

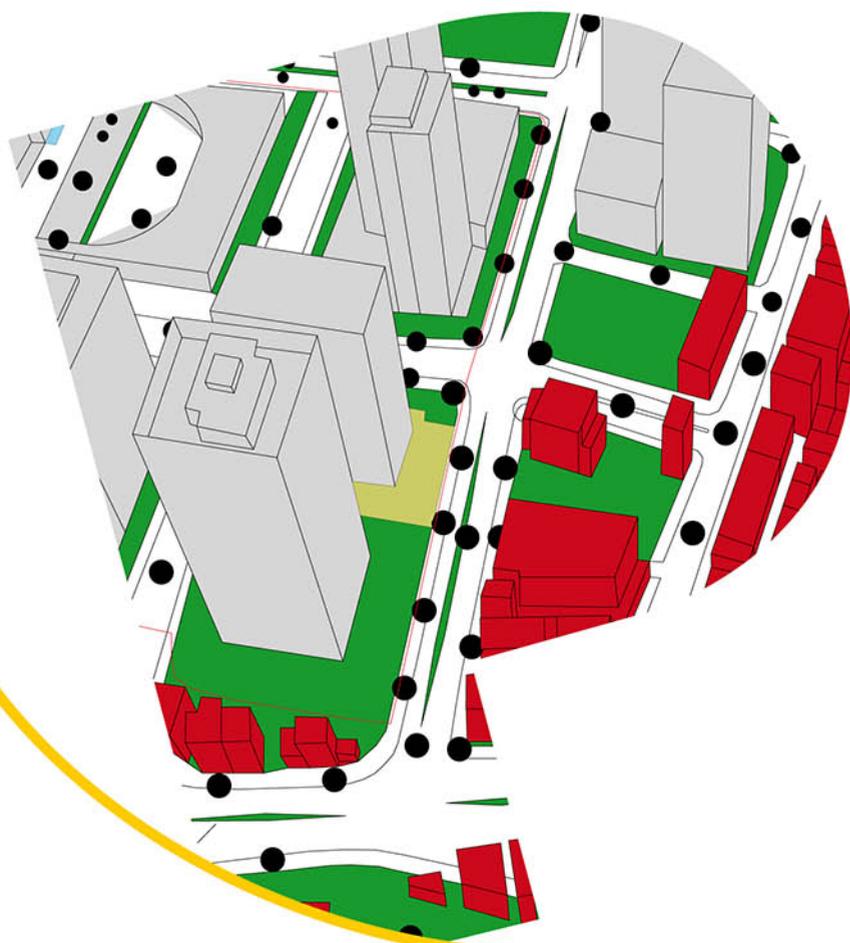
Livio de Santoli ~ Matteo Mariotti



Dario Flaccovio Editore

# La ventilazione naturale

Il moto naturale dell'aria per il controllo delle condizioni ambientali



- ✓ Verifica e progetto delle strategie di ventilazione naturale
- ✓ Strumenti empirici di predimensionamento con esempi di calcolo
- ✓ Termoregolazione, benessere, diagrammi, comfort e ventilazione
- ✓ Clima esterno, spazi extraurbani, ambiente urbano

Livio De Santoli Matteo Mariotti

# LA VENTILAZIONE NATURALE

Il moto naturale dell'aria  
per il controllo delle condizioni ambientali



Dario Flaccovio Editore

Livio De Santoli - Matteo Mariotti

LA VENTILAZIONE NATURALE

ISBN 978-88-579-0078-0

© 2011 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

[www.darioflaccovio.it](http://www.darioflaccovio.it) [info@darioflaccovio.it](mailto:info@darioflaccovio.it)

Prima edizione: aprile 2011

De Santoli, Livio <1956->

La ventilazione naturale : Il moto naturale dell'aria per il controllo delle condizioni ambientali / Livio De Santoli, Matteo Mariotti. - Palermo : D. Flaccovio, 2011

ISBN 978-88-579-0078-0

1. Edifici - Ventilazione. I. Mariotti, Matteo <1970->.

697.92 CDD-22

SBN Pal0232656

*CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"*

Stampa: Tipografia Priulla, aprile 2011

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

### SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- filodiretto con gli autori
- le risposte degli autori a quesiti precedenti
- files di aggiornamento al testo e/o

## INDICE

### 1. La ventilazione naturale

1.1. Cenni introduttivi .....	pag.	9
-------------------------------	------	---

### 2. Il benessere termoigrometrico

2.1. Termoregolazione del corpo umano.....	»	13
2.2. Metabolismo del corpo umano .....	»	15
2.3. Benessere termoigrometrico .....	»	17
2.4. Diagrammi bioclimatici .....	»	18
2.4.1. Diagrammi di Olgyay .....	»	19
2.4.2. Diagrammi di Givoni.....	»	21
2.5. Comfort e ventilazione nello Standard europeo UNI EN 15251:2008.....	»	26
2.6. Comfort ambientale negli ambienti esterni.....	»	30
2.7. Riferimenti bibliografici .....	»	35

