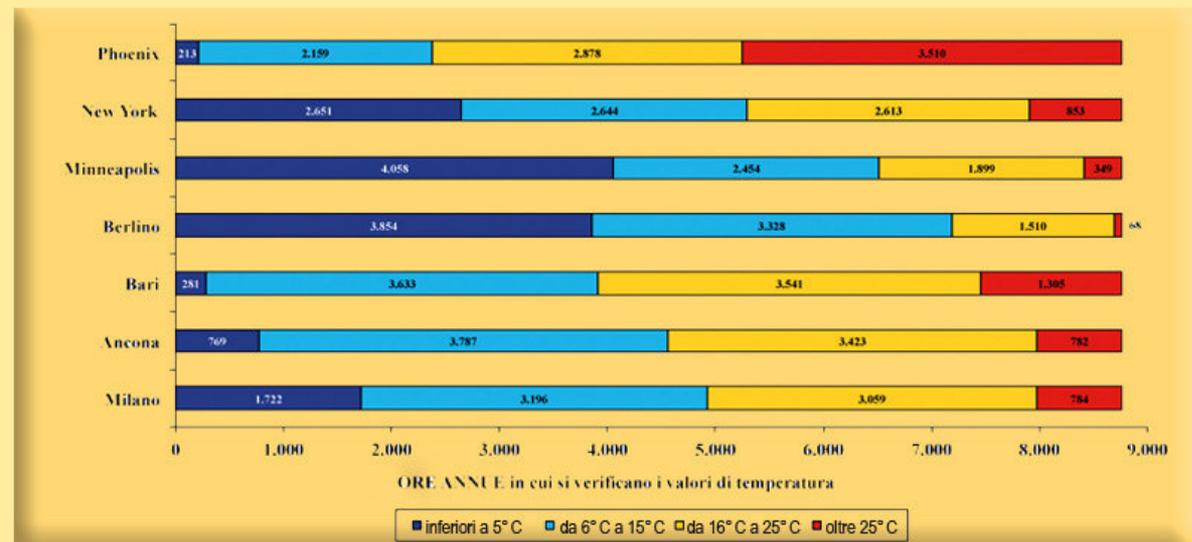


Il recupero energetico dall'aria espulsa



Michele Vio

IL RECUPERO DI CALORE DALL'ARIA ESPULSA



© 2014 Editoriale Delfino srl
via Lomellina, 33 - 20133 Milano
Tel. 02.7000.4542 - Fax 02.7000.5054
www.editorialedelfino.it

Prima edizione 2014

I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica, di riproduzione e di adattamento totale o parziale, con qualsiasi mezzo (microfilm, copie fotostatiche compresi), sono riservati per tutti i Paesi.

Nessuna parte di questo libro può essere riprodotta con sistemi elettronici, meccanici o altro senza l'autorizzazione scritta dell'Editore.

Si ringrazia la prof. Francesca Romana d'Ambrosio per il contributo alla realizzazione del volume

Finito di stampare nel mese di ottobre 2014

Prodotto interamente realizzato in Italia

Codice ISBN: 978-88-97323-34-1

LE GUIDE AiCARR

AiCARR, associazione culturale no profit, crea e promuove cultura e tecnica per il benessere sostenibile.

Nata nel 1960, AiCARR si è sempre occupata delle problematiche relative all'uso consapevole dell'energia e delle risorse naturali oltre che dell'innovazione delle infrastrutture energetiche, sia nel settore impiantistico che in quello edilizio.

AiCARR conta oltre 2400 Soci fra Progettisti, Costruttori di macchine, Installatori, Manutentori, Accademici, Ricercatori, Studenti, Funzionari di Enti e Agenzie Governative e di Istituzioni nazionali e internazionali, scientifiche e operative.

Gli scopi fondamentali di AiCARR sono la produzione e la diffusione della cultura del benessere sostenibile e la formazione e lo sviluppo professionale degli operatori di settore, al fine di incrementarne la qualificazione, il contributo alla discussione e alla elaborazione delle normative di settore, la collaborazione, in qualità di autorevole interlocutore, con altre Associazioni ed Enti governativi, italiani ed europei.

