasmissione del calore indiretta** nel caso dello scambio di calore recuperativo con interazione contemporanea dei flussi delle sostanze in locali contigui e separati da una parete.
- **Trasmissione del calore semi-indiretta** nel caso dello scambio di calore rigenerativo con un'interazione periodica dei flussi delle sostanze in un locale.
- **Trasmissione del calore diretta** mediante contatto diretto dei flussi delle sostanze in un locale. In tal modo la superficie di trasmissione del calore necessaria viene notevolmente ridotta; questo tipo di trasmissione è tuttavia utilizzabile solo in modo limitato.

La figura 30 mostra lo schema di uno scambiatore di calore con le designazioni più importanti di ambedue i flussi dei mezzi. Nella prassi è sufficiente l'impiego delle formule del riquadro 28. A causa delle molte interdipendenze è impossibile stabilire una formula di portata generale per il calcolo del coefficiente di trasmissione termica  $k$ . Quest'ultimo deve essere determinato di volta in volta sulla base di valori empirici oppure mediante tentativi. Nella tabella 29 sono reperibili valori indicativi per diverse applicazioni tecniche. Quale opera di consultazione generale per i calcoli si raccomanda:



VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 6. Aufl. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 1991 (reperibile nelle librerie).

Durante lo scambio di calore si può fare una distinzione tra tre direzioni del flusso: flusso di uguale direzione, flusso e riflusso e flusso incrociato. Nella figura 30 sono rappresentati i decorsi delle temperature sulla superficie di uno scambiatore per flusso di uguale direzione e per flusso e riflusso.

Per il flusso di uguale direzione vale sempre il fatto che la temperatura di uscita del mezzo caldo è più elevata della temperatura di uscita del mezzo freddo. Nel caso di flusso e riflusso ed in condizioni favorevoli si può ottenere una temperatura di uscita del mezzo freddo più elevata della temperatura di uscita del mezzo caldo.

L'efficacia dello scambio di calore e, di conseguenza, del recupero di calore dipende essenzialmente dalla superficie e dal comportamento di trasmissione dell'apparecchio. Il recupero di calore è in tal caso costituito dal rapporto tra il calore scambiato e la differenza dei flussi termici prima dello scambiatore di calore.

La figura 32 illustra l'andamento per uno scambiatore di calore fittizio nel caso di flusso di uguale direzione, flusso e riflusso e flusso incrociato. Nel caso di flusso e riflusso la superficie «1» corrisponde ad un rendimento del 50%. Qualora occorresse aumentare il recupero di calore nello scambiatore di calore ad esempio a 80, risp. a 90%, la superficie necessaria aumenta del fattore 4, risp. 9. Il dispendio per quanto concerne gli apparecchi e, di conseguenza, i costi d'investimento, rispettivamente i costi del capitale, aumenteranno ovviamente in modo notevole. Le altre due curve indicano i rapporti per il flusso incrociato e per il flusso di uguale direzione. La trasmissione del calore è notevolmente ridotta ed a partire dal fattore di superficie 3 il rendimento è quasi costante.

### Caduta di pressione

Per poter superare le perdite di pressione negli scambiatori di calore, nelle tubazioni, nei pezzi sagomati, nei filtri, ecc. è necessaria energia elettrica supplementare. L'energia ausiliaria necessaria che deve essere ottenuta per mezzo del ventilatore o della pompa viene calcolata secondo il riquadro 31.

Per il dimensionamento di un convertitore, rispettivamente di un impianto, è necessaria un'ottimizzazione tra la convezione termica naturale e la perdita di pressione. Quale obiettivo di

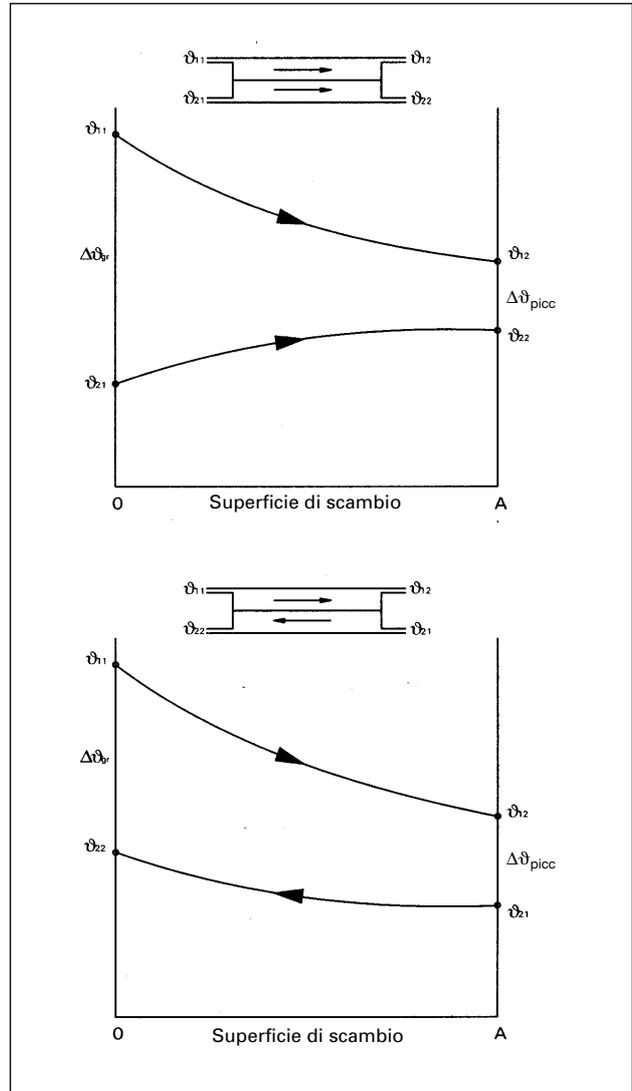


Figura 30: andamento della temperatura nei mezzi in caso di flusso di uguale direzione (in alto) e di flusso e riflusso (in basso)

### Fabbisogno di energia ausiliaria

$$W_{EA} = \frac{\dot{V} \cdot t_F \cdot \Delta p}{\eta}$$

$W_{EA}$  = fabbisogno di energia ausiliaria [J]

$\dot{V}$  = flusso volumetrico [m<sup>3</sup>/h]

$t_F$  = durata di funzionamento [h]

$\Delta p$  = perdita di pressione del sistema (filtro compresso) [Pa]

$\eta$  = rendimento gruppo convogliatore [-]

Riquadro 31

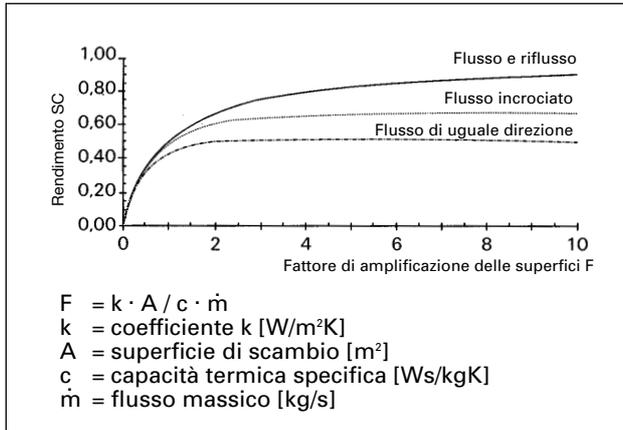


Figura 32: rendimento in funzione del fattore di amplificazione delle superfici (mezzo e flusso massico uguali su ambedue i lati, coefficiente  $k$  costante)

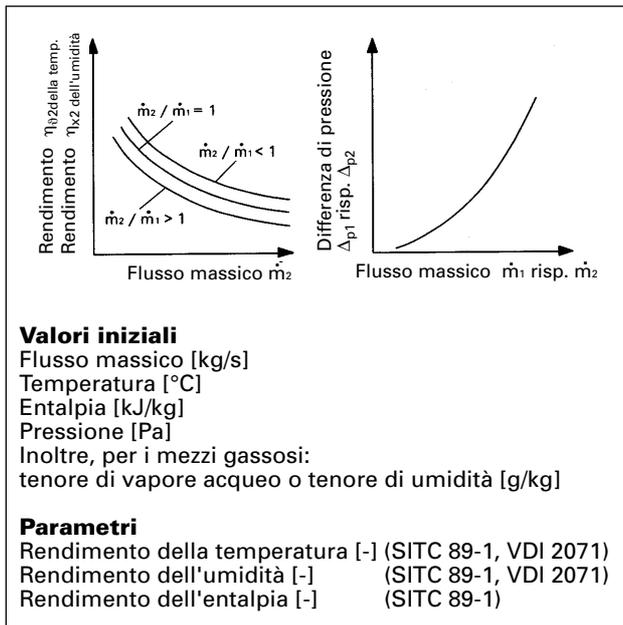


Figura 33: valori iniziali e parametri per i recuperatori del calore

### 3.3 Parametri

I parametri unitari per i recuperatori di calore nei sistemi di ventilazione e di condizionamento sono fissati in direttive e norme (figura 33). I rendimenti servono alla valutazione comparativa nel corrispondente caso di dimensionamento e per il calcolo della redditività. Con l'amplificazione elettrotermica viene valutato l'impiego dell'elettricità nell'impianto RDC/UCR.

#### Rendimenti dello scambio di calore

Dall'equazione del bilancio di uno scambiatore di calore secondo le figure 30 e 34 deriva mediante trasformazione:

$$\eta_{h2} = (\dot{Q}_{22} - \dot{Q}_{21}) / (\dot{Q}_{11} - \dot{Q}_{21})$$

$$\eta_{h2} = \dot{m}_2 (h_{22} - h_{21}) / \dot{m}_1 (h_{11} - h_{21})$$

$$\eta_{h1} = (\dot{Q}_{11} - \dot{Q}_{12}) / (\dot{Q}_{11} - \dot{Q}_{21})$$

$$\eta_{h1} = \dot{m}_1 (h_{11} - h_{12}) / \dot{m}_2 (h_{11} - h_{21})$$

Se i flussi massici e le capacità termiche specifiche sono uguali, anche le tre caratteristiche seguenti sono uguali per ambedue i lati:

rendimento della temperatura

$$\eta_{\theta 2} = (\vartheta_{22} - \vartheta_{21}) / (\vartheta_{11} - \vartheta_{21})$$

$$\eta_{\theta 1} = (\vartheta_{11} - \vartheta_{12}) / (\vartheta_{11} - \vartheta_{21})$$

rendimento dell'umidità

$$\eta_{x2} = (x_{22} - x_{21}) / (x_{11} - x_{21})$$

$$\eta_{x1} = (x_{11} - x_{12}) / (x_{11} - x_{21})$$

rendimento dell'entalpia

$$\eta_{h2} = (h_{22} - h_{21}) / (h_{11} - h_{21})$$

$$\eta_{h1} = (h_{11} - h_{12}) / (h_{11} - h_{21})$$

I rendimenti devono sempre riferirsi al flusso massico che assorbe il calore. Essi dipendono dal tipo di recuperatore termico, dal rapporto del flusso massico e dalle condizioni di funzionamento. Nel settore della tecnica di ventilazione e di condizionamento i paragoni devono sempre basarsi su  $\eta_{\theta 2}$ ,  $\eta_{x2}$  e  $\eta_{h2}$ .

### Amplificazione elettrotermica

Per vincere le resistenze di flusso nell'aria e nell'acqua negli impianti RDC/UCR vengono sempre utilizzati ventilatori e pompe funzionanti elettricamente. I componenti dovrebbero quindi essere sempre dimensionati e funzionare in modo tale che con il dispendio minimo di energia elettrica sia possibile ottenere il maggior calore possibile. Questo rapporto è rappresentato con l'amplificazione elettrotermica (AET) definita nella figura 35. In tal caso si tiene conto del consumo di corrente di tutti i componenti che contribuiscono al guadagno termico. Quest'ultimo può essere calcolato mediante la tabella 37, sulla base delle ore di funzionamento e dei rendimenti.



Un impianto di ventilazione per un ufficio con un fabbisogno di calore annuo di 98'980 kWh viene fatto funzionare, in modo semplificato, in tre regimi:

- regime 1: 1'150 h con 12'000 m<sup>3</sup>/h
- regime 2: 1'150 h con 8'000 m<sup>3</sup>/h
- regime 3: 1'030 h con 6'000 m<sup>3</sup>/h

L'impianto RDC è realizzato sotto la forma di interconnessione di circuiti, con una miscela di acqua e glicole quale termovettore. Mediante un calcolo tipico per una pompa di circolazione ad uno stadio e per una pompa di circolazione azionata costantemente da un convertitore di frequenza esso fornisce i valori della figura 36. Le AET calcolate sulla base di questi valori indicano grandezze diverse per le due esecuzioni:

$$AET_{ad\ uno\ stadio} = 85'100\ kWh / 3'340\ kWh = 25,5$$

$$AET_{costante} = 86'160\ kWh / 2'860\ kWh = 30,1$$

Con l'azionamento regolato in modo ottimale si recupera sempre una quantità maggiore di calore consumando meno corrente elettrica.

## 3.4 Dimensionamento ed ottimizzazione

### Prudenza nel caso di dati concernenti il rendimento della temperatura!

Per motivi di semplicità nella prassi è utilizzato frequentemente il rendimento della temperatura. Esso vale tuttavia soltanto per i flussi massici uguali, le capacità termiche specifiche uguali e senza trasformazioni di fase. Se nella realtà i valori si discostano da queste ipotesi si manifestano errori. A questo proposito ci sia lecito citare due esempi:

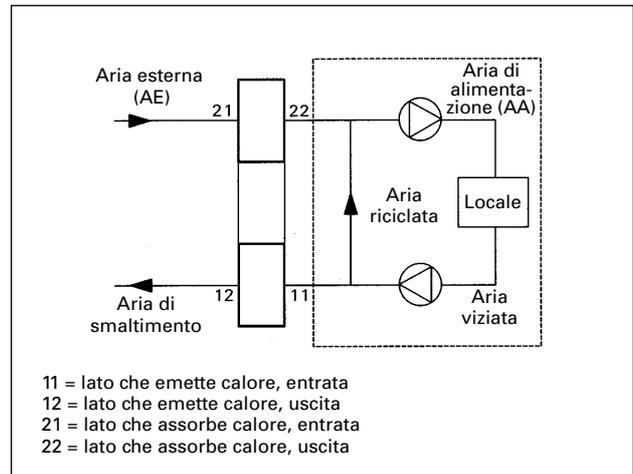


Figura 34: sistema di recupero del calore [fonte: Direttiva SITC 89-1]

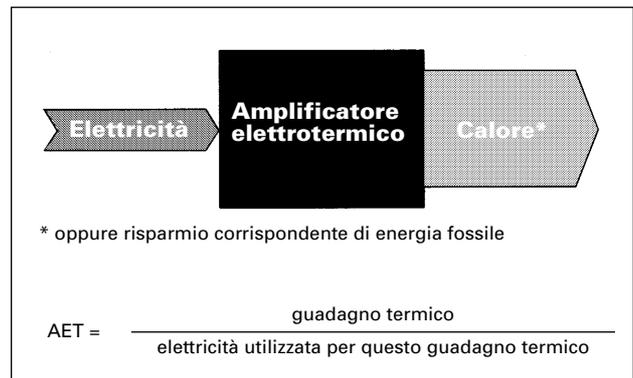


Figura 35: amplificazione elettrotermica (AET)

Regime	Interconn. di circuiti con pompa azionata ad uno		Interconn. di circuiti con pompa azionata	
	RDC [kWh]	EL [kWh]	WRG [kWh]	EL [kWh]
1	39 480	1 930	39 480	1 840
2	28 690	870	28 740	720
3	16 930	540	17 930	300
Totale	85 100	3 340	86 160	2 860

Tabella 36: recupero del calore (RDC) e consumo di energia elettrica (EL) per una pompa di circolazione ad uno stadio ed una pompa di circolazione azionata in modo costante