### 3. Ambienti confinati

3.1. Modelli fondamentali.....	»	37
3.1.1. Moto generato dal vento.....	»	37
3.1.2. Effetto camino .....	»	39
3.1.3. Vento ed effetto camino combinati.....	»	41
3.1.4. Moto dell'aria attraverso piccole e grandi aperture.....	»	41
3.1.4.1. Piccole aperture .....	»	42
3.1.4.2. Grandi aperture (equazione dell'orifizio) .....	»	43
3.2. Strumenti di calcolo .....	»	46
3.2.1. Modelli empirici .....	»	47
3.2.1.1. Dimensionamento delle portate d'aria .....	»	47
3.2.1.1.1. Metodo standard inglese.....	»	47
3.2.1.1.2. Metodo ASHRAE – Basic Model .....	»	50
3.2.1.1.3. Metodo ASHRAE – Enhanced Model .....	»	52
3.2.1.1.4. Metodo di Aynsley.....	»	54
3.2.1.1.5. Metodo De Gidds-Phaff .....	»	55
3.2.1.2. Metodologie specifiche per il dimensionamento delle aperture ....	»	56
3.2.1.2.1. Metodo ASHRAE .....	»	56
3.2.1.2.2. Metodi del Florida Solar Energy Center .....	»	59
3.2.1.3. Metodi di calcolo della velocità dell'aria .....	»	63
3.2.1.3.1. Metodo Givoni .....	»	63
3.2.1.3.2. Metodo Melagrano .....	»	64
3.2.1.3.3. Metodo CSTB.....	»	65
3.2.1.3.4. Metodo di Ernest .....	»	78
3.2.2. Modelli macroscopici e di campo .....	»	82
3.2.2.1. Modelli macroscopici .....	»	83
3.2.2.1.1. Tipi di modellazione macroscopica .....	»	84
3.2.2.1.2. Variabili di sistema .....	»	86
3.2.2.1.3. Leggi di conservazione della massa e dell'energia .....	»	89
3.2.2.1.4. Condizioni al contorno .....	»	94

3.2.2.1.4.1. Modellazione dei piani-porta.....	»	95
3.2.2.1.4.2. Approccio nodale.....	»	95
3.2.2.1.4.3. Approccio loop .....	»	96
3.2.2.1.5. Composizione del sistema di equazioni .....	»	96
3.2.2.1.5.1. Modellazione nodale .....	»	96
3.2.2.1.5.2. Modellazione dei piani-porta.....	»	99
3.2.2.1.5.3. Modellazione a circuiti.....	»	101
3.2.2.2. Metodi di modellazione intermedia.....	»	103
3.2.2.3. Modellazione microscopica.....	»	104
3.2.2.3.1. Descrizione del metodo numerico .....	»	105
3.2.2.3.2. Equazioni del moto dei fluidi .....	»	105
3.2.2.3.3. Metodi di discretizzazione.....	»	106
3.2.2.3.3.1. Metodo delle differenze finite .....	»	107
3.2.2.3.3.2. Metodo dei volumi finiti (FVM) .....	»	108
3.2.2.3.3.3. Metodo agli elementi finiti (FEM).....	»	108
3.2.2.3.4. Soluzione del sistema .....	»	109
3.2.2.3.5. Metodo numerico per il termine convettivo .....	»	111
3.2.2.3.6. Accuratezza di calcolo e stima dell'errore .....	»	111
3.2.2.3.7. Valutazione teorica degli errori .....	»	112
3.2.2.3.8. Griglia di calcolo.....	»	113
3.2.2.3.8.1. Griglie strutturate .....	»	113
3.2.2.3.8.2. Griglie non strutturate .....	»	115
3.2.2.3.8.3. Miglioramento dell'efficienza delle griglie .....	»	116
3.2.2.3.8.3.1. Griglie multiple .....	»	116
3.2.2.3.8.3.2. Griglie adattative .....	»	117
3.2.2.3.8.3.3. Griglie composite .....	»	118
3.2.2.3.8.4. Modellazione della turbolenza .....	»	119
3.2.2.3.8.4.1. Modelli <i>time averaged</i> .....	»	120
3.2.2.3.8.4.2. Modelli <i>spatial averaged</i> .....	»	121
3.2.2.3.8.5. Moto dell'aria in prossimità delle superfici.....	»	122
3.2.2.3.8.5.1. Strato superficiale .....	»	122
3.2.2.3.8.5.2. Metodo della funzione di superficie.....	»	123
3.2.2.3.8.5.3. Velocità in corrispondenza delle superfici .....	»	124
3.2.2.3.8.5.4. Temperatura in corrispondenza delle superfici .....	»	125
3.2.2.3.8.5.5. Condizioni al contorno per il moto turbolento.....	»	126
3.2.2.3.8.5.6. Bassi valori del numero di Reynolds .....	»	126
3.2.2.4. Reti nidificate .....	»	127
3.3. Strategie di ventilazione naturale negli edifici.....	»	136
3.3.1. Ventilazione frontale.....	»	136
3.3.2. Ventilazione passante .....	»	139
3.3.3. Ventilazione per effetto camino .....	»	143
3.3.4. Ventilazione passante ed effetto camino integrati .....	»	148
3.3.5. Combinazioni delle strategie fondamentali .....	»	152
3.3.6. Ventilazione bilanciata per effetto camino .....	»	153
3.3.7. Sistemi di ventilazione integrati nelle facciate.....	»	158
3.3.8. Raffrescamento evaporativo.....	»	161
3.3.9. Raffrescamento passivo notturno.....	»	166