I settori di interesse di AiCARR sono la progettazione del sistema edificio-impianto, il progresso e la diffusione delle norme tecniche, l'innovazione delle tecnologie impiantistiche ed edilizie ai fini del risparmio energetico, la manutenzione degli impianti, la riqualificazione energetica degli edifici esistenti, l'utilizzo delle fonti rinnovabili.

In questo scenario si colloca l'attività editoriale di AiCARR, che affianca e supporta la struttura tecnico-scientifica dell'Associazione diffondendo informazioni e cultura attraverso la Collana AiCARR, di cui fanno parte le Guide.

Le Guide AiCARR, che sono un prodotto della Commissione Comitati Tecnici, vogliono rappresentare uno strumento utile per i Soci che in esse troveranno interessanti indicazioni per la loro attività professionale.

Francesca R. d'Ambrosio

Coordinatore della Sottocommissione Editoria della Commissione Cultura di AiCARR



GUIDA AiCARR

IL RECUPERO DI CALORE DALL'ARIA ESPULSA

AiCARR è un'associazione culturale il cui scopo principale è quello di favorire lo sviluppo sostenibile e il risparmio energetico. Per questo motivo ha il dovere di segnalare le eventuali incongruenze tra le varie leggi e normative nei campi di suo interesse.

La Guida sul recupero di calore dall'aria espulsa nasce in quest'ottica. E' ormai consuetudine utilizzare recuperatori di calore con efficienze sempre più elevate: in questa direzione spingono sia la normativa e la legislazione attualmente in vigore, sia la bozza del nuovo regolamento europeo "Laying down ecodesign for ventilation units", che alla data di pubblicazione di questa Guida non ha ancora un numero ufficiale. Questa impostazione, che forse è corretta nel clima freddo del nord Europa e in qualche misura nel clima continentale degli USA e nei climi molto caldi del medio oriente, è errata e fuorviante nel clima mediterraneo e in quello italiano in particolare, assai mite. Infatti, un eccessivo recupero di calore potrebbe portare a risultati opposti a quelli desiderati, con un sostanziale aumento della spesa di energia primaria. Il problema è serio, perché il rispetto dei valori delle efficienze minime imposte potrebbe impedire il rispetto dei consumi di energia primaria sanciti dalla Direttiva 2010/31/UE, la cosiddetta EPBD recast, portando a una evidente incongruenza nel rispetto della legge, che sarebbe insuperabile da parte del progettista termotecnico. Ciò è evidentemente in totale controtendenza con l'impostazione ufficialmente riconosciuta, ma è supportato dai principi della fisica, come questa Guida dimostra chiaramente.

Michele Vio

Autore della Guida

Past Presidenti di AiCARR



PRESENTAZIONE

Questa Guida, rivolta ai progettisti, agli energy manager e a tutti coloro che si occupano di gestione degli impianti HVAC, parte dall'assunto che la sola efficienza energetica non è sufficiente per definire le prestazioni energetiche dei recuperatori di calore.

La Guida illustra un nuovo approccio alla progettazione dei recuperatori di calore, che assimila l'energia recuperata a quella proveniente da un qualunque generatore il cui consumo è associato alla quota di energia, per lo più elettrica, necessaria per il suo funzionamento.

Come spesso accade con tutto ciò che è "nuovo", questo approccio potrà non trovare unanime consenso. AiCARR ha previsto che ciò possa accadere e non a caso questa Guida è disponibile sotto forma di power point sul sito dell'Associazione, in modo che se dovessero arrivare commenti sui suoi contenuti, questi saranno valutati e discussi e, se accettati, opportunamente inseriti nel testo. In sintesi, questa Guida, per il tipo di contenuti e per la modalità di diffusione rappresenta il primo tentativo editoriale di AiCARR di condividere con i Soci uno degli obiettivi primari dell'Associazione: fare cultura tecnica. E cultura tecnica significa anche confronto tra gli addetti ai lavori su argomenti specifici, soprattutto su temi affrontati con approcci diversi da quelli tradizionali.

Buona lettura da AiCARR, con l'augurio e con la speranza che l'Associazione contribuisca sempre più allo sviluppo della tecnica e della tecnologia, in modo da raggiungere l'unico vero scopo della progettazione energetica consapevole: rendere minimo il consumo di energia primaria.