Ventilatori	$\eta_V$
Ventilatori radiali	
– pale ripiegate in avanti	0,65
– pale ripiegate all'indietro	0,83
Ventilatori assiali con pale ad alto rendimento	0,85
Ventilatori elicoidali	0,80
Ventilatori semplici da parete	0,60
Motori	$\eta_M$
0,2 kW	0,63
0,5 kW	0,70
0,8 kW	0,73
1,2 kW	0,78
5 kW	0,85
10 kW	0,88
20 kW	0,90
50 kW	0,92
100 kW	0,93
1000 kW	0,95
<b>Rendimento globale <math>\eta = \eta_V \cdot \eta_M</math></b>	

Tabella 37: rendimenti di motori e ventilatori

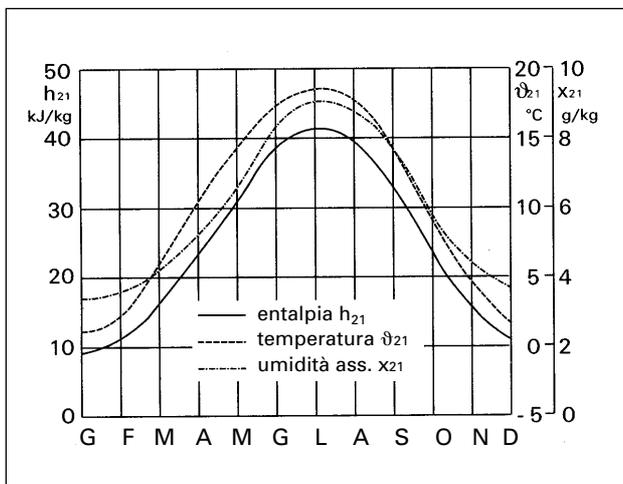


Figura 38: valori medi per entalpia, temperatura e tenore di vapore acqueo dell'aria esterna

 Con un sistema RDC dall'aria di una piscina coperta viene trasferita all'aria di alimentazione una parte del calore residuo. Le quantità di aria di alimentazione e di aria viziata sono dello stesso ordine di grandezza. Vengono dati i seguenti stati: temp. dell'aria viziata = 32°C; umidità = 15 g/kg temp. dell'aria esterna = -10°C; umidità = 1 g/kg Mediante il ricupero del calore l'aria esterna viene riscaldata fino a 21,5°C. Per un'uguale sottrazione di entalpia l'aria viziata viene invece raffreddata solo a 14°C. Da queste cifre risultano i seguenti valori per i rendimenti della temperatura:

$$\eta_{\theta 1} = 43\%$$

$$\eta_{\theta 2} = 75\%$$

Benché le quantità d'aria siano le stesse, i rendimenti sono diversi poiché al momento del superamento verso il basso del punto di rugiada si è formata condensazione e si è quindi sprigionato calore dovuto all'evaporazione. Il raffreddamento dell'aria umida è quindi minore di quanto non lo sarebbe stato nel caso di aria completamente secca.

 Il calore residuo nell'acqua di scarico di una concerica, presentante una temperatura di 35°C, viene utilizzato per preriscaldare l'acqua industriale mediante uno scambiatore di calore a fascio tubiero. Vengono raffreddati 5 m³/h a 23°C. Il riscaldamento di 3 m³/h avviene da 8 a 28°C. I rendimenti della temperatura sono di conseguenza:

$$\eta_{\theta 1} = 44\%$$

$$\eta_{\theta 2} = 74\%$$

Anche ciò sfocia naturalmente in un risultato errato poiché i flussi massici sono di grandezza diversa.



Nel caso di flussi massici disuguali, di capacità termiche specifiche dissimili e di trasformazioni di fase deve essere utilizzata la formula del rendimento dell'entalpia.

### Quantità di calore recuperato annualmente

Negli impianti di ventilazione e di condizionamento non si può partire, come nel caso di altri impianti tecnici, da un andamento del carico stazionario, ma esiste bensì un decorso sinusoidale dello stato dell'aria esterna durante l'anno (figura 38). Il calcolo del calore recuperato annualmente può aver luogo sia con l'ausilio delle temperature mensili medie del punto in cui è ubicato, di volta in volta, l'impianto RDC, sia mediante frequenze cumulative per la temperatura e l'umidità. Queste frequenze cumulative possono essere reperite nei documenti seguenti:



Documentazione SIA DO12: *Meteodaten für die Haustechnik*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), 1987 (si può ordinare presso: SIA, casella postale, 8039 Zurigo).  
 Direttiva SITC 83-2: *Betriebskostenberechnung lufttechnischer Einrichtungen*. Bern: Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima – Ingenieuren (SWKI), 1983 (si può ordinare presso: SWKI, casella postale 2327, 3001 Berna).

Il ricupero di calore annuo per la valutazione economica degli impianti dipende oltre che dalla situazione meteorologica anche dallo stato dell'aria viziata, dai flussi volumetrici dell'aria con le ore di funzionamento corrispondenti, dalla temperatura massima dell'aria di alimentazione (ed eventualmente umidità), nonché dal sistema RDC scelto (figura 39). Il decorso sinusoidale annuo dello stato dell'aria esterna permette che anche il guadagno momentaneo sia soggetto a variazioni elevate. Nel caso di calcoli comparativi occorre quindi fare in modo che gli stati dell'aria viziata siano di volta in volta uguali.

Quale punto di riferimento per le energie annue possibili nel caso di un funzionamento sull'arco delle 24 ore serve la tabella 40. Per la conversione di rendimenti ed ore di funzionamento può essere utilizzata la formula seguente:

$$q_{\text{nuovo}} = f \frac{q_{\text{vecchio}} \cdot \eta_{2,\text{nuovo}} \cdot t_F}{\eta_{2,\text{vecchio}} \cdot 24 \text{ h}}$$

- $q_{\text{nuovo/vecchio}}$  = quantità di calore spec.  
 [kWh/a per 1000 m<sup>3</sup>/h d'aria]  
 $f$  = fattore di correzione 0,87...1,04 [-]  
 $\eta_{2,\text{nuovo/vecchio}}$  = rendimenti [-]  
 $t_F$  = nuova durata di funzionamento giornaliero [h]

Il fattore di correzione  $f$  tiene conto della situazione e delle ore di funzionamento. Può variare da 0,87 (funzionamento dalle ore 7 alle ore 17) a 1,04 (funzionamento dalle ore 18 alle ore 24).

In condizioni di funzionamento costante, per gli impianti che non dipendono dalla temperatura esterna sono sufficienti pochi dati di funzionamento della fonte di calore residuo per il calcolo del ricupero del calore annuo.

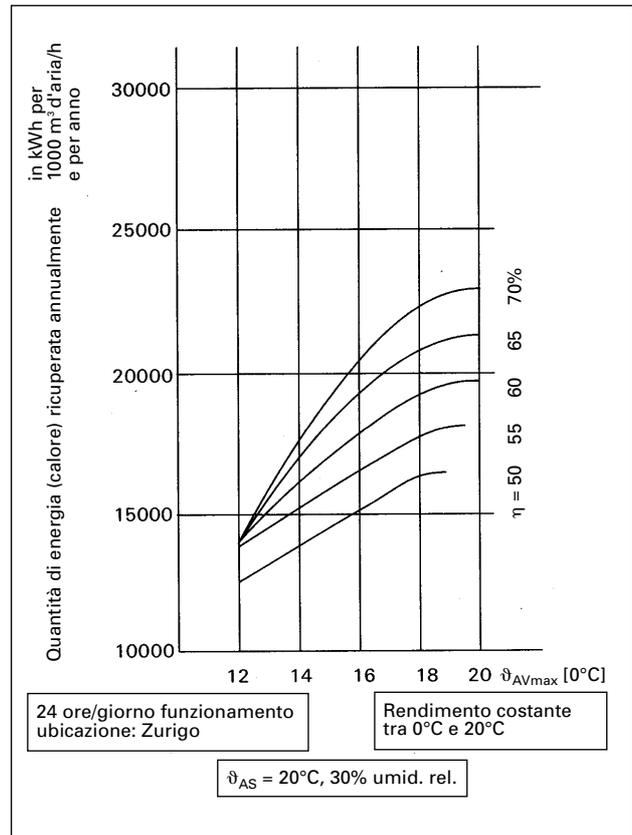


Figura 39: ricupero del calore per rendimenti diversi con funzionamento a secco ( $\vartheta_{11} = 20^\circ\text{C}$ ; 30% umid. rel.;  $x_{11} = 4,5 \text{ g/kg}$ ) [fonte: direttiva SITC 89-1]

	Caso A	Caso B
Temperatura aria viziata	20°C	24°C
Temperatura aria alimentazione	20°C	24°C
Rendimento	60%	60%
Ore di funzionamento	ore 7 - 19	ore 7 - 19
Ricuperatore I	9,2 MWh/a	12,3 MWh/a
Rigeneratore II	9,2 MWh/a	12,3 MWh/a
Rigeneratore III	9,4 MWh/a	12,5 MWh/a

Tabella 40: guadagno termico per un funzionamento sull'arco di 12 ore senza eliminazione dell'umidità per 1000 m<sup>3</sup>/h

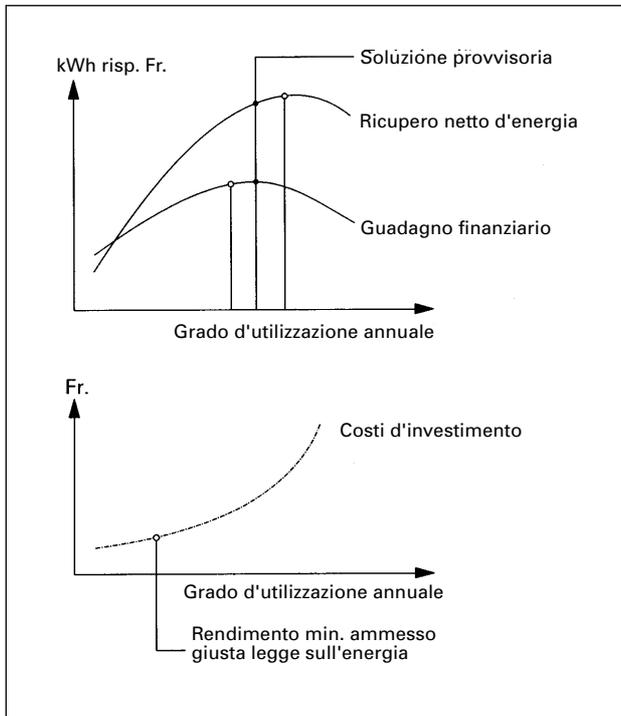


Figura 41: criteri di ottimizzazione rappresentati qualitativamente [fonte: direttiva SITC 89-1]

### Ricupero netto d'energia

Esso è calcolato partendo dal ricupero d'energia totale (calore)  $RE_{TOT}$ , dedotto il consumo di energia elettrica ausiliaria  $W_{EA}$  (ventilatori, pompe, motori ausiliari) ed il fabbisogno energetico per perdite d'aria  $W_{PA}$ . Qualora si scegliesse un periodo di osservazione di un anno ne risulterebbero valori annui.

$$R_{EN} = RE_{TOT} - W_{EA} - W_{PA}$$

### Grado di utilizzazione secondo SITC 89-1

Il rapporto tra il ricupero netto d'energia annuo  $R_{EN}$  ed il fabbisogno annuo di energia termica  $Q_{TOT}$  fornisce il grado di utilizzazione dell'impianto.

$$\eta = R_{EN} / Q_{TOT}$$

Riquadro 42

### Ottimizzazione

Un sistema RDC/UCR può essere ottimizzato secondo i due criteri seguenti (figura 41):

- massimo ricupero netto d'energia
- massimo guadagno finanziario (massima rendita del capitale).

Il massimo del ricupero netto d'energia ha luogo per lo più, in paragone con il guadagno finanziario massimo, nel caso di un grado elevato di utilizzazione annua. Gli investimenti aumentano corrispondentemente al ricupero, rispettivamente al grado di utilizzazione. La durata di vita di un impianto RDC varia normalmente da 10 a 20 anni.

### Massimo ricupero netto d'energia

Per i calcoli in vista dell'ottimizzazione, rispettivamente della scelta d'impianti RDC/UCR deve essere determinante il ricupero massimo d'energia. Nel corso di questo procedimento viene sottratto il dispendio supplementare di energia complementare e di energia ausiliaria dal ricupero del calore mediante una ponderazione adeguata. Vedi anche riquadro 42.

### Guadagno finanziario massimo

Con questo calcolo è possibile ottimizzare sia i costi d'esercizio, sia quelli d'investimento.

Velocità più elevate dell'aria nello scambiatore di calore portano bensì alla realizzazione di apparecchi più piccoli, rispettivamente ad investimenti minori, ma richiedono per lo più un dispendio notevolmente maggiore di energia ausiliaria. Con ciò diminuiscono sia il guadagno netto, sia la redditività, specialmente nel caso di un aumento dei prezzi dell'energia.

Qualora un impianto sia previsto solo per un funzionamento di breve durata (ad es. impianto provvisorio), nel calcolo in vista dell'ottimizzazione occorrerà tener conto di questa durata di vita. In questo caso è spesso sufficiente il rendimento minimo richiesto dalla legge sull'energia.



Al momento attuale non esistono programmi per computer riguardanti l'ottimizzazione di sistemi RDC/UCR. Esistono tuttavia ditte che sono in grado di offrire, quale prestazione di servizio, il calcolo del fabbisogno energetico annuo, del ricupero annuo netto d'energia e del grado di utilizzazione (ad es. Konvekta AG, S. Gallo).

### 3.5 Redditività

Tutti i sistemi RDC/UCR implicano da un lato risparmi notevoli di energia, causando tuttavia dall'altro costi d'investimento e maggior dispendio per l'esercizio, cosicché i diversi dati di fatto possono essere valutati quantitativamente l'uno rispetto all'altro solo mediante calcoli di redditività. La redditività è valutata sulla base dei costi che insorgono annualmente. Questi ultimi comprendono i costi del capitale (a dipendenza dagli investimenti e dai tassi d'interesse), i costi d'esercizio (per cura, manutenzione) ed i costi dell'energia (proporzionalmente al consumo energetico e a dipendenza dal prezzo specifico dell'energia). Tra parecchie varianti viene scelta quella che presenta i costi annui minori.

Nella tabella 44 sono riassunti i costi d'investimento per diversi componenti RDC/UCR nel settore della tecnica di ventilazione e di condizionamento. Nella tabella 45 sono citati i costi d'esercizio basati sull'impiego dell'impianto.



*Casi pratici nell'appendice B*

Occorre tener conto soprattutto dei costi dell'energia risparmiata e di quelli dell'energia complementare necessaria.

Occorre tener conto, in modo particolare, dei costi seguenti concernenti gli investimenti supplementari:

- apparecchi (scambiatori di calore, filtri, regolazione, tracciato dei canali, risp. delle tubazioni)
- allacciamenti elettrici e sanitari
- fabbisogno di spazio supplementare
- misure edilizie complementari
- onorari.

D'altro canto vi sono i risparmi sui costi, ad esempio per:

- produzione di energia (calore e freddo)
- distribuzione dell'energia (piccole tubazioni e canali)
- aerotermini di piccole dimensioni
- soppressione del preriscaldatore (compresi il raccordo e la regolazione).

L'influsso delle grandezze seguenti sulla redditività a lunga scadenza di un impianto RDC/UCR deve essere determinato mediante un'analisi della sensibilità:

- prezzi dell'energia
- evoluzione dei prezzi dell'energia
- periodi di ammortamento

Sistema RDC	Energia elettrica	
	Pompa, motore	Ventilatore
<b>Sistemi ad aria:</b>		
ricuperatore	-	3...6 %
interconnessione di circuiti	1...3 %	3...7 %
termocondotta	-	3...5 %
rigeneratore	0,2...2 %	2...4 %
<b>Sistemi ad acqua:</b>		
ricuperatore	< 1 %	-
interconnessione di circuiti	< 1 %	-

Tabella 43: quote di energia elettrica in % del ricupero del calore di diversi sistemi RDC/UCR

Scambiatori di calore	Costi per piccoli flussi volumetrici d'aria	Costi per grandi flussi volumetrici d'aria
Scambiatori di calore a piastre	Piuttosto bassi	-
Scambiatori di calore a rotore	Medi	Medi
Interconnessione di circuiti	Piuttosto elevati	Piuttosto bassi

Tabella 44: graduatoria dei costi relativi di diversi sistemi di scambiatori di calore. La graduatoria è diversa a seconda del flusso volumetrico dell'aria

Sistema di costruzione	Utilizzazione [anni]	Manutenzione [%]	Impiego [%]
Scambiatori di calore a piastre			
- alluminio	10	1	2
- materiale resistente alla corrosione	20	1	2
Interconnessione di circuiti	20	2	2
Scambiatori di calore a rotazione con superficie di	12	4	3
Scambiatori di calore a rotazione rivestiti	20	3	3
Pompa di calore	10	4	3

Tabella 45: durata di utilizzazione e fattore di costo dei sistemi RDC

- costi d'investimento (specialmente per investimenti supplementari)
- costi d'esercizio (energia e manutenzione).