3.3.10.	Raffrescamento geotermico.....	»	171
3.3.11.	Ventilazione assistita solare.....	»	178
3.3.11.1.	La parete di Trombe.....	»	182
3.3.12.	Attuatori e strategie di controllo.....	»	184
3.4.	Riferimenti bibliografici .....	»	190
<b>4. Ambienti esterni</b>			
4.1.	Cenni introduttivi .....	»	199
4.2.	Il clima .....	»	199
4.2.1.	La scala del macroclima e del mesoclima .....	»	200
4.2.1.1.	La circolazione dell'aria .....	»	202
4.2.1.2.	Le correnti a getto.....	»	211
4.2.1.3.	Cicloni e anticicloni.....	»	213
4.2.1.4.	Le masse di aria.....	»	214
4.2.1.5.	Fronti .....	»	218
4.2.1.6.	La classificazione dei climi .....	»	220
4.2.2.	La scala climatica locale.....	»	223
4.2.3.	La scala climatica del microclima .....	»	225
4.3.	Spazi extraurbani .....	»	226
4.3.1.	Le equazioni di conservazione .....	»	227
4.3.2.	Il modello della velocità di Reynolds.....	»	229
4.3.3.	Struttura e spessore dello strato limite atmosferico.....	»	230
4.3.4.	Il profilo logaritmico della velocità .....	»	236
4.3.5.	Il profilo potenziale della velocità .....	»	238
4.3.6.	Caratteristiche del terreno .....	»	238
4.3.6.1.	Dimensione della rugosità aerodinamica .....	»	239
4.3.6.2.	Altezza del piano di dislocamento .....	»	240
4.3.6.3.	Condizioni locali del terreno .....	»	243
4.4.	Ambiente urbano.....	»	249
4.4.1.	Isola di calore .....	»	250
4.4.2.	Principi generali per la progettazione alla scala urbana .....	»	258
4.4.3.	Metodologie valutative.....	»	269
4.4.3.1.	Metodo prestazionale .....	»	270
4.4.3.2.	Linee guida prescrittive .....	»	277
4.4.4.	La mappa del clima urbano .....	»	278
4.5.	Riferimenti bibliografici .....	»	282

*La ventilazione naturale consiste nell'utilizzo delle forze naturali che generano il moto dell'aria per il raggiungimento del benessere termico igrometrico e per il controllo della qualità dell'aria.*

# 1. LA VENTILAZIONE NATURALE

## 1.1. Cenni introduttivi

Negli ultimi anni si sono verificati sviluppi in molteplici discipline, tutte legate in qualche modo alla ventilazione naturale, che hanno trasformato radicalmente tale ambito di studio, portandolo a un grado di maturità e di organicità denso di ricadute applicative. Tale campo coinvolge infatti la teoria del comfort termico, l'analisi del comportamento termofluidodinamico degli edifici e lo studio del moto dell'aria alla scala della città e degli spazi extraurbani, fattori questi che nella loro complessità e interdipendenza solo negli ultimi anni hanno potuto essere affrontati attraverso modelli di calcolo e di simulazione. Tale apertura dello spettro di studio rende evidente la necessità di un approccio allargato ai fenomeni fisici che regolano il clima e quindi il moto dell'aria alla grande scala. Mai come oggi si avverte un rapporto di causa diretto fra l'opera dell'uomo e le modificazioni generate sull'ambiente e sul paesaggio, fattori questi che necessariamente vanno considerati in stretta interdipendenza.

In tal senso l'evoluzione storica delle teorie del comfort può essere considerata paradigmatica di molti altri campi di ricerca, essendo tali teorie in origine fondate su un'idea di "ambiente artificiale" costruito attorno all'uomo, indipendentemente dalle condizioni climatiche esterne, approdando in seguito allo studio delle condizioni di comfort in ambiente esterno urbano, dove clima e artificio si incontrano inestricabilmente. Progressivamente si è sentita l'esigenza di considerare attorno all'uomo un sistema fisico sempre più complesso che fosse in grado di descrivere le modificazioni da esso generate, a scale dimensionalmente sempre più crescenti. I primi passi in tale campo della fisica tecnica vengono svolti negli Stati Uniti nei primi anni '20 [1] nell'ambito applicativo delle tecnologie impiantistiche negli edifici (ASHRAE). In tali anni la preoccupazione principale è rivolta alla definizione di un singolo parametro capace di sintetizzare l'accettabilità delle condizioni ambientali interne, determinate da un certo sistema di climatizzazione. A tale scopo viene introdotta la ET (*effective temperature*), un parametro dipendente dalle condizioni interne di temperatura, umidità e velocità dell'aria che, nonostante le numerose incongruenze, nella sua versione più aggiornata continua ancor oggi ad

essere adottato per la sua semplicità d'uso. Secondo tale metodologia il progettista deve semplicemente fare in modo che i parametri fisici ambientali ricadano all'interno dell'intervallo di accettabilità  $ET$ , definito da rette parallele a valore di  $ET$  costante sul diagramma ASHRAE. Contestualmente a tali rette, il diagramma riporta anche la zona del comfort, luogo dei punti per i quali temperatura e umidità sono considerate ottimali per gli occupanti.