Francesca R. d'Ambrosio

Coordinatore della Sottocommissione Editoria della Commissione Cultura di AiCARR



Gruppo di lavoro

Questa Guida è stata redatta da:

Michele Vio libero professionista

Revisori

La revisione di questa linea guida è stata fatta dai seguenti esperti che hanno fornito preziosi suggerimenti:

Francesca R. d'Ambrosio	Università degli Studi di Salerno
Federico Pedranzini	Politecnico di Milano
Luca A. Piterà	Segretario tecnico di AiCARR

La Commissione Comitati Tecnici ringrazia il Comitato Tecnico Sistemi impiantistici e Applicazioni che ha coordinato il lavoro

Federico Pedranzini

Presidente della Commissione Comitati Tecnici di AiCARR



1.	FONDAMENTI	11
2.	L'EFFICIENZA DEI RECUPERATORI DI CALORE	24
2.1	LA MISURA DELL'EFFICIENZA SECONDO IL METODO ASHRAE	27
2.2	LA MISURA DELL'EFFICIENZA SECONDO IL METODO DELLA NORMA UNI EN 308	39
2.3	CONFRONTO TRA I METODI ASHRAE E UNI EN 308	55
2.4	L'EFFICIENZA DEI RECUPERATORI IN SERIE	60
2.5	$\varepsilon > 1$: IL RAFFREDDAMENTO ADIABATICO INDIRECTO (RAI)	63
	2.5.1 <i>IL CONSUMO DI ACQUA NEL RAI</i>	76
2.6	I LIMITI DEL CONCETTO DI EFFICIENZA DEI RECUPERATORI	79
2.7	L'EFFICIENZA UTILE DEI RECUPERATORI DI CALORE	95
2.8	POTENZA MASSIMA RECUPERABILE.....	109
2.9	L'INDICE DI EFFICIENZA DEI RECUPERATORI DI CALORE	114
3.	LE PRESTAZIONI ENERGETICHE DEI RECUPERATORI DI CALORE	136
3.1	IL COP DEI RECUPERATORI DI CALORE	139
3.2	IL CONFRONTO PRESTAZIONALE TRA RECUPERATORE E GENERATORE	160
3.3	IL COP DEL SISTEMA	167
3.4	LA GERARCHIA DEL RECUPERO DI CALORE	178
4.	LA REGOLAZIONE DEL RECUPERO DI CALORE	183
4.1	IL BYPASS DEI RECUPERATORI DI CALORE	185
4.2	LA FORMAZIONE DI CONDENSA E DI GHIACCIO SULLE SUPERFICI DI SCAMBIO TERMICO	191
4.3	LE CONSEGUENZE ENERGETICHE DELLA REGOLAZIONE	200
4.4	LA GESTIONE DELLA REGOLAZIONE	209



5.	LE TIPOLOGIE DI RECUPERATORI	216
5.1	IL RECUPERO SENSIBILE	218
5.1.1	<i>I RECUPERATORI A PIASTRE (A FLUSSI INCROCIATI)</i>	219
5.1.2	<i>I RECUPERATORI A TUBI DI CALORE</i>	222
5.1.3	<i>I RECUPERATORI A BATTERIE CONIUGATE</i>	225
5.1.4	<i>I RECUPERATORI ROTATIVI SENSIBILI</i>	228
5.2	IL RECUPERO ENTALPICO	231
5.3	I RECUPERATORI TERMODINAMICI	233
5.3.1	<i>I RECUPERATORI TERMODINAMICI A ESPANSIONE DIRETTA</i>	235
5.3.2	<i>I RECUPERATORI TERMODINAMICI IDRONICI</i>	254
5.3.3	<i>I RECUPERATORI TERMODINAMICI IDRONICI CON POMPE DI CALORE AD ASSORBIMENTO</i>	267
5.3.4	<i>IL RECUPERO DI CALORE DAL SOTTORAFFREDDAMENTO DELLE POMPE DI CALORE</i>	272
5.4	I RECUPERATORI GEOTERMICI	291
5.5	I RECUPERATORI PER IL POST RISCALDAMENTO ESTIVO	296
5.5.1	<i>I RECUPERATORI RIGENERATIVI (RUN AROUND COIL)</i>	301
5.5.2	<i>I RECUPERATORI DI CALORE DALL'ARIA DI ESPULSIONE</i>	314
6.	L'UTILIZZO CONTEMPORANEO IN SERIE DI TIPOLOGIE DIVERSE DI RECUPERATORI	322
6.1	IL RECUPERATORE GEOTERMICO IN SERIE CON UN ALTRO RECUPERATORE	324
6.2	IL RECUPERATORE STATICO IN SERIE CON QUELLO TERMODINAMICO	332
7	IL FATTORE DI INFLUENZA PER LE PRESTAZIONI DEI RECUPERATORI DI CALORE ...	340
7.1	L'IMPORTANZA DEL CLIMA	345
7.2	LA TEMPERATURA E L'UMIDITÀ RELATIVA DELL'ARIA IN AMBIENTE	361