*La conoscenza del ricupero netto d'energia costituisce il presupposto di ogni ottimizzazione di sistemi RDC/UCR. La direttiva della SITC raccomanda per gli impianti della tecnica di ventilazione una velocità d'ingresso minore di 2 m/s sulla superficie attiva dello scambiatore. La velocità di 2,5 m/s per i recuperatori e l'interconnessione di circuiti e di 3 m/s per gli scambiatori di calore a rotazione non dovrebbe essere superata per motivi energetici.*

Nel calcolo classico della redditività non si tiene conto dell'inquinamento dell'ambiente. Per tale inquinamento può essere stabilita una cifra mediante un supplemento del prezzo per le diverse fonti d'energia ed i diversi sistemi energetici che sarà quindi riportata sotto questa forma nei calcoli della redditività. Esempi di supplementi di prezzo ed ulteriori indicazioni sono reperibili in:



*RAVEL è convincente. Manuale pratico per i calcoli della redditività. Berna: Ufficio federale dei problemi congiunturali, 1991 (si può ottenere presso: UCFSM, 3003 Berna).*

## 4. Indicazioni concernenti la progettazione

### 4.1 Liste di controllo RAVEL

#### Diminuire dapprima il consumo di energia!

Ogni azienda industriale o artigianale si trova presto o tardi confrontata con il compito di verificare in modo critico i propri consumi energetici. È questo il momento per prendere in considerazione le possibilità del recupero energetico oppure dello sfruttamento del calore residuo (riquadro 46).

Prima di adottare, tuttavia, misure edilizie oppure concernenti gli apparecchi dovrebbero essere esaurite tutte le altre possibilità che sono atte a diminuire il fabbisogno energetico.

#### Utilizzazione delle liste di controllo RAVEL

Per permettere una procedura sistematica, RAVEL ha allestito una lista di controllo delle fonti e degli utilizzatori<sup>2</sup>. Questa lista permette di trovare i rapporti migliori tra produttori (fonti) ed utenti (utilizzatori) sulla base di criteri termodinamici e



*Modelli con spiegazioni nell'appendice D*

La situazione iniziale delle applicazioni RDC/UCR può essere suddivisa secondo il riquadro 47. Per i nuovi impianti la catalogazione delle fonti e degli utilizzatori avviene teoricamente a tavolino e per quelli già esistenti viene allestito sul luogo un inventario delle fonti e degli utilizzatori. La successione nella ricerca degli utilizzatori è la seguente:

- utilizzatori all'interno del processo (RDC)
- utilizzatori all'interno dell'esercizio (UCR interni)
- utilizzatori esterni (UCR esterni).

Esempi di disposizioni sistematiche sono reperibili nella figura 48 e nelle tabelle 49 e 50.

In casi evidenti (da 1 a 2 paia di utilizzatori-fonti) le possibilità sono rapidamente esaurite con un pizzico d'esperienza e sulla base delle grandezze di collegamento.

Qualora siano offerte parecchie possibilità, il miglior adattamento fonti-utilizzatori può essere accertato mediante paragoni effettuati sulla base di matrici logiche. In un primo momento vengono fatti gli adattamenti che chiaramente sembrano i migliori per le singole paia fonti-utilizzatori. Occorre in seguito verificare se non esistano altre combinazioni tali da permettere un sistema globale migliore.

#### Indicazioni generali concernenti la progettazione

La riduzione del fabbisogno energetico diminuisce l'inquinamento dell'ambiente. Contrariamente ad altre misure di protezione dell'ambiente, il risparmio di energia finale procura anche denaro in contanti.

In molti casi si manifestano notevoli vantaggi grazie all'accoppiamento diretto di misure per la protezione dell'ambiente con tecniche di utilizzazione del calore (esempio: nel caso del recupero dei solventi viene emessa nell'ambiente una minor quantità di solventi sotto forma di gas e viene ancora recuperato calore dalla condensazione dei solventi stessi).

Per mezzo di procedimenti moderni d'integrazione del calore è possibile ottimizzare i processi energetici mediante un accoppiamento redditizio.

Oltre ai periodi necessari per l'ammortamento si dovrebbe tener conto anche di altri effetti. Grazie al miglior sfruttamento dell'energia le caldaie possono ad esempio essere fermate oppure sostituite con altre di dimensioni minori (esempio: al momento della sostituzione di una grande caldaia per la combustione dei rifiuti con una caldaia di dimensioni minori non vengono soltanto ridotte le perdite dovute all'approntamento, ma vengono soppresse anche le spese per l'eliminazione dei rifiuti).

Con la riduzione del fabbisogno di energia termica, di regola diminuiscono anche le potenze necessarie per i processi di raffreddamento. Con la conversione in sistemi di raffreddamento a secco, che non necessitano di acqua di raffreddamento, diminuiscono anche i costi per quest'ultima e per le acque di scarico.

Oggi si dispone di una grande scelta di sistemi di scambiatori di calore, di componenti e d'impianti per il recupero del calore. Sistemi adeguati sono a disposizione anche in caso di esigenze elevate nel settore della sicurezza (impianti, prodotti, ambiente).

*Riquadro 46*

#### Situazioni iniziali per progetti RDC/UCR

**Impianto nuovo:** presupposti ottimali – indipendentemente dall'impianto esistente è possibile una combinazione tra le fonti e gli utilizzatori.

**Combinazione del nuovo impianto con quello esistente:** l'impianto esistente pone condizioni estreme per quanto concerne il punto di congiunzione. Occorre in ogni caso chiarire se esiste un bisogno di rinnovamento dell'impianto esistente.

**Risanamento:** l'impianto esistente provoca ogni possibile limitazione delle condizioni. Lo stato effettivo deve perciò essere valutato mediante misurazioni singole mirate, nonché un'analisi accurata.

*Riquadro 47*

Fonti di calore		Utilizzatori del calore	
Limiti usuali della temperatura			
Calore residuo industriale	+ 1000°C +100°C	+500°C +250°C	Processi industriali
Calore residuo	+200°C +50°C	+250°C	Essiccazioni
Circuiti di raffredd.	+80°C +10°C	+50°C	
Aria viziata dei locali	+25°C +5°C	+80°C +40°C	Preparazione acqua calda
Aria esterna	+35°C -15°C	+25°C	Impianti di ventilazione
Acque esterne	+20°C ±0°C	+5°C	
Falda freatica	±15°C +10°C	+25°C +5°C	Riscaldament o ambiente

Figura 48: limiti usuali della temperatura di fonti di calore ed utilizzatori di calore

Ramo	Livello di temperatura del calore residuo
Impiantistica (settore del comfort)	inferiore a 50°C
Produzione di energia (centrali elettriche)	inferiore a 50°C
Industria delle macchine e dei metalli	superiore a 300°C
Produzione di materiale da costruzione	superiore a 300°C
Industria tessile	50...300°C
Industria della carta e del cartone	50...300°C
Industria chimica	50...300°C superiore a 300°C
Industria dei prodotti alimentari	inferiore a 50°C 50...300°C

Tabella 49: livelli tipici della temperatura e del calore residuo in singoli rami dell'industria e della tecnica

In molte paia di accoppiamenti una valutazione senza ausilio di strumenti risulta troppo dispendiosa. Rimane quindi la possibilità di concentrarsi su flussi energetici maggiori e sviluppare una strategia approssimativa per quanto concerne gli impianti. Gli impianti complessi possono essere ottimizzati completamente solo con il computer e con metodi adeguati.

 **Pinch Design Method nell'appendice C**

La soluzione elaborata è rappresentata in modo approssimativo mediante uno schema del flusso energetico. Dopo che è stata intravvista la possibilità tecnica di una soluzione devono ancora essere chiariti gli aspetti economici.

**Parametri delle fonti e degli utilizzatori**

Questi parametri descrivono gli aspetti energetici e quelli concernenti il materiale (riquadro 51). Il tipo del mezzo di trasporto del calore residuo, nonché i suoi valori termodinamici e le sue caratteristiche sostanziali costituiscono criteri di valutazione essenziali per la stima del dispendio dovuto al trasporto e l'utilizzabilità del calore residuo. Dalla composizione delle sostanze possono essere valutate le proprietà di corrosione e la possibilità del manifestarsi di condensazione negli apparecchi RDC/UCR.

**Parametri del raccordo**

I parametri del raccordo permettono una scelta approssimativa delle paia ottimali di fonti-utilizzatori.

**Differenza di temperatura:** i flussi di calore residuo dovrebbero essere collegati con gli utilizzatori in modo tale che abbia luogo uno sfruttamento corretto sotto il profilo dell'exergia. Si dovrebbe sempre tenere in considerazione anche l'impiego multiplo di un flusso di calore residuo grazie al collegamento in serie di utilizzatori con un fabbisogno di temperatura in costante diminuzione (riquadro 52).

**Rapporto tra offerta di energia e fabbisogno energetico:** quanto maggiore è l'offerta di energia di una fonte, tanto più redditizia è l'utilizzazione. Si può giudicare se un'offerta è utilizzabile sulla base delle richieste degli utilizzatori (riquadro 53).

**Punte massime dell'offerta e della domanda:** qualora l'utilizzatore e la fonte siano simili anche sotto l'aspetto della potenza, un adeguamento è senza problemi nel caso in cui esista una concordanza cronologica. A dipendenza dal

problema esaminato, la potenza, vista come energia media, deve essere considerata in un intervallo di tempo scelto in modo adeguato. Gli accumulatori costituiscono un mezzo adeguato per immagazzinare punte di potenza elevate (riquadro 55).

La quantità di calore residuo della fonte ed il fabbisogno di calore di un utilizzatore presentano, di volta in volta, un andamento del carico caratteristico per il processo. Quanto più il ciclo dell'esercizio e l'andamento della domanda e dell'offerta concordano sotto l'aspetto cronologico e quello della quantità, tanto più redditizia risulterà un'utilizzazione. Ideale è un decorso sincrono di ambedue i processi, come nel caso del ricupero del calore; quest'ultimo è perciò, nella maggioranza dei casi, superiore alle altre applicazioni.

**Distanza tra fonte ed utilizzatore:** l'utilizzazione di calore residuo dipende dal trasporto da parte di un mezzo termovettore. In questo caso si tratta di un tipo di trasmissione dell'energia molto costoso – se paragonato al trasporto di combustibili oppure di

Termovettore		Temperatura [°C]	Pressione [bar]
Vapore	Vapore surrisc.	400	10
	Vapore saturo	105	1,2
	Vapore di scarico	100	1,01
Acqua per riscaldamento	Acqua molto calda	180/140	25
	Acqua calda per riscaldamento	90/70	2,5
Acqua industriale	Acqua calda sanitaria	70/50	1,5
Acqua di raffreddamento	Acqua per cons.	40	4
	Acqua circuito	26/32	6
	acqua	80/60	6
Olio per riscaldamento	Riscaldamento complementare	250/200	3

Tabella 50: esempio di una struttura del fabbisogno di calore a seconda del termovettore, della temperatura e della pressione

#### Parametri delle fonti e degli utilizzatori

##### Quantità di calore e potenze calorifiche

Nel caso di trasduttori d'energia la potenza della fonte di calore residuo è fornita dall'impiego del combustibile e dalla percentuale delle perdite. Nel caso delle fonti di calore la potenza viene determinata, quale valore medio, sulla base della potenza calorifica in un intervallo di tempo caratteristico. È necessario conoscere l'andamento della potenza per ottimizzare gli impianti. Per gli utilizzatori occorre stabilire il fabbisogno corrispondente.

##### Temperature

La temperatura all'uscita della fonte dovrebbe offrire un livello utilizzabile. Essa non deve superare la temperatura dell'utilizzatore, ma dovrebbe comunque superare sufficientemente la temperatura minima di alimentazione dell'utilizzatore. Livelli di temperatura tipici di fonti di calore residuo sono riassunti nella tabella 49. Per chiarimenti specifici ed in casi limite è necessario registrare il decorso della temperatura ad intervalli di tempo diversi. Nei sistemi a convezione e per gli utilizzatori occorre registrare le temperature di andata e quelle di ritorno.

##### Ore di funzionamento

Come obiettivo ci si dovrebbe prefiggere di raggiungere il massimo possibile di ore di funzionamento annue e cicli d'esercizio di una durata sufficiente. È vantaggioso un funzionamento continuo.

##### Trasporto del calore

Quello che crea meno problemi è senz'altro il trasporto del calore a convezione. Nel caso di erogazione del calore diffusa è necessario un processo di raccolta e di concentrazione. Sotto un aspetto puramente tecnico l'acqua e l'aria sono termovettori che non creano problemi.

##### Caratteristiche fisiche e composizione materiale del termovettore

Qualora le caratteristiche fisiche del termovettore si discostino notevolmente da quelle dell'acqua, rispettivamente dell'aria, i componenti standard possono, se del caso, essere utilizzati solo a determinate condizioni. La conoscenza della composizione materiale del termovettore è molto importante per quanto concerne la corrosione e la sporcizia in canali, tubazioni e scambiatori di calore. In generale non creano problemi le miscele di sostanze omogenee, disperse o sotto forma di vapore. I problemi insorgono solo nel caso di particelle che si trovano nel termovettore. Esse esercitano un'azione abrasiva o inquinante. Ideali sono le sostanze chimicamente inerti. È necessario adottare misure precauzionali nel caso di sostanze corrosive, infiammabili o esplosive. Le sostanze tossiche oppure inquinate da agenti patogeni non devono in alcun caso giungere nelle aree in cui soggiornano esseri viventi oppure nell'ambiente. Negli impianti relativi alla tecnica dei processi l'aria viziata è spesso carica di sostanze che possono essere causa di sporcizia negli scambiatori di calore. Occorre fare anche una valutazione del dispendio causato dalla pulitura. La corrosione e la sporcizia provocate da sostanze nocive possono causare la messa fuori esercizio prematura degli impianti RDC/UCR.

**Parametri del raccordo: differenza di temperatura**

Quanto maggiore è la differenza di temperatura, tanto più redditizio è l'impiego di uno scambiatore di calore. Le esigenze poste allo scambiatore di calore diventano più elevate, quanto minore è la differenza di temperatura.

Se la temperatura della fonte è minore di quella dell'utilizzatore occorre valutare se non sia meglio sfruttare il calore mediante una pompa di calore. Nel caso di grandi quantità di energia e di una differenza di temperatura necessariamente minore, la pompa di calore permette soluzioni giustificabili sotto l'aspetto

Riquadro 52

**Parametri del raccordo: rapporto tra offerta di energia e fabbisogno energetico**

Un valore > 1 significa che l'offerta è eccessiva; per l'utilizzazione della fonte deve essere previsto un utilizzatore ulteriore oppure un carico fittizio. Per rendere possibile e senza problemi un'utilizzazione, il rapporto della potenza media per un intervallo di tempo caratteristico deve parimenti essere > 1. Se questo rapporto è < 1 occorre prendere in esame una copertura parziale. Quest'ultima è interessante nel caso di grandi quantità di energia.

La gestione del carico e quella dell'energia possono creare esigenze più elevate per quanto concerne la tecnica di misurazione e di regolazione. Il calore in eccesso deve essere eliminato (ad es. mediante torri di raffreddamento). I divari tra offerta e domanda dovrebbero essere costatati e venire compensati mediante strategie di accumulazione.