I primi studi critici rivolti a tale tipo di approccio, che, come detto, pone al centro della sua attenzione esclusivamente edifici dotati di sistemi di climatizzazione, vengono sviluppati a partire dai primi anni '50 dai fratelli Victor e Aladar Olgyay, prendendo in esame gli effetti generati dalle condizioni esterne su quelle interne. Tali studi vengono sistematizzati nel testo di Victor Olgyay *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism* pubblicato nel 1963 [2]. Nonostante gli evidenti limiti applicativi delle metodologie proposte, tale pubblicazione rappresenta un momento importante nella critica all'approccio filosofico, ai tempi dominante, che ipotizzava la totale indipendenza fra le condizioni climatiche esterne e quelle imposte artificialmente attraverso il sistema impiantistico. Su tale filone critico si pongono gli studi di Baruch Givoni, pubblicati nel testo *Man Climate and Architecture* (1969), i quali, su base sperimentale, propongono una ridefinizione delle condizioni di comfort del diagramma ASHRAE, questa volta dipendenti dalla strategia bioclimatica utilizzata per la definizione delle condizioni climatiche interne.

Nel 1970 la tesi di dottorato dello studioso danese Povl Ole Fanger viene pubblicata con il titolo *Thermal Comfort*. In tale testo sono riportati i risultati di una serie di esperienze effettuate in camera climatica su un campione di popolazione nord americana. Sulla base di tali sperimentazioni, effettuate in condizioni di stazionarietà, vengono elaborati dei diagrammi in cui le condizioni ottimali di comfort, riportate in funzione dei parametri climatici, vengono definite per prefissate condizioni di abbigliamento e di attività metabolica. I risultati sperimentali vengono elaborati attraverso i parametri PMV (*predicted mean vote*) e PPD (*predicted percentage dissatisfied*), in modo da fornire delle tabelle per la previsione della sensazione termica in funzione dei parametri climatici riscontrabili, note che siano particolari condizioni di abbigliamento e di attività metabolica. Gli studi di Fanger riscossero un grande interesse per la novità metodologica utilizzata, basata su un modello termofisico del corpo umano che nella sua elaborazione proponeva una soluzione al problema della soggettività della sensazione termica. Per tale motivo queste teorie sono state utilizzate nello sviluppo della normativa americana ASHRAE standard 55-92 e per quella europea ISO standard 7730:1994 entrambe volte alla definizione delle condizioni di comfort interno.

Nonostante il rigore metodologico e l'approccio innovativo di tali metodologie, già dai primi anni dalla loro introduzione viene riscontrato un certo scostamento fra le condizioni di comfort previste e quelle rilevate dalle persone. Tale incon-

gruenza era dovuta principalmente al fatto che la teoria di Fanger non considerava fattori di tipo culturale e di tipo dinamico. Si è potuto infatti riscontrare che popolazioni provenienti da luoghi differenti manifestavano aspettative di comfort dipendenti dal luogo di origine e che comportamenti e condizioni di abbigliamento considerate in precedenza stazionarie erano in realtà variabili nel tempo in relazione alle condizioni climatiche riscontrate dagli occupanti.

Tali aspetti vengono considerati nelle teorie del comfort adattative introdotte da Humprey e Nicols a partire dagli anni '70, le quali, considerando il problema indipendente dalla presenza dell'impianto di climatizzazione, vengono sviluppate prevalentemente per edifici che utilizzano la ventilazione naturale, risultando in tal modo maggiormente aderenti alle esigenze della maggior parte del patrimonio edilizio esistente. Il taglio metodologico proposto, considerando tali tipologie di edifici, tiene necessariamente conto dell'effetto generato dalle condizioni climatiche esterne sulle condizioni ambientali interne, orientando la definizione dei parametri di progetto interni verso un approccio dinamico volto alla riduzione dei consumi energetici. La teoria del comfort adattativa, essendo abbastanza aderente alle valutazioni sperimentali, è stata utilizzata nella definizione delle più recenti normative americane (ASHRAE Standard 55, 2004) ed europee (UNI-EN 15251: 2008) sul comfort termico.

Tale stretto legame fra ambiente esterno ed interno, considerato nelle teorie adattative del comfort, rappresenta una tematica di primaria importanza. Non è più pensabile che il problema delle condizioni ambientali interne e, allargando lo spettro di interesse, il problema dell'uso efficiente dell'energia, possano essere affrontati indipendentemente dalle condizioni climatiche esterne o dalle modificazioni generate dall'edificio e dall'attività umana sul contesto circostante, sia esso urbano o naturale.