7.3	L'INFLUENZA DELLA TIPOLOGIA DI IMPIANTO	370
7.3.1	<i>GLI IMPIANTI AD ARIA PRIMARIA</i>	373
7.3.2	<i>GLI IMPIANTI A TUTTA ARIA</i>	380
7.4	IL FABBISOGNO TERMICO RICHIESTO DALL'AMBIENTE	386
7.5	L'UTILIZZO DEL FREE-COOLING	402
7.5.1	<i>L'UTILIZZO DEL FREE-COOLING TRADIZIONALE</i>	406
7.5.2	<i>L'UTILIZZO DEL FREE-COOLING INTEGRATO DAL RAD (RAFFREDDAMENTO ADIABATICO DIRETTO)</i>	419
7.5.3	<i>L'UTILIZZO DEL FREE-COOLING INTEGRATO DAL RAD E DAL RAI</i>	438
7.6	L'UMIDITÀ SPECIFICA DELL'ARIA IMMESSA	457
7.7	LA TEMPERATURA DELL'ARIA IMMESSA	479
7.7.1	<i>IL CASO DELL'ISOLAMENTO TERMICO SCARSO</i>	481
7.7.2	<i>IL CASO DELL'ISOLAMENTO TERMICO ELEVATO</i>	503
8	LA SCELTA DEL RECUPERATORE PIU' ADATTO	512
8.1	IL CALCOLO DELL'ENERGIA RICHIESTA PER IL TRATTAMENTO DELL'ARIA	514
8.1.1	<i>IL CALCOLO CON IL BIN METHOD DELL'ENERGIA RICHIESTA PER IL TRATTAMENTO DELL'ARIA</i>	517
8.1.2	<i>IL CALCOLO PUNTUALE DELL'ENERGIA RICHIESTA PER IL TRATTAMENTO DELL'ARIA</i>	521
8.1.3	<i>IL CALCOLO DELL'ENERGIA RICHIESTA PER IL TRATTAMENTO DELL'ARIA: ESEMPI</i>	525
8.2	L'INFLUENZA DELL'EFFICIENZA SENSIBILE DEL RECUPERATORE	539
8.2.1	<i>IL CASO DELL'ISOLAMENTO TERMICO SCARSO</i>	545
8.2.2	<i>IL CASO DELL'ISOLAMENTO TERMICO ELEVATO</i>	554



8.3	L'INFLUENZA DELL'EFFICIENZA LATENTE DEL RECUPERATORE	559
8.3.1	IL CASO DEL FABBISOGNO LATENTE BASSO.....	564
8.3.2	IL CASO DEL FABBISOGNO LATENTE ELEVATO	570
8.4	L'INFLUENZA DELL'UTILIZZO DEL RAI IN RAFFRESCAMENTO	581
8.5	IL CALCOLO DEL COP DEL SISTEMA	588
8.6	IL CALCOLO ENERGETICO STAGIONALE	602
8.7	ESEMPI DI CALCOLO	610
9	INFLUENZA DELLA POSIZIONE DEL VENTILATORE.....	637
10	CONCLUSIONI	650
11	SIMBOLOGIA	654



FONDAMENTI



Sia nella stagione invernale (riscaldamento) che in quella estiva (raffrescamento), l'aria espulsa da un ambiente interno abitato si trova generalmente in condizioni energetiche più favorevoli rispetto a quelle dell'aria esterna da immettere nell'ambiente.