Riquadro 53

**Parametri del raccordo: distanza tra fonte ed utilizzatore**

La distanza esistente tra la coppia costituita dalla fonte e dall'utilizzatore dovrebbe essere mantenuta al minimo. Le tubazioni e le canalizzazioni troppo estese sono costose, causano perdite di calore e richiedono una manutenzione. Qualora debbano essere superate parecchie centinaia di metri è preferibile che il calore sia trasmesso in tubazioni. La coibentazione termica delle tubazioni (se paragonata a quella delle canalizzazioni) è meno costosa, la manutenzione risulta più semplice ed i costi di montaggio sono minori. L'estensione massima realizzabile sul piano pratico dipende dal risparmio che s'intende effettuare sui costi e deve essere stabilita individualmente per ogni

Riquadro 54

**Aspetti ulteriori del raccordo**

**Concordanza tra le durate di vita degli impianti:** gli impianti destinati alla fornitura di energia, nonché quelli destinati al suo consumo dovrebbero essere stati fabbricati lo stesso anno. Soprattutto nel caso dell'utilizzazione da parte di terzi, la disponibilità del calore residuo deve essere garantita a lunga scadenza.

**Separazione delle sostanze:** negli impianti concernenti la tecnica dei processi, l'aria viziata costituisce il mezzo di trasporto per il calore e per le sostanze (umidità nel caso di essiccazione, sostanze nocive e pulviscolo nel caso di processi di pulitura). Durante lo scambio di calore le sostanze non dovrebbero più pervenire nuovamente fino all'aria di alimentazione. Sotto questo aspetto lo scambiatore di calore a rotazione può essere problematico, mentre nel caso dello scambiatore di calore con superfici di separazione deve essere garantita la tenuta stagna alle pressioni che si manifestano. In linea di massima dovrebbe esistere una caduta di pressione tra l'aria esterna e l'aria di smaltimento. Le stesse riflessioni possono essere fatte nel caso in cui occorra impedire la trasmissione di agenti patogeni dall'aria viziata all'aria di alimentazione. Se nello scambiatore di calore appaiono sostanze tossiche o nocive per l'ambiente, sarebbe opportuna e vantaggiosa l'esecuzione di un circuito chiuso.

**Criteri economici**

Quale base per le decisioni concernenti gli investimenti è necessario accertare il potenziale economicamente sfruttabile e ciò con l'ausilio di criteri economici, nonché sulla base del calore residuo potenziale tecnicamente utilizzabile. A questo scopo vengono impiegati diversi procedimenti, a seconda dell'importanza del progetto.

Nella prassi riveste un aspetto secondario la scala termodinamica dei valori. Una valutazione decisiva deve aver luogo tenendo conto dei costi. In tal caso vale:

$$\text{Val. del cal. residuo} \frac{\text{risparmio energetico}}{\text{impiego di capitale}} = [\text{kWh}/\text{Fr.}]$$

In questo caso il valore del calore residuo è costituito dalla differenza tra il dispendio necessario per utilizzare il calore residuo stesso ed il profitto ricavato con l'utilizzazione. Considerata in questo modo la valutazione del calore residuo è possibile soltanto se vengono prese in considerazione le condizioni esistenti per l'utilizzatore potenziale:

- se con il calore residuo a bassa temperatura è possibile compensare, con una spesa esigua, una

parte notevole del fabbisogno di energia per il riscaldamento, tale calore residuo possiede un valore adeguatamente elevato nonostante la propria percentuale esigua di exergia.

- Qualora durante l'utilizzazione del calore residuo ad alta temperatura l'alternativa «produzione di corrente elettrica» si rivelasse, in definitiva, sotto l'aspetto dei costi e degli utili, più sfavorevole dell'alternativa «copertura del fabbisogno di calore», sarebbe razionale e corretto utilizzare anche calore ad alta temperatura per coprire il fabbisogno di un utilizzatore a bassa temperatura.

### Costi esterni

Nelle decisioni economico-aziendali gli effetti esterni non sono sempre importanti come condizioni marginali, oppure lo sono solo in quanto tali. Sono in questa sede importanti i punti di vista politico-economici (consumo di energia primaria, sicurezza dell'approvvigionamento, disponibilità), nonché gli aspetti concernenti l'ambiente (diminuzione delle emissioni di sostanze nocive, risparmio delle risorse) oppure gli aspetti concernenti l'occupazione (effetti sul mercato del lavoro).

## 4.2 Metodi di misurazione

Una verifica seria del successo ottenuto può essere effettuata solo mediante valori di misurazione. A questo proposito occorre ad ogni modo che esista un concetto di misurazione adeguato. Per poter dimostrare con le cifre un'eventuale riuscita ottenuta con un risanamento, devono tuttavia essere a disposizione anche i valori di misurazione dell'impianto prima del risanamento stesso.

Motivi delle misurazioni negli impianti RDC/UCR sono:

- accertamento dello stato reale (lista di controllo)
- verifica dell'effetto delle misure (controllo della riuscita)
- analisi di singoli aspetti
- regolazione dell'impianto
- esercizio ottimale, sorveglianza permanente con sistema di gestione dell'edificio.

Vengono misurate le grandezze che hanno importanza sotto l'aspetto energetico, nonché quelle tecniche concernenti l'esercizio, rispettivamente il comportamento degli utilizzatori:

- energia (calore, elettricità, consumo di combustibile)
- potenza (calore, elettricità, combustibile)
- temperature
- portate (liquidi, gas)
- umidità relativa
- pressione

### Parametri del raccordo: punte massime dell'offerta e della domanda

Gli accumulatori servono a superare le differenze che possono manifestarsi nel tempo tra quantità di calore residuo e fabbisogno di calore. Essi richiedono tuttavia investimenti supplementari, aumentano il dispendio per il comando e la regolazione e creano perdite supplementari. La capacità dell'accumulatore è determinata dalla quantità di energia che deve essere immagazzinata.

Gli intervalli di tempo delle punte massime di resa tra le fonti e gli utilizzatori determinano la qualità dell'accumulatore stesso. In caso di una prolungata accumulazione di calore sensibile è possibile limitarsi a perdite esigue solo se si utilizzano accumulatori di dimensioni massime. Quanto maggiore è la distanza, tanto maggiore è la capacità di accumulazione necessaria. Utilizzando la tecnologia convenzionale è possibile venire a capo di un'accumulazione di breve durata, ossia nell'ambito di ore o di giorni. Al contrario, un'accumulazione di lunga durata, ossia in un lasso di settimane e di mesi, è dispendiosa e giustificata solo in casi speciali. In tali casi invece di ricorrere all'accumulatore a lunga durata si può ottenere un'utilizzazione razionale mediante una strategia d'esercizio adeguata dell'impianto (ad es. ottimizzazione dell'esercizio durante la mezza stagione, inserimento di ulteriori utilizzatori).

Mediante l'accumulatore può anche aver luogo un adeguamento della resa. Una resa elevata e di breve durata della fonte può essere trasformata in un'erogazione del calore proporzionalmente minore. Al contrario, invece, mediante una carica in dolcezza dell'accumulatore una fonte debole può essere sottoposta per breve tempo ad un forte carico. A seconda dello scopo per cui è utilizzato, l'accumulatore deve essere dimensionato per il lavoro corrispondente. Per principio e per motivi di redditività occorre dare la preferenza alle applicazioni senza accumulatore e non a quelle che utilizzano accumulatori. Purtroppo spesso non è possibile utilizzare il calore senza un'accumulazione intermedia.

La situazione dei valori massimi nell'ambito dell'offerta e della domanda serve solo quale indicazione approssimativa. Così, ad esempio, un'offerta eccessiva che periodicamente ha una lunga durata può sdrammatizzare il problema dell'accumulazione. Per

Riquadro 55

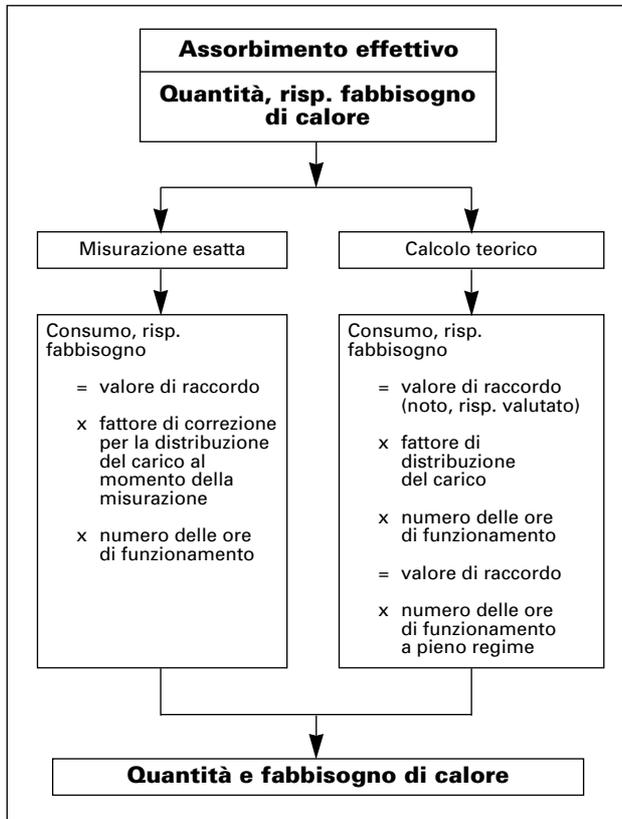


Figura 56: rilevamento del fabbisogno energetico e del consumo di energia [fonte: WRG und AWN durch Elektrowärmepumpen in Gewerbe und Industrie, Band VIII, Essen, Vulkanverlag]

#### Calcolo del consumo di energia

$$W = P \cdot f_D \cdot t_F$$

W = consumo di energia [kWh]  
 P = potenza di raccordo [kW]  
 $f_D$  = fattore di distribuzione del carico [-]  
 $t_F$  = durata del funzionamento [h]

La durata del funzionamento può essere determinata in modo relativamente sicuro. Il fattore di distribuzione del carico crea invece spesso una grande insicurezza.

Riquadro 57

- orari d'inserimento, ore di funzionamento, segnali di stato
- numero dei cicli d'inserimento.

Per misurazioni singole vengono spesso utilizzati apparecchi di misurazione mobili, mentre i punti di misurazione utilizzati per il sistema di gestione di un edificio rimangono fissi nell'impianto. Per eseguire misure sporadiche può essere di aiuto il fatto di aver previsto punti di misurazione preparati che con poche manipolazioni possono essere muniti di sensori.

Poiché le misurazioni dell'energia sono dispendiose, nella prassi vengono prese in considerazione solo poche grandezze sotto forma di misurazioni globali (ad es. quantità di calore presso la stazione principale, elettricità nel punto di alimentazione principale).

I flussi energetici possono tuttavia essere registrati soltanto mediante misurazioni. Per quanto ciò possa sembrare banale è pur sempre vero che spesso non vi si presta la dovuta attenzione. Spesso ci si accontenta di elaborare concetti di utilizzazione del calore residuo sulla base di rendimenti «usuali», caratteristiche specifiche per il ramo, dati nominali e simili. Sulla base di tali dati, tuttavia, la riuscita di un progetto è messa in forse. Qualora non sia possibile eseguire misurazioni esatte, i dati iniziali devono almeno essere rilevati su una base minima (figura 56 e riquadro 57).

Le misurazioni esatte comprendono le misurazioni dell'energia nei flussi energetici in questione. Quali mezzi di misurazione sono utilizzati soprattutto:

- contatori di elettricità
- misuratori delle quantità di calore (differenza di temperatura, portata)
- consumo di combustibile (contatori del gas, contatori per l'olio combustibile, bilancia)
- contatori delle ore di funzionamento.

Sulla base del bilancio energetico possono in seguito essere calcolati ulteriori flussi energetici. Le misurazioni complete comprendono anche il rilevamento delle condizioni estreme.

L'inserimento successivo degli apparecchi di misurazione per ottenere misurazioni esatte è normalmente molto dispendioso. Su una base minima si lavora con un dispendio minimo per gli apparecchi di misurazione. Mediante la stima dei valori di raccordo e nell'ipotesi di una portata costante e di differenze di temperatura pure costanti è possibile eseguire un accertamento delle energie per mezzo di cifre concernenti le ore di funzionamento:

- contatore delle ore di funzionamento
- stima del valore di raccordo (targa con indicazione delle portate)

- valutazione della differenza di temperatura (termometro a contatto)
- valutazione della portata (misuratore di portata agli ultrasuoni)
- valutazione del consumo di combustibile (diminuzione delle scorte).

È sempre vantaggioso verificare le valutazioni mediante misurazioni singole che è possibile eseguire in modo semplice (menzionate qui sopra tra parentesi). In molti casi l'esattezza ottenuta è sufficiente per eseguire le prime valutazioni del progetto.

### 4.3 Ricerca della soluzione

Dal paragone ripetuto tra le singole fonti ed i singoli utilizzatori può essere elaborata una possibile configurazione. Prima di perseguire ulteriormente un concetto di soluzione è molto vantaggioso se si disegna, sotto forma di diagramma del flusso energetico, la soluzione che ci si è già prospettata. Il raccordo d'impianti che utilizzano l'energia può così per il momento essere stabilito indipendentemente dalla realizzazione tecnica degli apparecchi.

Sulla base della condotta del flusso energetico ci si pongono molte domande, le risposte alle quali costituiscono pietre miliari sulla via della soluzione. A causa della rappresentazione chiara, il diagramma del flusso energetico può costituire un mezzo ausiliario per evitare errori grossolani.

I combustibili e l'elettricità (anche se quest'ultima meno sovente) vengono sostituiti mediante RDC/UCR. Queste ripercussioni possono influenzare in modo decisivo la redditività del RDC/UCR. Non è quindi sufficiente aver presente soltanto il sistema RDC/UCR, ma occorre inserire nelle considerazioni tutta l'economia energetica aziendale. Le ottimizzazioni parziali non sufficientemente approfondite possono avere un effetto svantaggioso sull'optimum globale decisivo.

La valutazione delle diverse quantità di calore può avvenire da un lato sulla base della quantità delle portate, delle temperature e delle caratteristiche dei materiali e dall'altro su quella dei dati concernenti l'esercizio e dei gradi di utilizzazione. Se questi calcoli indicano che nella coppia di fonti-utilizzatori in esame viene utilizzata solo una percentuale esigua del calore disperso, oppure che la quantità dello stesso resta molto al di sotto del fabbisogno dell'utilizzatore, occorre cercare un'altra coppia di fonti-utilizzatori. Nel primo caso si forma molto calore residuo non utilizzato, qualora non siano trovati utilizzatori ulteriori. Nel secondo caso occorre cercare un'altra fonte oppure un

#### Aspetti della progettazione

Costi d'investimento  
 Costi d'esercizio  
 Durata dell'ammortamento  
 Tipo di costruzione semplice  
 Sistema di costruzione modulare  
 Possibilità di attrezzature successive  
 Disponibilità degli impianti  
 Ore di funzionamento  
 Sistema di funzionamento  
 Sicurezza di funzionamento  
 Fabbisogno di energia primaria  
 Stabilità di funzionamento  
 Possibilità di regolazione  
 Perdita di pressione  
 Pericolo di gelo  
 Tenuta stagna  
 Rimozione dei prodotti di condensazione  
 Resistenza alla corrosione  
 Sensibilità alla sporcizia  
 Procedimento di autopulitura  
 Facilità di manutenzione  
 Pregiudizio causato ad altri impianti in caso di guasti

Riquadro 58

**Modo di procedere**

1. Valutazione del processo o degli impianti
2. Analisi approssimativa
  - rilevamento dei dati e registrazione dello stato
  - interpretazione
  - redditività (valutazione approssimativa)
  - progetto di utilizzazione e procedura ulteriore
3. Analisi approfondita
  - fissare i limiti del sistema
  - registrazione dettagliata dello stato
  - bilanci energetici e concernenti la potenza
  - lista delle misure, nuovi stati di funzionamento
  - calcoli concernenti la redditività
  - progettazione
4. Esecuzione, risp. risanamento
5. Ottimizzazione dell'impianto
6. Controllo dei risultati

Riquadro 59

- Convezione termica naturale diretta senza termovettore (rigeneratori e recuperatori)
- convezione termica naturale diretta con termovettore (rigeneratori)
- convezione termica naturale indiretta con termovettore (sistema interconnesso in un circuito)
- pompe di calore, trasformatori di calore, produzione combinata di forza e calore, impianti ORC (Organic Rankine Cycle).