Un'insufficiente consapevolezza nei confronti dell'attività dell'uomo, anche nel perseguimento dei più nobili obiettivi, se non integrata in un sistema di analisi delle possibili ricadute alle diverse scale, potrebbe generare effetti dannosi sull'ambiente. L'introduzione su grande scala di sistemi energetici a bassa efficienza, oltre a modificare in modo spesso inaccettabile il contesto storicizzato del paesaggio urbano e naturale, potrebbe infatti determinare un sensibile peggioramento delle condizioni climatiche esterne nei centri urbani densamente popolati, dove il fenomeno dell'isola di calore è più accentuato, rendendo difficoltoso l'uso della ventilazione naturale e incentivando ulteriormente l'installazione di impianti di climatizzazione talvolta di dubbia efficienza energetica.

Se da una parte alcune importanti istituzioni come l'EPA (Environmental Protection Agency), la municipalità di Londra e di Tokyo, la città di New York sviluppano progetti per la riduzione dell'isola di calore attraverso la modificazione cromatica delle coperture (tetti giardino, tetti bianchi), in Italia si incentiva l'utilizzo di sistemi energetici caratterizzati da elevata capacità di assorbimento dell'energia

solare con scarso rendimento di conversione dell'energia elettrica, rischiando di modificare sensibilmente il paesaggio dei centri storici urbani.

Il problema delle clima urbano e delle conseguenti condizioni di comfort da esso determinate è stato diffusamente affrontato a partire dalla fine dagli anni '80 in Germania attraverso lo sviluppo dello strumento delle mappe climatiche urbane, basate sull'andamento dei parametri fisici fondamentali, utilizzati per i calcoli di un parametro di valutazione delle condizioni di comfort. Alla stessa stregua dei parametri ET, ET\*, PMV, ecc. utilizzati nelle teorie del comfort interno tradizionali, il comfort in ambiente esterno è stato quindi valutato in numerose applicazioni attraverso il PET (*physiological equivalent temperature*). Tali esperienze, insieme a molte altre, sono state integrate nella ricerca europea COST Action 730, attraverso la definizione dell'UTCI (*universal thermal climate index*) per la valutazione delle condizioni di benessere termico e igrometrico globali e locali negli ambienti esterni, facendo uso di un avanzato modello fisiologico del corpo umano e tenendo conto dei comportamenti adattativi dell'individuo.

Il dibattito svoltosi attorno alle diverse teorie del comfort sembra oggi quindi approdare a un punto di convergenza fra teorie tradizionalmente rivolte all'utilizzo dei sistemi impiantistici, voci critiche appartenenti prevalentemente alla bioarchitettura basate principalmente su dati empirici e teorie adattative sviluppate nell'ambito della fisica tecnica nel rispetto delle diverse condizioni sociali e locali delle popolazioni considerate.

Parallelamente all'evoluzione della teoria del comfort – che nelle sue espressioni più recenti considera la ventilazione naturale sia negli ambienti confinati che in quelli esterni urbani – nell'ambito del calcolo si possono riscontrare, come anticipato, sviluppi che hanno dimostrato di poter affrontare la simulazione della compresenza di diversi fenomeni fisici sia alla scala del sistema considerato che alle scale climatiche più grandi, interfacciando le simulazioni con le banche dati disponibili. Tali risultati, ottenuti nel campo del calcolo CFD (*computational fluid dynamic*) aprono nuovi orizzonti nell'utilizzo per l'analisi e al controllo dei processi di sviluppo degli agglomerati urbani.

La complessità e il notevole investimento di risorse di calcolo rende ancora tale strumento patrimonio prevalente del campo della ricerca. Nell'ambito applicativo risultano certamente di più semplice utilizzo i metodi di tipo zonale, perfezionati attraverso la lettura sistematica dei metodi di calcolo preesistenti effettuata da Aynsley con l'introduzione del metodo dei piani porta.

Preliminarmente allo studio dei metodi di calcolo non va poi certamente trascurata l'importanza dei metodi empirici, fondamentali per acquisire una comprensione generale del comportamento fluidodinamico degli edifici e delle leggi della ventilazione naturale, di primaria importanza nella fase di predimensionamento degli edifici.

## 2. IL BENESSERE TERMOIGROMETRICO

### 2.1. Termoregolazione del corpo umano

Il corpo umano è un sistema che, attraverso un elevato numero di trasformazioni chimiche molto complesse, trasforma la potenziale energia chimica presente negli alimenti in altre forme di energia, prevalentemente in quella termica. A tali trasformazioni si dà il nome di *metabolismo*.

Se la quantità di energia metabolica non risulta uguale a quella ceduta all'ambiente sotto forma di energia termica o lavoro, allora si ha un accumulo o una perdita di energia nel corpo, con il risultato di non soddisfare il bilancio energetico, e conseguente aumento o diminuzione della temperatura corporea. Il sistema di termoregolazione ha la funzione di mantenere il corpo umano a una temperatura costante (isotermia).

È possibile distinguere il corpo umano in due zone caratterizzate da temperature diverse: una esterna (la pelle) e una interna (gli organi vitali).

La temperatura della zona interna, per assicurare il funzionamento degli organi, deve essere pressoché costante: infatti nei soggetti sani essa è di circa 37 °C, con una variazione di circa mezzo grado nell'arco della giornata secondo il ritmo circadiano. La temperatura della zona esterna, che viene definita *temperatura della pelle* (*skin*)  $t_{sk}$ , può invece oscillare entro valori limiti (un massimo di 45 °C e un minimo di 4-5 °C per i piedi e le mani) che rappresentano vere e proprie soglie del dolore.