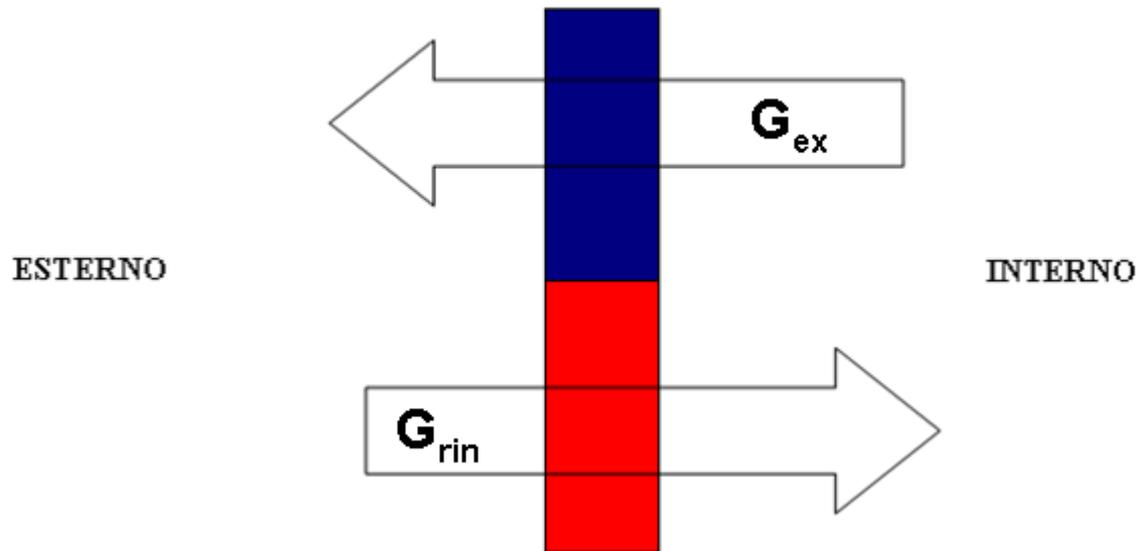
Si effettua un **recupero energetico dall'aria espulsa** quando si trasferisce energia termica da un flusso di aria a un altro.

In particolare, il trasferimento di energia avviene:

in RISCALDAMENTO: dal flusso di aria espulsa a quello dell'aria di rinnovo.

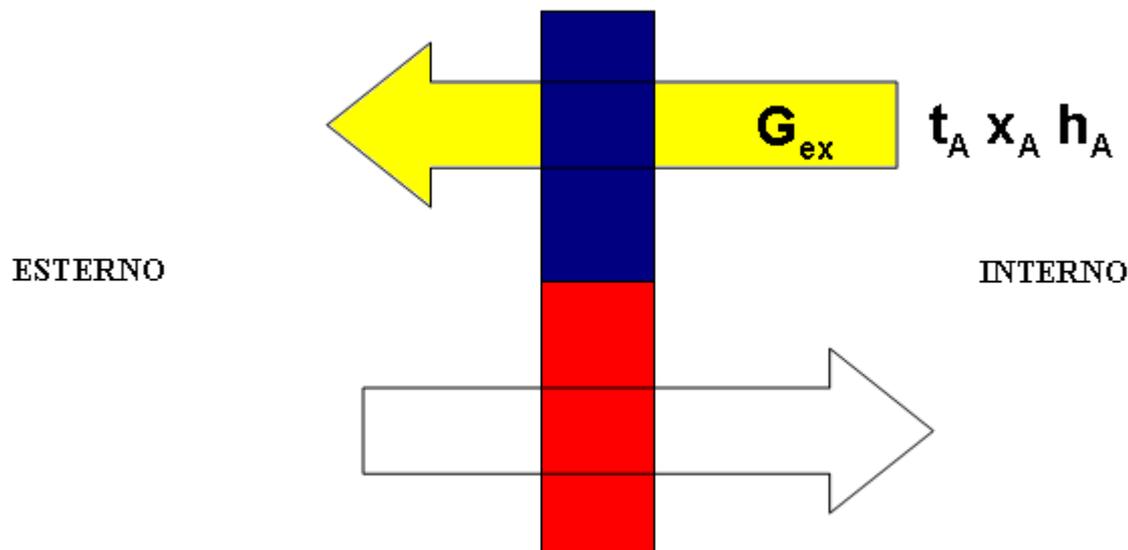
in RAFFRESCAMENTO: dal flusso di aria di rinnovo a quello di aria espulsa.