Per principio si può dire che gli impianti con un grado elevato di utilizzazione globale creano costi d'investimento più elevati ed un consumo maggiore di energia elettrica a causa delle pompe e dei ventilatori.

Ulteriori aspetti importanti della progettazione, che non sono contenuti nella lista di controllo, possono essere reperiti nel riquadro 58.

Per gli impianti della tecnica di ventilazione e di condizionamento esistono schemi ben definiti ed apparecchi standardizzati per il recupero del calore. Negli impianti per l'utilizzazione del calore residuo i componenti ed i sistemi (recuperatori, rigeneratori e pompe di calore) devono essere adeguati di volta in volta alla situazione individuale. Progettazione, calcolo, ottimizzazione, montaggio, funzionamento e manutenzione ne sono interessati. Solo singoli componenti, come ad esempio gli scambiatori di calore dei gas combusti o simili, possono essere utilizzati quali moduli in diversi impianti.

## 4.4 Fasi di progettazione

Modelli per la messa a concorso che comprendono tutti i punti più importanti possono essere reperiti nella direttiva SITC 89-1. Nello stesso documento viene fatto riferimento ai punti più essenziali nel caso del collaudo e della garanzia di apparecchi della tecnica di ventilazione e di condizionamento. Le fasi più importanti di progettazione sono riunite nel riquadro 59.



Fascicolo 1, capitolo 6

# Appendice

## A. Campi d'applicazione

### RDC nel settore del comfort

Gli impianti RDC per la tecnica di ventilazione e di condizionamento nel settore del comfort sono utilizzati prevalentemente in edifici che non servono da abitazione. I recuperatori del calore costituiscono in questo caso dei componenti importanti che – a causa dei rapporti favorevoli tra i costi ed il rendimento – sono già stati utilizzati a partire dagli anni '60. Oggi esistono strutture provate che possono essere utilizzate per impieghi molteplici e si dispone parimenti di ricche esperienze per quanto concerne il funzionamento.

### RDC nell'industria

Il recupero del calore è possibile anche negli impianti di ventilazione e di condizionamento industriali e può essere utilizzato quasi sempre in modo redditizio. Gli impianti della tecnica di ventilazione e di condizionamento industriali approvvigionano capannoni di produzione ed officine con tutti i locali accessori che ne fanno parte, quali magazzini e simili. La figura 60 illustra un esempio di componenti utilizzati.

### Impianti della tecnica di ventilazione e di condizionamento per i processi industriali

Nel settore degli impianti di produzione industriali vengono spesso installati impianti di ventilazione e di condizionamento per i processi. Essi vengono fatti funzionare indipendentemente dall'approvvigionamento della ventilazione e del condizionamento di base. Quali sistemi indipendenti sono assoggettati a criteri particolari di dimensionamento, come una conformazione speciale dei locali, un elevato consumo energetico ed un inquinamento atmosferico dovuto a sostanze nocive (riquadro 61).

Negli impianti di ventilazione e di condizionamento per i processi l'aria serve come vettore delle sostanze e come vettore energetico durante i processi di produzione. I contrassegni particolari di tali impianti sono:

- l'immissione di calore in un processo
- il prelievamento di calore e di umidità dal processo
- il trasporto in vista dell'eliminazione di gas, solventi, vapori di vernici, vapori, ecc.

### Impianti frigoriferi

Sulla base della potenza utilizzata, nel campo della tecnica del freddo viene fatta una distinzione tra freddo industriale e freddo artigianale. I principi UCR sono tuttavia gli stessi in ambedue i casi. Gli impianti frigoriferi possono essere utilizzati come ausilio per il riscaldamento dell'acqua, il riscaldamento dei locali

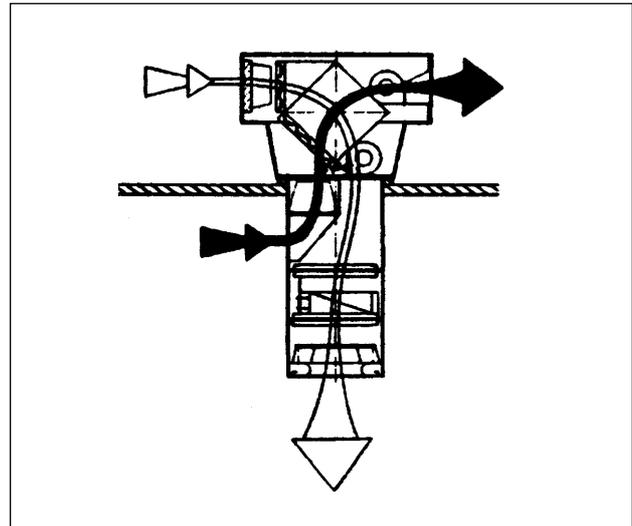


Figura 60: esempio di un apparecchio industriale per la ventilazione dei tetti con RDC integrato [fonte: Hoval]

### Esempi di sostanze industriali problematiche contenute nell'aria di alimentazione e nell'aria viziata

Gas sviluppati durante la saldatura  
 Vapori corrosivi  
 Vapori/gas esplosivi  
 Vapori di olio, vapori di emulsioni  
 Solventi  
 Plastificanti  
 Pulviscoli  
 Particelle di vernice  
 Sostanze radioattive (gas, aerosol, particelle)  
 Sostanze tossiche  
 Germi  
 Odori  
 Umidità

Riquadro 61

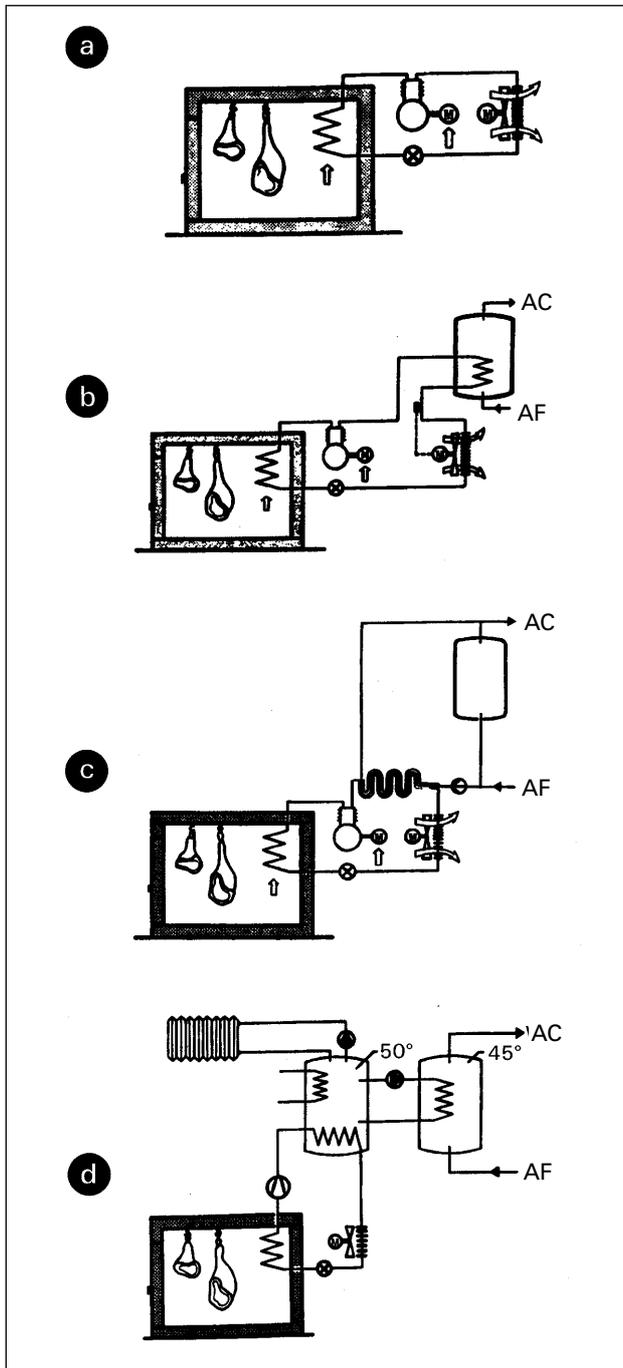


Figura 62: impiego di principio dell'UCR collegato con un impianto frigorifero

- a) nessuna utilizzazione del calore residuo
- b) condensazione diretta nello scaldacqua
- c) condensazione nello scambiatore di calore esterno
- d) con accumulatore per il riscaldamento per diversi utilizzatori

Dai dati di fatto concernenti il processo ciclico risulta se ed in che misura un mezzo possa essere surriscaldato, rispettivamente surraffreddato. Grazie a condizioni favorevoli e ad un'oculata scelta del circuito può aver luogo un'utilizzazione ripartita secondo la temperatura. A causa di un surriscaldamento del mezzo, all'uscita del compressore può svilupparsi una temperatura fino a 70°C. La percentuale principale di calore residuo si forma tuttavia, nel caso di condensazione, a circa 40°C.

Per il raffreddamento di generi alimentari è necessaria una potenzialità refrigerante di 10 kW. In tal modo è prodotta una potenza calorifica di 14 kW. Con un condensatore raffreddato ad aria è di conseguenza possibile riscaldare di 20°C 3'000 m<sup>3</sup>/h di aria. Utilizzando un condensatore raffreddato ad acqua si potrebbero riscaldare di circa 40°C approssimativamente 4 l/min di acqua.

### Produzione di aria compressa

Durante la produzione di aria compressa il compressore non può superare una determinata temperatura limite. Per ottenere una sicurezza d'esercizio elevata si raffredda mediante acqua o aria, migliorando in tale modo anche il rendimento. Spesso l'aria compressa deve anche essere essiccata. Circa il 90% dell'energia meccanica si trasforma così in calore residuo.

A seconda della situazione, l'aria di raffreddamento riscaldata può essere utilizzata durante il periodo di riscaldamento per la ventilazione dei capannoni oppure l'acqua di raffreddamento può contribuire al riscaldamento oppure al riscaldamento dell'acqua calda. A dipendenza dal sistema di raffreddamento sono ottenibili temperature da 80 a 90°C.

### Situazione generale nell'industria

Nei processi del settore industriale o artigianale l'energia ha un altro valore posizionale che non nel settore del comfort. Il consumo d'energia viene in tal modo differenziato come segue:

- energia per lavoro meccanico (motori)
- + energia per processi
- = energia per produzione
- energia per produzione
- + energia per il comfort
- = consumo globale d'energia

Per stabilire il prezzo di un prodotto, rispettivamente la redditività di un procedimento, durante la fabbricazione del prodotto stesso oltre alle

Da ciò risulta, da un lato, che per molte sostanze la percentuale dei costi condizionata dall'energia è per lo più minima nel prodotto finito. Le variazioni del prezzo dell'energia esercitano perciò solo un influsso attenuato sul prezzo del prodotto. D'altro lato esiste una serie di procedimenti che esigono un maggior consumo di energia. Essi possono venir perfettamente considerati come un'unità. Negli ultimi anni sono stati intrapresi sforzi per migliorare i grandi utilizzatori di energia. A questo proposito rammentiamo soprattutto il miglioramento dei metodi di progettazione, nonché i nuovi apparecchi ed i nuovi procedimenti che permettono un'utilizzazione molteplice dell'energia. Gli aspetti più importanti in relazione a RDC e UCR sono riassunti nel riquadro 63.

Misure importanti sotto l'aspetto energetico possono spesso essere adottate in modo semplicissimo. Nel caso ad esempio dei processi di essiccazione che causano un consumo di energia relativamente elevato, la temperatura può essere diminuita mediante tempi di essiccazione più lunghi. In tal modo viene addirittura migliorata la qualità del materiale essiccato.

Per coprire il fabbisogno di calore è spesso utilizzato il vapore. Nelle aziende la produzione di vapore avviene in modo centralizzato. Per molti processi il vapore vivo ha una temperatura inutilmente elevata che deve essere ridotta al livello di temperatura richiesto impiegando dei convertitori. Con un approvvigionamento adeguato del calore si potrebbe risparmiare molta energia.

### Esempio industria chimica

Nei processi di produzione chimica è necessaria energia per scatenare reazioni e separare le sostanze che si producono in tale modo. Dopo l'utilizzazione nel processo, l'energia usata deve nuovamente essere rimossa dal processo stesso sotto forma di calore, per lo più a bassa temperatura. Nei processi esotermici il calore liberato deve essere rimosso accessoriamente.

Nel passato molti processi di fabbricazione sono stati continuamente migliorati; tuttavia solo le macchine e gli apparecchi adeguati, utilizzati in combinazioni diverse negli impianti, hanno permesso risparmi energetici notevoli. Fino ad oggi non tutti i processi hanno raggiunto una «maturità energetica» uguale. Esistono ancora molti processi per i quali – ai tempi delle energie poco costose – non era ancora sentito il bisogno di considerare il risparmio energetico sotto una luce diversa.

### Settori dell'industria svizzera con una percentuale notevole di energia di processo

Nei settori dell'industria considerati, **l'industria delle macchine e dei metalli** può essere considerata in modo assoluto il secondo maggior consumatore di calore di processo. È pure elevata anche la percentuale di calore di processo nel consumo globale di energia di questo settore dell'industria. Oltre il 95% del calore è utilizzato per processi a temperature superiori a 300°C ciò che crea una situazione favorevole per un'utilizzazione graduale dell'energia.

Nella **produzione di materiale da costruzione** hanno la prevalenza le temperature elevate con un prelievo di energia parimenti elevato. Il calore dovuto alla combustione, con temperature superiori ai 1000°C, nonché il calore residuo coprono normalmente la percentuale maggiore del fabbisogno di calore al di sotto dei 300°C.

Un elevato consumo di calore con pressioni da medie fino ad elevate contraddistingue i flussi termici più importanti nell'**industria della carta**. La struttura del consumo di calore è a forma di cascata.

**L'industria dei tessili, del cuoio e delle calzature** non presenta, se paragonata ad altri settori, temperature molto elevate. Più dell'80% del calore è utilizzato per procedimenti ad una temperatura inferiore ai 300°C. La parte maggiore dell'energia è utilizzata per processi di essiccazione.

Se si tiene conto del suo consumo di calore **l'industria chimica** è il più diversificato di tutti i settori industriali. In singole aziende il consumo di vapore oppure di acqua bollente varia grandemente, come pure le temperature. Esiste un potenziale notevole di utilizzazione molteplice del calore sotto forma di RDC e UCR, soprattutto per il riscaldamento di acqua dolce.

**L'industria dei prodotti alimentari** presenta una gamma molto vasta di tecnologie con le temperature più diverse. La produzione di calore e di prodotti di condensazione a temperature differenti, quali sorgenti di calore, nonché il fabbisogno di acqua dolce come utilizzatore di calore fanno sembrare favorevoli le possibilità d'impiego d'impianti RDC/UCR.