Il sistema di termoregolazione è regolato tramite i recettori termici, sensori che reagiscono alle basse e alle alte temperature; si tratta di terminazioni nervose sensibili sia alla temperatura assoluta sia alla sua velocità di variazione. Essi inviano impulsi nervosi all'ipotalamo, la zona del cervello responsabile della termoregolazione, che li confronta con i valori di riferimento e attiva i meccanismi in grado di mantenere l'omeotermia del corpo.

Esistono due tipi di termoregolazione, in grado di cedere in modo più o meno marcato energia termica all'ambiente esterno:

- vasomotoria;
- comportamentale.

L'energia termica che viene generata all'interno del corpo umano viene dispersa nell'ambiente attraverso la pelle, sia per convezione e irraggiamento (dovute a una differenza di temperatura tra pelle e aria circostante il corpo e pelle e temperatura media radiante delle pareti che circondano il corpo) sia per evaporazione. La termoregolazione vasomotoria interessa i capillari superficiali: infatti, i capillari sono dotati di valvole che, aprendosi (vasodilatazione in ambienti più caldi) o chiudendosi (vasocostrizione in ambienti più freddi), incrementano o impediscono l'afflusso di sangue. In ambienti freddi, per esempio, tramite la vasocostrizione viene provocata una diminuzione dell'afflusso di sangue verso la periferia con un conseguente abbassamento della temperatura superficiale.

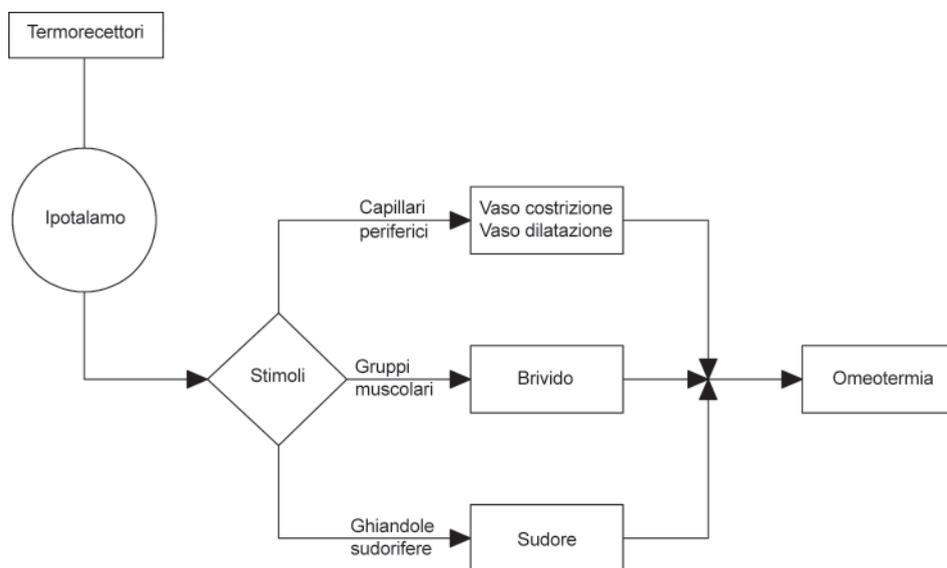


Figura 2.1. Il sistema di termoregolazione dell'uomo

In questo modo viene limitato lo scambio termico con l'esterno. Altri meccanismi messi in atto per assicurare l'omeotermia del nucleo sono quelli che, in caso di freddo, si manifestano con il brivido, cioè con l'attivazione di alcuni gruppi muscolari che comporta un aumento del metabolismo energetico senza che venga ceduta all'ambiente energia meccanica, oppure quelli che, in caso di caldo, sono dati dall'attivazione del meccanismo della sudorazione. In tale meccanismo le ghiandole sudoripare, che sono situate sotto la pelle, vengono attivate dall'ipotalamo e secernono il sudore che arriva sulla superficie esterna della pelle attraverso appositi condotti, ricoprendola di un film sottile. In regime stazionario, parte di tale film di soluzione acquosa si trasforma in vapore nell'aria, sottraendo

calore alla superficie del corpo umano; questa quantità di energia termica sottratta rappresenta il calore latente di evaporazione del sudore.

## 2.2. Metabolismo del corpo umano

Il corpo umano è sede di numerose trasformazioni chimiche le quali, nel loro insieme, costituiscono il metabolismo, anche detto *potenza metabolica*, *energia metabolica* o *tasso metabolico*.

I processi metabolici sono processi di ossidazione che risultano, come detto, complessivamente esoenergetici; l'energia potenziale chimica degli alimenti si trasforma:

- direttamente in energia termica;
- in energia elettrica (sotto forma di impulsi nervosi);
- in energia meccanica (utilizzata, per esempio, per l'attività dei muscoli);
- in energia potenziale chimica, quella parte immagazzinata nelle sostanze di riserva del corpo umano.