Il recupero di calore dall'aria espulsa avviene attraverso apparecchi definiti **recuperatori di calore**.



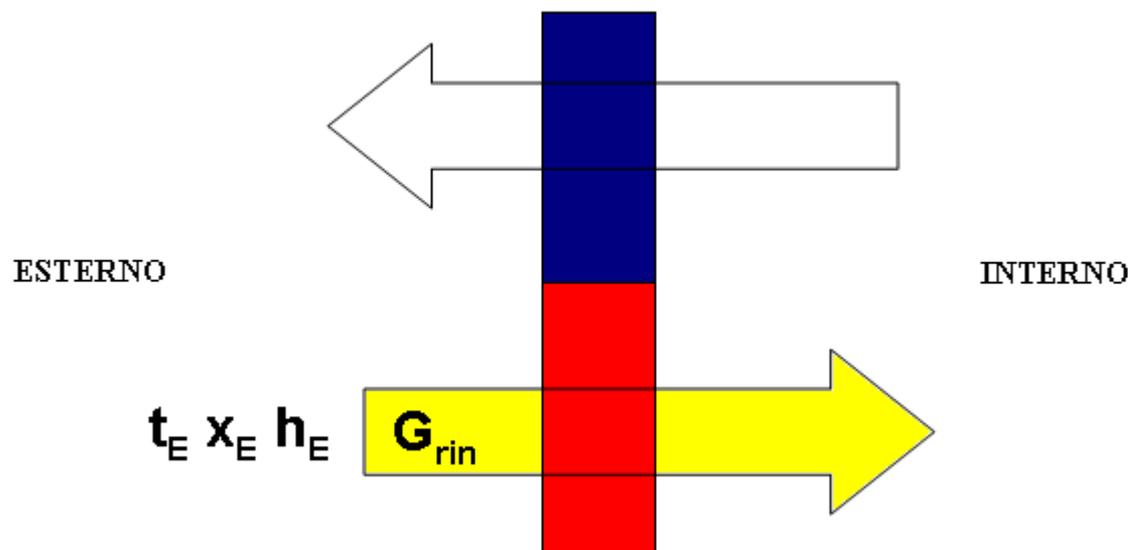
I **recuperatori di calore** sono apparecchi in grado di mettere a contatto il flusso di aria espulsa, caratterizzato da una portata di massa G_{ex} , con quello di aria di rinnovo, caratterizzato da una portata di massa G_{rin} .

I due flussi di aria si trovano a due diversi livelli di entalpia.