*Sonnenenergie für die Erzeugung industrieller Prozesswärme. Elaborato dalla Georg Fischer AG, Schaffhausen. Berna: Ufficio federale dell'energia (UFE), 1981 (Collana UFE, Studio n. 15; può essere*

Riquadro 63

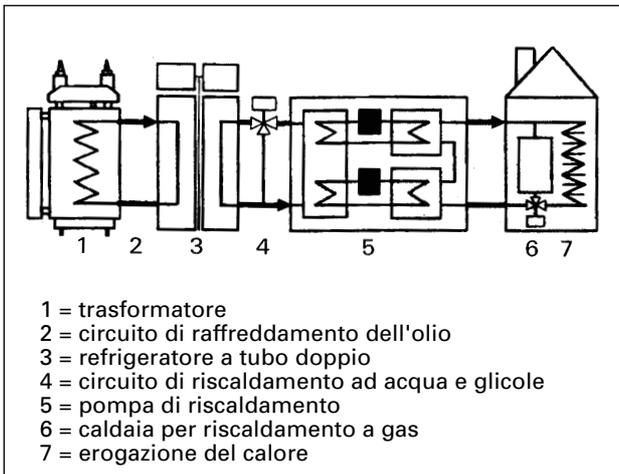


Figura 64: schema di un impianto di trasformazione con circuito di sicurezza per l'UCR [fonte: Jahrbuch der Wärmerückgewinnung, 6. Ausgabe, Essen, Vulkan-Verlag, 1989]

### Trasmissione del calore attraverso barriere di sicurezza

Nell'industria il calore residuo non viene più utilizzato in particolare qualora la trasmissione verso un altro punto di sfruttamento può mettere in pericolo la sicurezza dell'impianto, del prodotto oppure dell'acqua di scarico. Un'utilizzazione del calore residuo è tuttavia possibile se viene incorporata una «barriera». Una soluzione ancora poco conosciuta di questo problema è costituita dall'applicazione del procedimento a tubo doppio in cui non vengono utilizzati i costosi circuiti di sicurezza. In questo caso il problema della trasmissione sicura del calore è risolto mediante uno scambiatore (figura 64).

### Produzione combinata di forza e calore

La produzione combinata di forza e calore – ossia la produzione contemporanea di lavoro meccanico e di calore partendo da altre forme d'energia mediante turbine a vapore, turbine a gas, motori diesel o motori a gas – è trattata in un fascicolo ato della presente collana.



Fascicolo 4; fascicolo 1, capitoli 2.5 e 3.4

### Impianti ORC

Gli impianti ORC (Organic Rankine Cycle) sono costituiti da impianti per la produzione combinata di forza e calore nei quali è prodotta energia elettrica a partire da calore residuo con una temperatura oscillante tra 16 e 300°C mediante un processo ciclico. Le prime esperienze fatte con gli impianti suddetti dimostrano che gli impianti ORC possono, in singoli casi, sfruttare il calore residuo in modo assolutamente redditizio. Da tali impianti non ci si attende, tuttavia, un contributo notevole per quanto concerne l'UCR.

## B. Casi pratici

### Ditta per lo sviluppo dei film

**Dati preliminari ed obiettivi:** in una ditta per la lavorazione delle fotografie, con circa 350 posti di lavoro, deve essere gestita l'utilizzazione del calore residuo con l'impiego di pompe di calore e di scambiatori di calore.

**Progetto:** i problemi «fotochimica», «processi di lavorazione» e «climatizzazione dei locali» devono fare parte di un progetto (figura 66).

**Descrizione dell'impianto:** il raccordo tra la climatizzazione e la lavorazione avviene negli scambiatori di calore che servono al raffreddamento dell'aria per l'impianto dei computer e per l'impianto generale di condizionamento dell'aria. L'acqua riscaldata in questo modo di circa 6°C viene addotta agli evaporatori delle macchine frigorifere. L'acqua utilizzata per il processo di lavorazione ed il cui consumo varia fortemente viene captata da un accumulatore a monte, di una capienza di 42 m<sup>3</sup> e che viene in primo luogo preriscaldato da una macchina frigorifera che lavora ad una bassa temperatura di condensazione.

### Ditta per lo sviluppo dei film

Progetto: Innovent Zürich AG

Fatto il paragone tra le cifre concernenti il consumo di energia dal 1984 al 1990 si ottiene, con riferimento ad una potenza di produzione unitaria, un risparmio di 640 MWh/a di olio, con un aumento del consumo di corrente elettrica di 150 MWh/a.

In questo modo risulta un'amplificazione elettrotermica  $AET = 640 / 150 = 4,27$ .

Riquadro 65

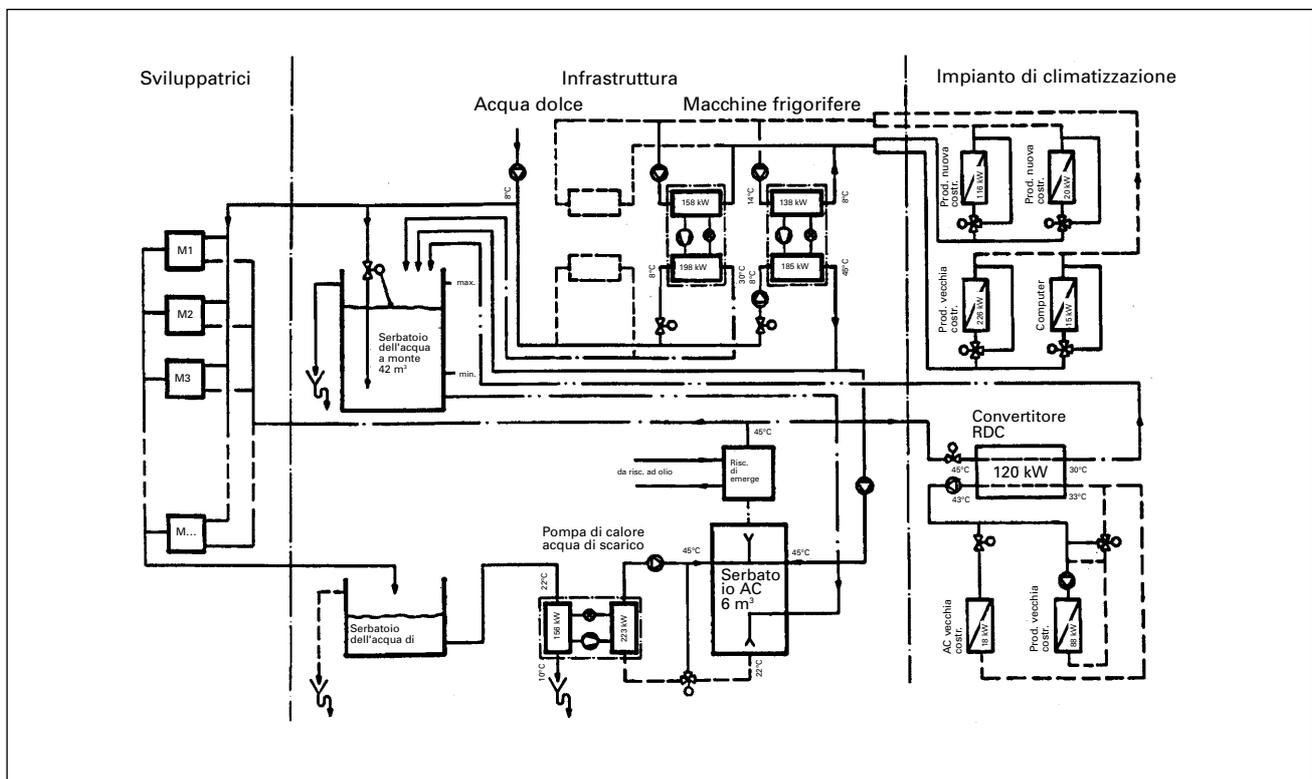


Figura 66: schema di principio del caso pratico «ditta per lo sviluppo dei film»

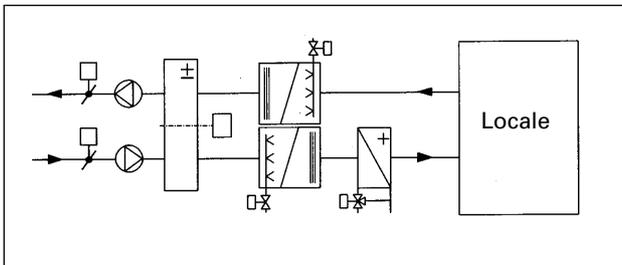


Figura 67: schema di principio del caso pratico «raffreddamento debole»

**«Raffreddamento debole»**

Progetto: Gähler + Partner AG, Ennetbaden

Edificio amministrativo di quattro piani:

- ore di funzionamento (5 giorni alla settimana) 12 h/giorno
- cambiamenti dell'aria all'ora 1,7...2,6

Scambiatore di calore a rotazione con condensazione:

- rendimento della temperatura ca 75%
- rendimento dell'umidità ca 15...75%
- amplificazione elettrotermica ca 16

Comfort d'inverno:

- temperatura ambiente 20...22°C
- umidità ambiente min. 35%

Comfort d'estate

- temperatura ambiente senza PC fino a 28°C
- temperatura ambiente con PC fino a 30°C
- umidità ambiente fino a 70%

Redditività in confronto ad un impianto convenzionale:

	Raffreddamento meccanico CA = 3,4	«Raffreddamento debole» CA = 2,2	Risparmio
Investimenti	550'000 Fr.	326'000 Fr.	41%
Elettricità	62,0 MWh/a	32,4 MWh/a	48%
Olio per risc.	7'320 kg/a	4'750 kg/a	36%
Costi dei capitali	52'000 Fr./a	30'800 Fr./a	41%
Costi di manutenz.	25'600 Fr./a	15'200 Fr./a	41%
Costi dell'energia	16'600 Fr./a	9'300 Fr./a	44%
Costi annuali	94'200 Fr./a	55'300 Fr./a	41%

Base: prezzo dell'olio 0,4 Fr./kg, prezzo medio della corrente elettrica 12 ct./kWh, interesse 7%, aumento dei prezzi per l'elettricità ed i costi d'esercizio 5%, aumento dei prezzi dell'olio combustibile 6%, durata minima d'utilizzazione 20 anni

Riquadro 68

Mediante una pompa di calore elettrica che sfrutta il calore residuo dell'acqua di processo, l'acqua dell'accumulatore a monte viene riscaldata alla temperatura necessaria di circa 45°C nell'accumulatore per l'acqua calda della capienza di 6 m<sup>3</sup>. A dipendenza dallo stato della carica, la macchina frigorifera che lavora ad una temperatura di condensazione più elevata immette il proprio calore residuo nell'accumulatore dell'acqua calda, rispettivamente nell'accumulatore a monte. Dall'accumulatore dell'acqua calda, l'acqua calda di processo giunge alle macchine di lavorazione, nelle quali la temperatura è portata al livello necessario mediante miscelazione di acqua fredda. Il riscaldamento dei locali è parimenti collegato all'accumulatore dell'acqua calda attraverso uno scambiatore di calore. Nel caso di una produzione insufficiente di calore residuo viene inserito il riscaldamento esistente, che funziona ad olio.

**Redditività:** nell'azienda viene eseguito un miglioramento continuo degli impianti (riquadro 65). I costi corrispondenti sono sommati a quelli di manutenzione. Non esistono termini di rimborso per le singole misure.

**«Raffreddamento debole»**

**Dati preliminari ed obiettivi:** grazie alla progettazione integrale, con l'ausilio di calcoli di simulazione per flussi energetici incostanti deve essere sviluppato un progetto di ventilazione che per il raffreddamento dei locali utilizza, invece di un raffreddamento meccanico, il principio dell'evaporazione, combinato con RDC. Questo progetto che utilizza il «raffreddamento debole» è favorevole per quanto concerne i costi, ma non permette di ottenere un «supercomfort».

**Progetto:** per il raffreddamento dell'aria dei locali serve un impianto RDC con raffreddamento ad evaporazione nell'aria viziata. Per motivi di costi d'esercizio è utilizzato un umidificatore speciale per acqua di alimentazione non preparata. Il riscaldamento locale copre al 100% il fabbisogno di energia per il riscaldamento. Una protezione dai raggi del sole all'esterno utilizzando avvolgibili, nonché un'illuminazione ottimizzata con calore residuo di poca entità limitano la quantità di calore durante l'estate. Per il calore residuo degli apparecchi, come base viene preso in considerazione un personal computer per ogni posto di lavoro, quale limite superiore. I vantaggi rispetto alle soluzioni convenzionali sono costituiti dai costi minori per gli apparecchi e per l'energia e da una quantità d'aria corrispondentemente minore, nonché da spese di manutenzione e di cura parimenti minori. Svantaggioso può essere considerato il comfort

**Descrizione dell'impianto:** l'aria viene addotta nel locale attraverso lo scarico per mezzo del ventilatore dell'aria di alimentazione, del RDC e dell'aeroterma (figura 67). L'aria viziata transita attraverso l'umidificatore laminare adiabatico, l'impianto RDC, il ventilatore per l'aria viziata, per poi giungere all'aperto attraverso il vano dell'aria di smaltimento. L'impianto lavora con una quantità d'aria costante. Durante l'inverno funziona l'unità RDC. L'aria di alimentazione viene in questo modo preriscaldata e, nel caso di condensazione dell'aria viziata (a temperature esterne molto basse), anche umidificata. Qualora necessario l'aria di alimentazione viene umidificata successivamente ed in seguito riscaldata con l'aeroterma ad una temperatura nominale variabile. In estate con il funzionamento a freddo durante il giorno, nell'umidificatore laminare l'aria viziata viene raffreddata adiabaticamente fino a 22°C e portata ad un'umidità relativa di circa 95%. Mediante l'impianto RDC inserito successivamente, l'aria esterna calda (compreso il calore residuo del ventilatore dell'aria di alimentazione) viene raffreddata tramite l'aria di smaltimento fredda e senza scambio di umidità. Il funzionamento a freddo durante la notte avviene tramite il ventilatore dell'aria di alimentazione e quello dell'aria viziata e, in parte, mediante l'umidificatore dell'aria viziata. In generale gli utenti sono soddisfatti per quanto concerne il comfort. Durante l'estate, tuttavia, la climatizzazione dei locali è percepita come troppo calda nei locali muniti di PC. Per esigenze future di comfort più elevate sono previsti raccordi per un raffreddamento meccanico (ca 30 kW). Dati ulteriori sono indicati nel riquadro 68.

**Redditività:** a causa del ricambio d'aria esiguo e della soppressione del raffreddamento meccanico vengono utilizzati circa 30 MWh in meno di elettricità (il consumo aumentato di 20 m<sup>3</sup> di acqua all'anno ha un'importanza insignificante per quanto concerne l'umidificazione dell'aria). I bassi costi del capitale, di manutenzione e dell'energia permettono un risparmio sui costi del 41%, ossia Fr. 39'000.- all'anno. Questi risparmi hanno tuttavia come conseguenza un minor comfort (nei giorni più caldi temperatura fino a 30°C nei locali con i PC), fatto che non è possibile in questa sede esprimere in cifre. Occorre quindi appurare in ogni singolo caso se un tale progetto possa essere realizzato.

### Freddo di condizionamento in inverno

**Dati preliminari ed obiettivi:** il basso fabbisogno di freddo in inverno deve poter essere coperto senza i compressori ad espansione, ossia solo con gli utilizzatori «del freddo» presenti.