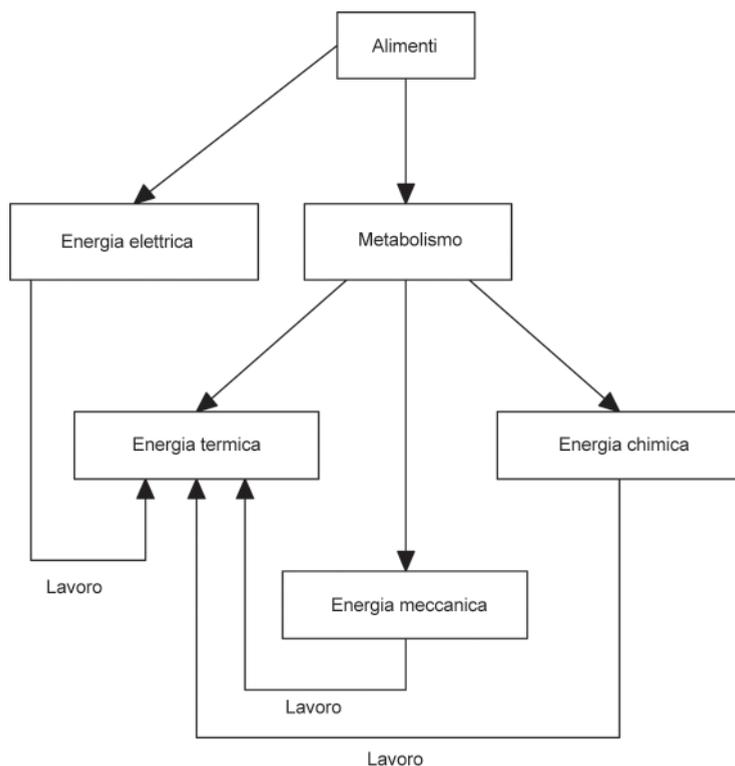


Figura 2.2. Insieme delle trasformazioni energetiche nell'organismo

L'energia meccanica, quella elettrica e quella chimica si trasformano poi in energia termica. L'energia chimica effettua tale trasformazione con un processo che consiste nella scissione delle grandi molecole detto *catabolismo*, l'energia meccanica essenzialmente con l'attività degli apparati e l'energia elettrica con i fenomeni di contrazione e decontrazione muscolare. Tutta l'energia termica prodotta viene quindi dispersa nell'ambiente circostante sotto forma di lavoro meccanico o di calore dissipato.

Nello schema riportato in figura 2.2 viene mostrato l'insieme delle trasformazioni energetiche nell'organismo.

Il metabolismo può a sua volta essere costituito dal metabolismo basale (legato esclusivamente al mantenimento dell'attività cellulare e al funzionamento degli organi principali), dal metabolismo di riposo (corrispondente comunque all'assenza di lavoro muscolare) e dal metabolismo di lavoro (legato direttamente all'attività muscolare). Il metabolismo basale varia da individuo a individuo e dipende essenzialmente da: i cicli circadiani, il sesso, la massa e l'altezza, l'età.

Attività	Metabolismo (met)
Dormire	0.6
Stare seduti	1
Stare in piedi	1.2
Attività leggera (camminare)	1.6
Attività media (negozi, abitazioni)	2
Attività pesante (ginnastica)	3
Ballare	5

**Tabella 2.1. Metabolismo a riposo**

Nel metabolismo a riposo viene compresa anche la funzione dell'individuo relativa all'attività digestiva, quella termoregolatoria e quella posturale, sempre comunque in completa assenza di lavoro muscolare. Si veda a questo proposito quanto riportato nella tabella 2.1 sul valore da assegnare al metabolismo di riposo. Il metabolismo di lavoro è legato, invece, all'aumento del consumo di ossigeno durante l'attività muscolare. Talvolta si fa riferimento all'unità di area della superficie del corpo umano  $A_b$ , generalmente calcolata con la relazione di DuBois:

$$A_b = 0.202 \cdot W_b^{0.425} \cdot H_b^{0.725}$$

con  $W_b$  la massa corporea (kg) e  $H_b$  l'altezza corporea (m).

L'uomo considerato standard (70 kg, 1,70 m) ha pertanto un'area della superficie corporea di 1,8 m<sup>2</sup>.

In questo caso, l'unità di misura del metabolismo (che si indica con il simbolo  $M$ ) è W/m<sup>2</sup>, anche se esso viene spesso misurato nell'unità incoerente met, essendo:

$$1 \text{ met} = 58.2 \text{ W/m}^2$$

Il metabolismo  $M$  è quindi funzione del grado di attività dell'individuo; i relativi valori sono indicati in ISO 8996 e riportati nella tabella 2.1.

### 2.3. Benessere termoigrometrico

Il comfort termico è definito come “stato psicofisico in cui il soggetto esprime soddisfazione nei riguardi del microclima” oppure come “condizione in cui il soggetto non ammette nessuna sensazione di caldo o sensazione di freddo”, condizione questa che viene detta di *neutralità termica*.