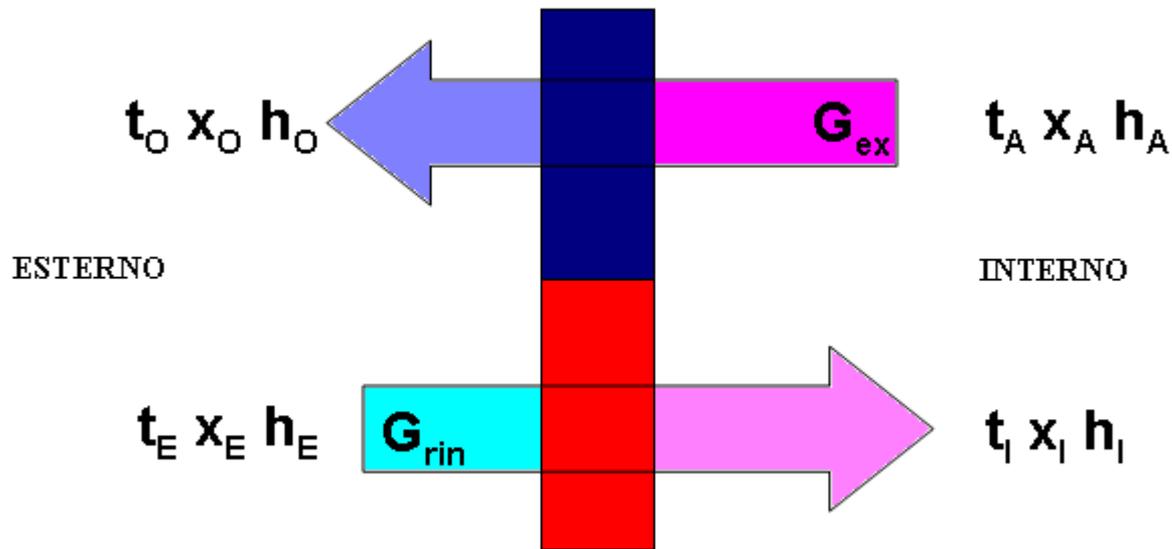


Il **flusso di aria espulsa** si trova generalmente alle condizioni dell'aria in ambiente (fanno eccezione gli impianti con distribuzione a dislocamento: l'aria viene ripresa nella parte alta dell'ambiente, a un valore di temperatura superiore a quello della zona occupata).

E' caratterizzato dai valori della temperatura, t_A , e dell'umidità specifica, x_A , e dal livello di entalpia, h_A .

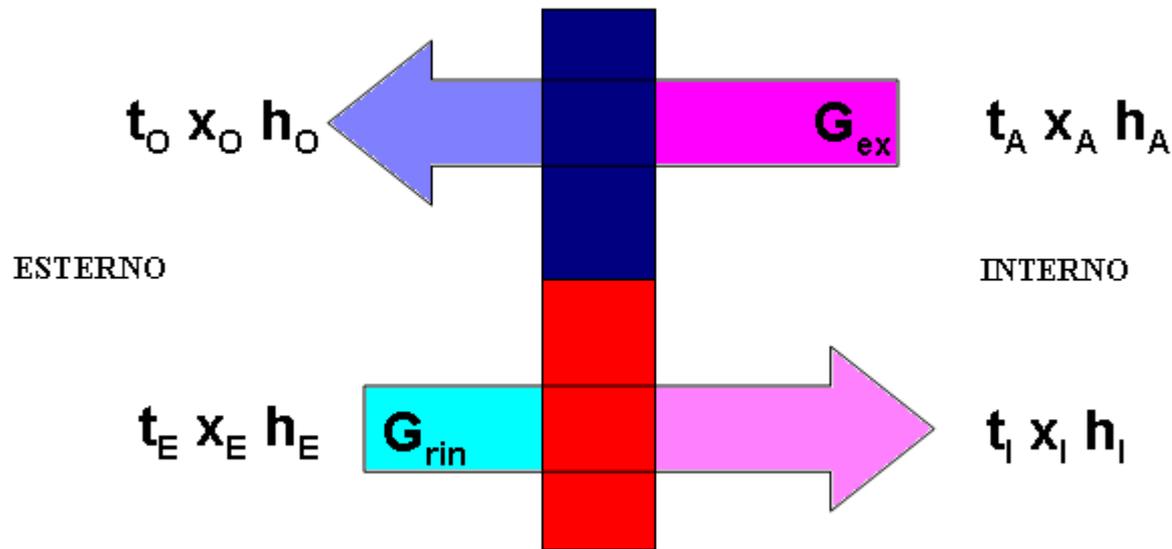


Il **flusso di aria di rinnovo** si trova generalmente alle condizioni dell'aria esterna. E' caratterizzato dai valori della temperatura, t_E e dell' umidità specifica, x_E , e dal livello di entalpia, h_E .