**Progetto:** inserendo l'utilizzatore «del freddo»

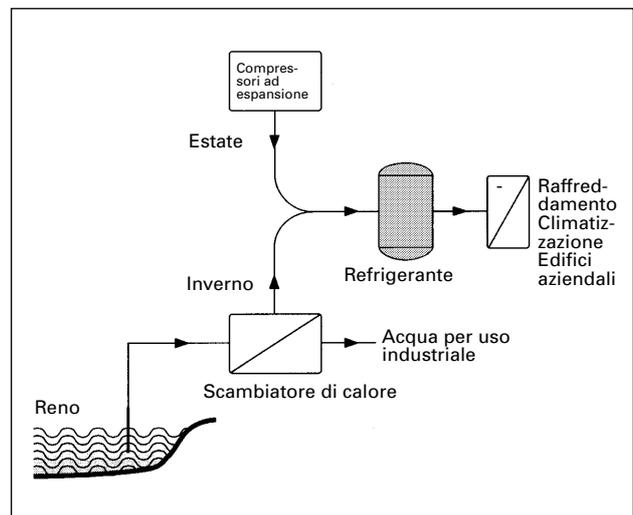


Figura 69: schema di principio del caso pratico «freddo di condizionamento in inverno»

### Freddo di condizionamento in inverno

Progetto: F. Hoffmann - La Roche AG, Basilea

Potenze sviluppate dai compressori ad espansione:

- 1 compressore ad espansione da 699 kW	699 kW
- 2 compressori ad espansione da 681 kW	1362 kW
- 2 compressori ad espansione da 368 kW	736 kW
- totale	2797 kW

Refrigerante 66 m<sup>3</sup>

Scambiatori a piastre:

- potenza	900 kW
- temperature nel circuito di raffreddamento	4/11°C

Redditività:

- risparmio di elettricità	400 MWh/a
- investimenti supplementari	125'000.- Fr.
- costi annui del capitale	13'750.- Fr./a
- risparmio annuo medio sui costi dell'energia	56'850.- Fr./a
- risparmio annuo medio sui costi netti	43'100.- Fr./a

Base: prezzo della corrente 10 ct./kWh, interessi 7%, aumento del prezzo dell'elettricità 5%, durata d'utilizzazione 15 anni

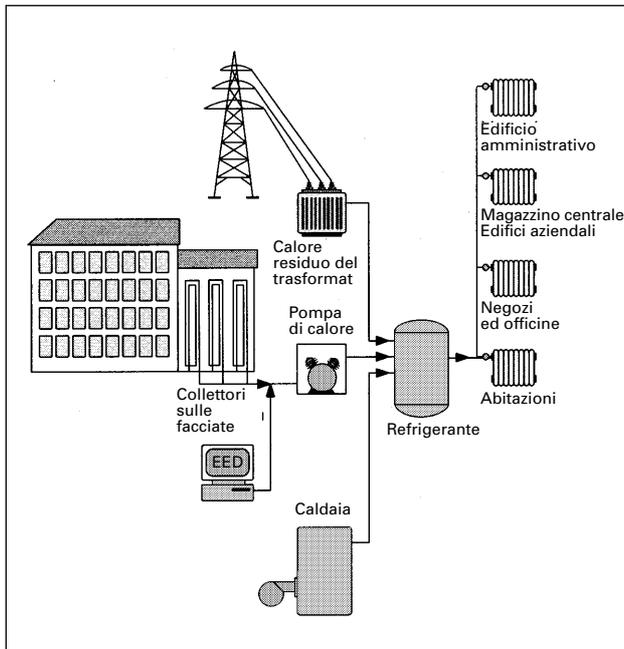


Figura 71: schema di principio del caso pratico «interconnessione per la produzione del calore e per il raffreddamento»

«acqua del Reno», in inverno nel circuito idrico della fabbrica può essere sospeso il funzionamento delle macchine frigorifere.

Il raccordo con la rete di raffreddamento ha luogo mediante uno scambiatore di calore a piastre. Con un riscaldamento esiguo l'acqua per uso industriale può in seguito essere ancora utilizzata per altri tipi di raffreddamento. Le macchine frigorifere saranno fatte funzionare solo durante l'estate.

**Descrizione dell'impianto:** nella figura 69 è raffigurato schematicamente l'impianto frigorifero di climatizzazione. Lo scambiatore di calore a piastre (per i dati tecnici cfr. riquadro 70) viene inserito nel ritorno del circuito dell'acqua per uso industriale. La commutazione sul funzionamento con le macchine frigorifere ha luogo non appena l'acqua per uso industriale ha raggiunto un livello di temperatura elevato.

**Redditività:** con costi d'investimento di Fr. 125'000.- per il raffreddamento supplementare dell'acqua del Reno, questo tipo d'esercizio permette un risparmio annuo di 400'000 kWh di elettricità, corrispondenti a Fr. 43'100.-. L'investimento ha un termine di rimborso di neppure 3,5 anni. È possibile inoltre evitare le punte di corrente, che sono costose. A ciò si aggiungono minori perdite di mezzi refrigeranti, lavori di manutenzione pure minori e meno rumore dovuto ai compressori.

### Interconnessione per la produzione del calore e per il raffreddamento

**Dati preliminari ed obiettivi:** un'interconnessione per la produzione del calore e per il raffreddamento deve garantire il riscaldamento dei locali amministrativi e di quelli destinati all'esercizio con l'impiego minimo possibile di energia esterna. Occorre tener conto in modo adeguato della redditività e della diversificazione dell'approvvigionamento energetico.

**Progetto:** utilizzazione del calore residuo dei trasformatori, dell'impianto di EED, nonché utilizzazione del calore ambientale per mezzo di pannelli assorbenti posti sulle facciate e della pompa di calore per il carico di base (figura 71). Le caldaie per il riscaldamento esistenti, che sono state risanate, devono essere utilizzate soltanto per la copertura dei carichi di punta.

**Descrizione dell'impianto:** per la copertura del carico di base serve da un lato il calore residuo di due trasformatori, nel qual caso il prelievo del calore ha luogo tramite scambiatori di calore olio-acqua a doppia parete. D'altro lato il calore dell'ambiente irradiato dalle superfici delle facciate sulle quali batte il sole (lato sud-est e sud-ovest) e nelle quali sono

immurati tubi di materia sintetica, viene sfruttato mediante pompe di calore elettriche. La separazione idraulica di ambedue le superfici dei collettori causa un miglior comportamento di carico parziale. La caldaia per il riscaldamento dovrà soddisfare soltanto il fabbisogno di punta che si manifesterà raramente. Grazie al calore residuo dei trasformatori le pompe di calore lavorano solo fino ad una temperatura esterna di 8°C. Durante la mezza stagione (temperature esterne da 8 a 16°C, per una durata di circa 3000 h) il calore residuo degli impianti EED viene scaricato di volta in volta direttamente nell'ambiente attraverso le facciate più fredde. Mediante un sistema di gestione l'impianto funzionerà in modo durevole ed ottimale. I ripartitori del calore esistenti sono stati trasformati per poter funzionare ad una portata variabile ed il riscaldamento con elementi riscaldanti poteva essere regolato ad una temperatura di ritorno massima di 50°C. I dati tecnici sono riassunti nel riquadro 72.

**Redditività:** i costi d'investimento globali ammontano a Fr. 1'560'000.–. Ai prezzi correnti risultano Fr. 160'000.– di costi annuali. Riportati ai prezzi attuali risultano costi, senza l'inflazione, di circa Fr. 100'000.– annui. Per una quantità di calore corrispondente a 1000 MWh/a risultano, di conseguenza, costi specifici del calore di circa 10 ct./kWh. Per il completamento si calcola una quantità corrispondente a 2000 MWh/a; si può quindi contare su un prezzo di circa 5 ct./kWh.

### C. Pinch Design Method

Un impianto termotecnico può essere rappresentato come una rete di scambiatori di calore con flussi di sostanze. Per condizioni stabili di funzionamento, con il Pinch Design Method (qui di seguito detto P.D.M.) può essere determinato il minimo teorico di energia che deve venire addotta dall'esterno per una determinata serie di flussi di sostanze che devono essere riscaldate e raffreddate a date temperature iniziali e finali. La denominazione P.D.M. deriva dalla tipica strozzatura (in inglese «pinch») delle cosiddette curve d'interconnessione nel diagramma di temperatura dell'entalpia (figura 73).

Ambedue le curve d'interconnessione (caldo, freddo) sono formate ognuna dalla somma delle entalpie negli intervalli di temperatura considerati di tutti i flussi di sostanze che trasmettono calore (calde) e che assorbono calore (fredde). Il P.D.M. presuppone per un dato processo soltanto la conoscenza dei flussi termici e delle temperature relative. La differenza di temperatura minima  $\Delta T_{\min}$  del pinch si manifesta nel caso di un'entalpia determinata. La zona della sovrapposizione delle curve parallela all'asse dell'entalpia fornisce il

#### Interconnessione per la produzione del calore e per il raffreddamento

Progetto: Elektra Birseck Münchenstein

Potenza calorifica:	
– 1a tappa	700 kW
– completamento	ca 1'300 kW
2 trasformatori:	
– tensione	150/13 kV
– potenza apparente	40 MVA
– potenza del calore residuo	50...120 kW
Accumulatore dell'acqua calda	30 m <sup>3</sup>
Pompa di calore:	
– potenza calorifica	260 kW
– potenza elettrica assorbita	92 kW
– 4 pompe di circolazione insieme	8 kW
– superficie delle facciate	1'590 m <sup>2</sup>
Potenza dell'impianto di clim. EED:	
– cabine di condizionamento per computer	80 kW
– FESI	10 kW
Gruppo acqua fredda (2 compressori):	
– potenza di raffreddamento	122 kW
– potenza elettrica assorbita	56 kW
Produzione globale di calore:	
– 1a tappa	1'009 MWh/a
– completamento	ca 2'000 MWh/a
Amplificazione elettrotermica	4
Redditività:	
– costi globali d'investimento	1'560'000.– Fr.
– costi annui ai prezzi correnti	160'000.– Fr./a
– costi annui senza inflazione	100'000.– Fr./a
– costi specifici del calore	
1a tappa	10 ct./kWh
completamento	ca 5 ct./kWh

Base: prezzo nafta 0,4 Fr./kg, prezzo medio della corrente 12 ct./kWh, tasso d'inflazione 4%, interessi 7%, aumento dei prezzi per l'elettricità ed i costi d'esercizio 5%, aumento dei prezzi della nafta 6%, durata media di utilizzazione 30 anni

Riquadro 72

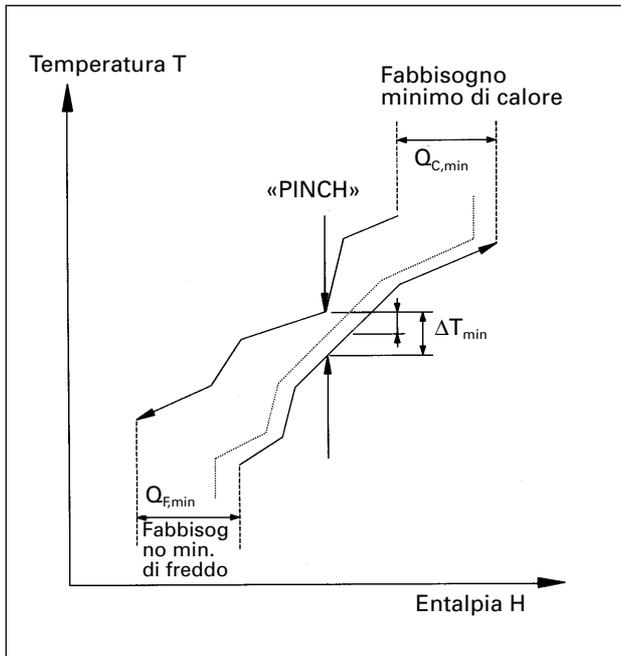


Figura 73: Pinch Design Method con curve d'interconnessione «caldo» (in alto) e «freddo» (in basso). La linea tratteggiata indica la situazione per uno spostamento a sinistra della curva d'interconnessione «freddo». In tal caso  $\Delta T_{min}$  diminuisce e, di conseguenza, diminuisce anche il fabbisogno minimo di energia per il riscaldamento e per il raffreddamento

Con questo metodo è possibile determinare in modo globale la buona qualità di diverse reti per la trasmissione del calore. Con l'accertamento della differenza di temperatura minima può essere calcolato il guadagno termico massimo e possono essere valutati le dimensioni della rete, nonché i costi. Il P.D.M. costituisce uno strumento per la valutazione dell'ottimizzazione di una rete per la trasmissione di calore. Esso viene completato mediante i metodi di ottimizzazione della rete per una gamma completa di condizioni d'esercizio variabili.

Un consumo maggiore di energia si manifesta allorché in un processo si commette un errore in uno dei punti seguenti:

- raffreddamento con aria oppure con acqua di raffreddamento al di sopra del pinch
- riscaldamento con energia esterna al di sotto del pinch
- riscaldamento di un flusso di sostanze al di sotto del pinch mediante un flusso caldo di sostanze al di sopra del pinch.



Linhoff, B e al.: *A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*. Rugby: Institution of Chemical Engineers, 1982.

Reimann, K.A.: *The Consideration of Dynamics and Control in the Design of the Heat Exchanger Networks*. Zurigo: Politecnico federale (PFZ), 1986 (dissertazione PFZ n. 7916).

Körner, H.: *Optimaler Energieeinsatz in der chemischen Industrie*. In: *Chemie-Ingenieur-Technik*, Bd. 60, 1988, pagg. 511-518 (prestito: biblioteca PFZ, Sign. P513924:60).

## D. Liste di controllo RAVEL

Per ogni fonte e per ogni utilizzatore viene riempita una lista di controllo in occasione dell'avvio di un esercizio. Esempi per fonti ed utilizzatori sono riassunti nelle tabelle 74 e 75. Le schede sono utilizzabili in modo generale nell'impiantistica e nella tecnologia dei procedimenti industriali.

 *Spiegazione dei parametri al capitolo 4*

 *Per un'analisi completa dovrebbero essere riportati i valori specifici sulla base di valori di misurazione attendibili. Qualora ciò non fosse possibile i valori dovrebbero essere valutati il più esattamente possibile e solo da ultimo dovrebbero essere utilizzati i valori empirici.*

### Lista di controllo RAVEL «Fonte di calore»

Le ultime tre colonne servono alla valutazione della fonte. Nella colonna «\*\*\*» sono segnate le caratteristiche che non creano problemi. Con l'aumento del grado di difficoltà tecnica sono necessarie iscrizioni nella colonna «\*\*» oppure «\*». Le singole caratteristiche hanno lo stesso peso. Nella colonna inferiore vengono tirate le somme. Se sono superiori le iscrizioni nella colonna «\*», si potrà essere certi che ci si troverà di fronte a grandi difficoltà nella realizzazione. In tali casi un'utilizzazione sarà spesso razionale soltanto nel caso di una grande quantità di calore residuo. Qualora vi fosse anche una sola grandezza nella colonna «\*» oppure «\*\*», si renderebbero necessarie chiarificazioni delle posizioni in questione. Se i chiarimenti preliminari non indicano la possibilità di una soluzione accettabile, la sorgente non può essere presa in considerazione per questa utilizzazione.

### Lista di controllo RAVEL «Utilizzatore del calore»

Per la valutazione dell'utilizzatore si fa una suddivisione in «senza problemi», «possibile» e «impegnativo». Determinanti sono il tipo di utilizzatore ed il luogo di utilizzazione.