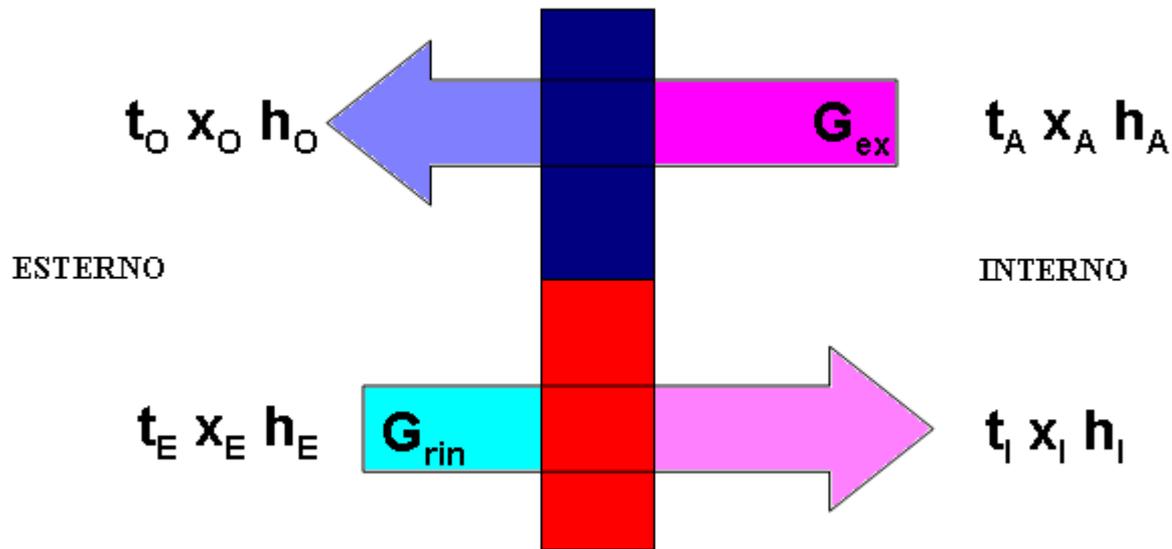
Dopo lo scambio termico, le condizioni dei due flussi di aria si modificano nel seguente modo:

- il flusso di aria espulsa, con portata di massa G_{ex} , si trova a un livello di entalpia h_o , caratterizzato dalla temperatura t_o e dall'umidità specifica x_o ;
- il flusso di aria di rinnovo, con portata di massa G_{rin} , si trova a un livello di entalpia h_I , caratterizzato dalla temperatura t_I e dall'umidità specifica x_I .



Lo scambio termico tra i due flussi può essere solo **sensibile**, nel qual caso si modifica solo la temperatura, oppure anche **latente**, nel qual caso si modifica anche l'umidità specifica.

Lo scambiatore è definito **SENSIBILE** nel primo caso e **ENTALPICO** nel secondo.



Tra i due flussi lo scambio può avvenire **senza o con** contatto diretto.

Nel primo caso non vi è alcuna miscelazione tra l'aria espulsa e quella di rinnovo, per cui la qualità dell'aria di rinnovo è sempre garantita. Nel secondo caso, invece, l'aria espulsa potrebbe inquinare la qualità dell'aria di rinnovo.

Negli **scambiatori entalpici** il contatto c'è sempre, perché si verifica un trasporto di massa nello scambio termico latente.



A seconda dei valori delle portate dei due flussi di aria si possono avere tre casi distinti:

1. $G_{rin} > G_{ex}$ la portata di aria di rinnovo è maggiore di quella dell'aria espulsa, in modo da mantenere l'ambiente in **sovrapressione**. La grandissima maggioranza degli impianti funziona in questo modo.
2. $G_{rin} = G_{ex}$ le due portate di aria sono uguali per cui l'ambiente è in condizioni **neutre**.
3. $G_{rin} < G_{ex}$ la portata di aria di rinnovo è minore di quella dell'aria espulsa, in modo da mantenere l'ambiente in **depressione**. Lavorano in questo modo solo alcuni reparti ospedalieri, ad esempio quelli dedicati alla cura di malattie infettive, o alcuni reparti industriali in cui sono trattate sostanze nocive.



Caso 1

Generalmente gli ambienti vengono mantenuti in leggera sovrappressione per evitare che l'aria entri in modo incontrollato attraverso le aperture verso l'esterno, quali finestre, porte e passaggi degli impianti, creando condizioni di discomfort termico. Immettendo in ambiente una quantità di aria maggiore rispetto a quella estratta si evita questo inconveniente: la portata eccedente esce dalle aperture per differenza di pressione tra ambiente interno ed esterno, creando una barriera alle rientrate indesiderate.

La sovrappressione va calcolata in funzione della geometria delle aperture, della loro tenuta e permeabilità, dell'orientamento dell'edificio, dell'eventuale presenza di venti prevalenti. La sovrappressione può anche cambiare in funzione delle condizioni climatiche, se l'impianto è concepito per farlo.

I principali testi sulla climatizzazione riportano i metodi per il calcolo corretto della sovrappressione da creare negli ambienti.