### Interconnessione

Per il raccordo tra la fonte e l'utilizzatore devono essere paragonate l'una con l'altra le differenti grandezze tratte dalle liste di controllo. In tal caso valgono come criteri principali:

– differenza di temperatura tra la fonte m e

Tipo di fonte	Termovettore	Esempio
Elettr./elettr.	Aria calda Acqua per risc. Refrigeranti	Trasformatore App. alimentato dalla rete Computer
Elettr./meccanica	Aria calda Acqua per risc. Refrigeranti	Macchine
Elettr./termica	Aria calda Acqua per risc.	Forni fusori
Elettr./luce	Aria calda	Illuminazione con raffreddamento
Meccanica/elettr.	Aria calda Acqua per risc. Refrigeranti	Generatore
Meccanica/mec- canica	Aria calda Acqua per risc. Refrigeranti	Meccanismi, tecnologia meccanica dei procedimenti
Processi di com- bustione (combustibili)	Acqua per risc. Aria calda Gas combusti Vapore	Riscald. dei locali Apparecchi a vapore
Reattore chimico generale	Aria calda Acqua per risc. Refrigeranti	Reazione esotermiche nei recipienti di
Processo di produzione	Aria calda Acqua per risc. Refrigeranti	Impianti d'essiccazione

Tabella 74: tipi diversi di fonti di calore residuo con esempi e mezzi possibili per la rimozione del calore

Tipo di utilizzazione	Termovettore	Esempio
Calore per il comfort	Acqua per risc.	Corpi riscaldanti
	Acqua per risc. Aria calda	Aerotermi
	Acqua per risc. Vapore	Scaldacqua
	Vapore Olio per risc.	Generatori di vapore
Calore di processo	Acqua per risc. Vapore	Reattore con rec. riv.
	Acqua fredda Acqua/glicole	Refrigeratore dell'aria

Tabella 75: tipi diversi di utilizzatori del calore con esempi

Denominazione	Valore	Caso A	Caso B
Diff. di temperatura fonte - utilizzatore TF-TU	..... K	> 0 K	< 0 K
Rapporto energia tra offerta e fabbisogno EF/EU	.....	> 1	< 1
Intervallo cronol. delle punte max offerta/ fabbisogno PP(F-U)	..... h	0...99 h	> 100 h
Distanza fonte-utilizzatore D (F-U)	..... m	0...99 m	> 100 m

Tabella 76: lista d'interconnessione per una coppia fonti-utilizzatori collegata direttamente

Grandezza interconnessione	Conseguenze	
	Caso A	Caso B
TF-TU	Scambiatore di calore	Pompa di calore
EF-EU	Eccedenza Gestione del carico	Copertura parziale Gestione energia
PP (F-U)	Dimensioni accumulatore (breve durata) Adattamento	Dimensioni accumulatore (lunga durata) Strategia d'esercizio
D (F-U)	Dispendio trasporto: basso Perdite: basse	Dispendio trasporto: elevato Perdite: elevate

Tabella 77: grandezze d'interconnessione e conseguenze sul sistema

	U1 (valutazione)	U2 (valutazione)	U3 (valutazione)
F1 (valutazione)	TF1-TU1 EF1-EU1 PP(F1-U1) D(F1-U1)	TF1-TU2 EF1-EU2 PP(F1-U2) D(F1-U2)	TF1-TU3 EF1-EU3 PP(F1-U3) D(F1-U3)
F2 (valutazione)	TF2-TU1 EF2-EU1 PP(F2-U1) D(F2-U1)	TF2-TU2 EF2-EU2 PP(F2-U2) D(F2-U2)	TF2-TU3 EF2-EU3 PP(F2-U3) D(F2-U3)
F3 (valutazione)	TF3-TU1 EF3-EU1 PP(F3-U1) D(F3-U1)	TF3-TU2 EF3-EU2 PP(F3-U2) D(F3-U2)	TF3-TU3 EF3-EU3 PP(F3-U3) D(F3-U3)

Tabella 78: matrice di collegamento per tre fonti e tre utilizzatori di volta in volta; essa non è obbligatoriamente quadratica

- rapporto tra offerta di energia m e fabbisogno di energia n:  $EF_m/EU_n$
  - intervallo cronologico delle punte massime dell'offerta m e del fabbisogno n:  $PP(F_m-U_n)$
  - distanza tra la fonte m e l'utilizzatore n:  $D(F_m-U_n)$ .
- In casi semplici una fonte può essere collegata direttamente con l'utilizzatore. Negli impianti complessi vengono interconnessi parecchie fonti e diversi utilizzatori. Le grandezze essenziali di un allacciamento in una rete sono riportate nella lista di allacciamento per coppie scelte di fonti e di utilizzatori (tabella 76).

I valori delle grandezze di allacciamento determinano i sistemi da scegliere. Punti di riferimento approssimativi sono forniti dalla tabella 77. Il caso A è per lo più maggiormente favorevole per quanto concerne le esigenze tecniche ed il dispendio di quanto non lo sia il caso B.

La fattispecie può essere rappresentata in modo chiaro in una matrice di collegamento in cui le fonti sono ordinate per riga e gli utilizzatori per colonna (tabella 78). In ogni campo vengono riportate le 4 grandezze di collegamento. Naturalmente in tal modo saranno pochi i casi in cui una coppia determinata di fonti e di utilizzatori corrisponderà nel modo massimo possibile per quanto concerne tutte le caratteristiche di collegamento. Sarà perciò necessaria una valutazione dei diversi criteri.

In generale la formazione di coppie autonome di fonti e di utilizzatori non fornirà alcuna soluzione ottimale. Essa potrà tuttavia fornire come risultato un primo abbozzo di soluzione. Soltanto un'utilizzazione, conforme all'exergia, di diverse fonti con utilizzatori differenti in una rete di collegamento termico permette uno sfruttamento razionale dell'energia.

La soluzione elaborata in tale modo deve essere trasformata in uno schema del flusso energetico onde poter procedere ad un'ulteriore chiarificazione, tale da permettere in seguito un'analisi approssimativa del problema. I problemi concernenti la grandezza dei flussi energetici e le condizioni estreme permettono di addentrarsi nel processo di soluzione del problema.

Il limite della valutazione e della comprensibilità senza ausilio di strumenti potrà essere raggiunto mediante questo procedimento con circa 3 paia di fonti-utilizzatori. Per strutture più complesse si potranno utilizzare con vantaggio programmi e metodi facenti capo al computer.



Pinch Design Method nell'appendice C

.....  
 Denominazione **F** .....  
 Numero di riferimento

**FONTE DI CALORE**     Convertitore     Combustione     Processo

DATI CONCERNENTI L'IMPIANTO	
Periodo d'osservaz.	Anno, periodo di risc., ecc.
Consumo di energia	kWh per periodo
Perdite	% del consumo di energia
Calore residuo	% del consumo di energia
Quantità di cal. residuo	kWh per periodo m <sup>3</sup> /h
Portata	m <sup>3</sup> /h
Velocità di flusso	m/s
Pressione	Pa
Umidità	% umidità rel.
Densità	kg/m <sup>3</sup>
Capacità termica	kJ/kgK
Potenza	
Valore minimo:	..... kW
Valore medio:	..... kW
Valore massimo:	..... kW
Temperatura	
Valore minimo:	...../..... °C
Valore medio:	...../..... °C
Valore massimo:	...../..... °C
Ore di funzionamento	
Valore minimo:	.....h/g
Valore medio:	.....h/g
Valore massimo:	.....h/g
Dimensioni (schizzo)	

VALUTAZIONE		***	**	*
Tipo di funzionamento	<input type="checkbox"/> continuo *** <input type="checkbox"/> intermittente ** <input type="checkbox"/> dipendente dal carico **... *			
Forma dell'erogazione del calore	<input type="checkbox"/> dipendente da tubazione *** <input type="checkbox"/> diffusa *** *			
Termovettore	<input type="checkbox"/> acqua, aria *** <input type="checkbox"/> liquido, gas ** * <input type="checkbox"/> sostanze solide *			
Caratteristiche tecniche dei flussi	<input type="checkbox"/> convezione forzata *** <input type="checkbox"/> convezione libera **... *			
Caratteristiche fisiche	<input type="checkbox"/> omogeneo *** <input type="checkbox"/> disperso (lattiginoso), sotto forma di fumo **... * <input type="checkbox"/> abrasivo, inquinante * <input type="checkbox"/>			
Caratteristiche chimiche	<input type="checkbox"/> inerte (neutro) *** <input type="checkbox"/> corrosivo, inquinante **... * <input type="checkbox"/> infiammabile, esplosivo * <input type="checkbox"/>			
Caratteristiche fisiologiche	<input type="checkbox"/> senza pericolo *** <input type="checkbox"/> tossico **... * <input type="checkbox"/> inquinato, contaminato ***... * <input type="checkbox"/>			
Età dell'impianto	<input type="checkbox"/> impianto nuovo *** <input type="checkbox"/> a metà della durata di vita ***... ** <input type="checkbox"/> alla fine della durata di vita, sostituzione necessaria * <input type="checkbox"/>			
Istallazione	<input type="checkbox"/> centrale *** <input type="checkbox"/> decentralizzato **... * <input type="checkbox"/>			
Particolarità (prescrizioni, rischi, dipendenze, accessibilità, ecc)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>			
Valutazione globale	<input type="checkbox"/> adeguato, buono *** <input type="checkbox"/> possibile, utilizzabile ** <input type="checkbox"/> problematico *			

..... Denominazione

**U** ..... Numero di riferimento

**UTILIZZATORE DI CALORE**  Cal. per il comfort  Cal. di processo

Freddo di condiz.  Freddo di proc.

**DATI CONCERNENTI L'IMPIANTO**

Periodo d'osservaz.	Anno, periodo di risc., ecc.
Fabb.di cal./di freddo	kWh per periodo
Portata	m <sup>3</sup> /h
Velocità del flusso	m/s
Pressione	Pa
Umidità	% umidità rel.
Densità	kg/m <sup>3</sup>
Capacità termica	kJ/kgK
Fabbisogno di potenza	
Valore minimo: .....	kW
Valore medio: .....	kW
Valore massimo: .....	kW
Temperatura	
Valore minimo: .....	°C
Valore medio: .....	°C
Valore massimo: .....	°C
Ore di funzionamento	
Valore minimo: .....	h/g
Valore medio: .....	h/g
Valore massimo: .....	h/g
Dimensioni (schizzo)	

**VALUTAZIONE**

		***	**	*
Tipo di funzionamento	<input type="checkbox"/> continuo *** <input type="checkbox"/> intermittente ** <input type="checkbox"/> dipendente dal carico **... *			
Termovettore	<input type="checkbox"/> acqua/aria *** <input type="checkbox"/> vapore ** <input type="checkbox"/> olio per risc. * <input type="checkbox"/>			
Caratteristiche tecniche del flusso	<input type="checkbox"/> convezione forzata *** <input type="checkbox"/> convezione libera **... *			
Età dell'impianto	<input type="checkbox"/> impianto nuovo *** <input type="checkbox"/> a metà della durata di vita *** ... ** <input type="checkbox"/> alla fine della durata di vita, sostituzione necessaria * <input type="checkbox"/>			
Luogo di utilizzazione	<input type="checkbox"/> interno al processo (RDC) *** <input type="checkbox"/> interno all'esercizio (UCR) *** ... ** <input type="checkbox"/> esterno (UCR) *			
Particolarità (prescrizioni, rischi, dipendenze, accessibilità, ecc)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>			
Valutazione globale	<input type="checkbox"/> senza problemi *** <input type="checkbox"/> possibile ** <input type="checkbox"/> problematico *			
Osservazioni				

# Denominazioni, simboli, abbreviature

## Denominazioni e simboli

Amplificazione elettrotermica [-]	AET
Capacità termica spec. [J/kgK, kWh/kgK]	c
Coefficiente di trasmissione termica [W/m <sup>2</sup> K]	k
Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	ρ
Differenza di pressione [Pa, kPa]	Δp
Differenza di temperatura [K]	Δθ, ΔT
Differenza di temperatura, logaritmica media [K]	Δθ <sub>m</sub>
Durata di funzionamento [h]	t <sub>F</sub>
Energia, in gen. [J, MJ, Ws, kWh]	W
Energia ausiliaria [MJ, kWh]	W <sub>EA</sub>
Entalpia [J/kg, kJ/kg, kWh/kg]	h
Fattore di correzione, in gen. [-]	f
Fattore di distribuzione del carico [-]	f <sub>D</sub>
Flusso massico [kg/s, kg/h]	$\dot{m}$
Flusso termico [W, kW]	$\dot{Q}$
Flusso volumetrico [m <sup>3</sup> /h]	$\dot{V}$
Grado di utilizzazione [-]	η
Massa [kg]	m
Portata, flusso massico [kg/s, kg/h]	$\dot{m}$
Portata, flusso volumetrico [m <sup>3</sup> /h]	$\dot{V}$
Potenza calorifica (flusso termico) [W, kW]	$\dot{Q}$
Potenza, calore [W, kW]	$\dot{Q}$
Potenza, in gen. [W, kW]	P
Pressione [Pa, kPa]	p
Quantità di calore [J, kJ, Ws, kWh]	Q
Quantità di calore spec. [MJ/m <sup>3</sup> , kWh/m <sup>3</sup> ]	q
Rendimento [-]	η
Rendimento dell'entalpia [-]	η <sub>h</sub>
Rendimento dell'umidità [-]	η <sub>x</sub>
Rendimento della temperatura [-]	η <sub>θ</sub>
Ricambio d'aria [-]	RA
Ricupero dell'energia [MJ, kWh]	RE
Ricupero netto dell'energia [MJ, kWh]	REN
Superficie [m <sup>2</sup> ]	A
Temperatura [°C]	θ
Temperatura, assoluta [K]	T
Tempo [s, h]	t
Umidità, assoluta [g/kg]	x
Umidità, relativa [%]	φ
Velocità [m/s]	v

## Indici

Mezzo erogante calore	1_
Mezzo assorbente calore	2_
Entrata	_1
Uscita	_2

## Abbreviature

Accumulatore	ACC
Aria di alimentazione	AA
Aria di smaltimento	AS
Aria esterna	AE
Aria riciclata	AR
Aria viziata	AV
Fonte	F
Pompa di calore	PC
Ricupero del calore	RDC
Utilizzatore	U
Utilizzazione del calore residuo	UCR



Elenco completo nel fascicolo 1!

# Indice analitico

- Amplificatore elettrotermico, 6; 27
- Aria di smaltimento - RDC, 9
- Barriere di sicurezza, 44
- Caduta di pressione, 25
- Calore residuo diffuso, 23
- Calore residuo, 23
- Campi d'applicazione in vista di RAVEL, 6
- Campi d'applicazione, 41
- Casi pratici, 45
- Categorie I fino IV, 9
- Circuiti idraulici, 10
- Coefficiente di trasmissione termica, 24
- Compressione del vapore di scarico, 21
- Concetti RDC/UCR, 5
- Concetto dell'energia, 5
- Condensatore, 17
- Consumo di energia, 38
- Contaminazione, 11
- Costi esterni, 37
- Dati concernenti le prestazioni, 14
- Denominazioni, 55
- Diagramma di Sankey, 23
- Differenza di temperatura logaritmica, 24
- Differenza di temperatura, 24; 34; 36
- Dimensioni fornibili, 14
- Distanza tra fonte ed utilizzatore, 35; 36
- Durata di vita dell'impianto, 36
- Energia ausiliaria, 11; 25
- Fasi di progettazione, 40
- Flussi di calore residuo circoscritti, 23
- Formazione di ghiaccio, 11
- Formula degli scambiatori di calore, 24
- Grado di utilizzazione secondo SITC 89-1, 30
- Guadagno finanziario, 30
- Impianti della tecnica di ventilazione e di condizionamento per i processi industriali, 41
- Impianti frigoriferi, 41
- Impianto esistente, 33
- Impianto nuovo, 33
- Indicazioni concernenti la progettazione, 33
- Indici, 55
- Industria chimica, 43
- Industria, 41; 42
- Interconnessione di circuiti, 18
- Limiti RDC/UCR in RAVEL, 5
- Lista di controllo, 33
- Lista di controllo «Fonte di calore», 51
- Lista di controllo «Utilizzatore del calore», 51
- Metodi di misurazione, 37
- Metodi per il computer, 34
- Organic Rankine Cycle, 44
- Ottimizzazione, 30
- Parametri degli utilizzatori, 34; 35
- Parametri del raccordo, 34
- Parametri delle fonti, 34; 35
- Parametri, 26
- Pinch Design Method, 49
- Pompe di calore, 20
- Produzione combinata di forza e calore, 44
- Produzione di aria compressa, 42
- Protezione antigelo, 11
- Pulitura, 11
- Punte di potenza, 34; 37
- Quantità di calore recuperato, 28
- Raccordo tra fonte ed utilizzatore, 51
- Rapporto tra l'offerta di energia ed il fabbisogno energetico, 34; 36
- Redditività, 31; 36
- Regolazione della potenza, 10
- Rendimento dell'entalpia, 26
- Rendimento dell'umidità, 26
- Rendimento della temperatura, 26; 27
- Rendimento di motori e di ventilatori, 28
- Rendimento, 26
- Ricuperatore, 9
- Ricupero del calore, 5
- Ricupero netto dell'energia, 30
- Rigeneratore, 9
- Risanamento, 33
- Scambiatori di calore a fascio tubiero, 16
- Scambiatori di calore a grafite, 17
- Scambiatori di calore a piastre per l'aria, 14
- Scambiatori di calore a piastre per i liquidi, 15
- Scambiatori di calore a rotazione, 19
- Scambiatori di calore a serpentino, 16
- Scambiatori di calore a tubi, 16
- Scambiatori di calore a tubi per l'aria, 14
- Scambiatori di calore a tubo doppio, 16
- Scambiatori di calore di ceramica, 18
- Scambiatori di calore di materia sintetica, 18
- Separazione delle sostanze, 36
- Serie delle misure, 5
- Simboli, 55
- Sistemi di ricupero, 14
- Sostanze problematiche, 41
- Temperatura dell'aria esterna, 28
- Termocondotta, 19
- Trasformatore di calore, 22
- Trasmissione del calore, 24
- UCR esterna, 5
- UCR interna, 5
- Unità, 55
- Utilizzazione del calore residuo, 5