Ci si riferisce al comfort termico globale se si vuole studiare il comportamento del corpo nella sua interezza, e al comfort termico locale, o localizzato, se invece si vuole studiare solo il comportamento relativo a specifiche zone del corpo. Appare chiaro che condizione necessaria e sufficiente per considerare le situazioni ambientali pienamente accettabili è quella di verificare contemporaneamente le due esigenze.

Come si è già visto, in condizioni di omeotermia l'energia che produce un individuo deve essere pari all'energia scambiata con l'ambiente; trascurando il termine relativo allo scambio conduttivo tra corpo e oggetti in contatto con esso (vista l'esiguità dell'estensione delle superfici di scambio termico), si può scrivere, riferendosi all'unità di tempo e di superficie corporea:

$$M - W - E - C_{resp} - (R + C) = 0$$

dove

$M$  = la potenza termica associata al metabolismo

$W$  = il lavoro meccanico prodotto da un individuo nell'unità di tempo

$E$  = il flusso termico ceduto dal corpo per evaporazione cutanea

$C_{resp}$  = il flusso termico ceduto dal corpo attraverso la respirazione

$R, C$  = i flussi termici ceduti o ricevuti dal corpo per radiazione e convezione.

La differenza ( $M - W$ ) rappresenta la parte di carico metabolico che non si converte in lavoro esterno e che quindi deve ritrovarsi come scambio di energia termica con l'ambiente o come variazione di energia interna del corpo. Il valore di  $W$  risulta molto piccolo rispetto a quello di  $M$  (è praticamente nullo nel caso di attività sedentarie), pertanto viene completamente trascurato nella espressione precedente.

In ambiente termicamente moderato per valutare l'influenza di un eventuale scostamento delle condizioni che effettivamente sono riscontrate in un ambiente con quelle di comfort globale, solitamente vengono introdotti i cosiddetti *indici di discomfort globale*, che devono assumere lo stesso valore per tutte le combinazioni delle variabili che danno uguali sensazioni termiche.

Fra gli indici di discomfort, la norma UNI-EN-ISO 7730:2006 [1] utilizza il PMV (*predicted mean vote*) per esprimere il giudizio di un soggetto nei riguardi di un ambiente definito dal punto di vista microclimatico sulla base della scala ASHRAE della sensazione termica (tabella 2.2).

Voto	Sensazione
+ 3	Molto caldo
+ 2	Caldo
+ 1	Leggermente caldo
0	Né caldo né freddo
- 1	Leggermente freddo
- 2	Freddo
- 3	Molto freddo

**Tabella 2.2. Scala ASHRAE per la misura della sensazione termica**

Gli indici esprimono una risposta media di un gran numero di soggetti, quindi è possibile che per valori dell'indice corrispondenti a condizioni di neutralità termica ci possano essere individui che comunque avvertono sensazioni di caldo o freddo. Attraverso l'indice PPD (*predicted percentage of dissatisfied*), calcolabile attraverso una relazione analitica dipendente dal PMV.

## 2.4. Diagrammi bioclimatici

La normativa UNI EN 7730:2006, come detto in precedenza, utilizza gli indici PMV e PPD per la valutazione del comfort in ambienti termicamente moderati, ovvero nei casi in cui i parametri ambientali siano compresi negli intervalli riportati in tabella 2.3 e le condizioni ambientali si scostino moderatamente dalla stazionarietà.

Grandezza	Simbolo	Intervallo	Unità di misura
Temperatura dell'aria	$t_a$	+ 10 ÷ + 30	°C
Temperatura media radiante	$t_r$	+ 10 ÷ + 40	°C
Pressione parziale di vapore	$p_a$	0 °C ÷ 2700	Pa
Velocità dell'aria	$V_{ar}$	0 °C ÷ 1	m/s
Attività o dispendio metabolico	$M$	0.8 ÷ 4	met
Isolamento termico del vestiario	$I_d$	0 ÷ 2	clo

**Tabella 2.3. Intervalli di applicabilità della norma UNI EN 7730:2006**

Tale normativa è basata sulle esperienze effettuate da Fanger, a partire dalla fine degli anni '60, riguardanti ambienti termicamente moderati, dotati quindi di impianti di climatizzazione.

Tale limitazione, sin dagli inizi, ha progressivamente incentivato la ricerca di strumenti alternativi per la progettazione delle condizioni ambientali interne ne-

gli edifici sprovvisti di impianti di climatizzazione. Fra questi, un certo successo è stato riscosso dai cosiddetti *diagrammi bioclimatici*, concepiti per identificare le condizioni di benessere termoigrometrico.

### 2.4.1. Diagrammi di Olgay

I primi diagrammi bioclimatici, introdotti da Olgay nel 1963 [2], riportano le coppie di temperatura e umidità relativa per le quali si verificano condizioni ambientali ritenute soddisfacenti. Tali diagrammi riproducono entrambe le grandezze, rappresentando le aree all'interno delle quali devono ricadere i punti rappresentativi delle condizioni ambientali affinché sia raggiunto il comfort termoigrometrico.

Nel diagramma di figura 2.3 le ordinate rappresentano i valori della temperatura, mentre le ascisse riportano i valori di umidità relativa. L'intervallo di benessere è limitato inferiormente dalla temperatura di 21 °C e superiormente da una curva

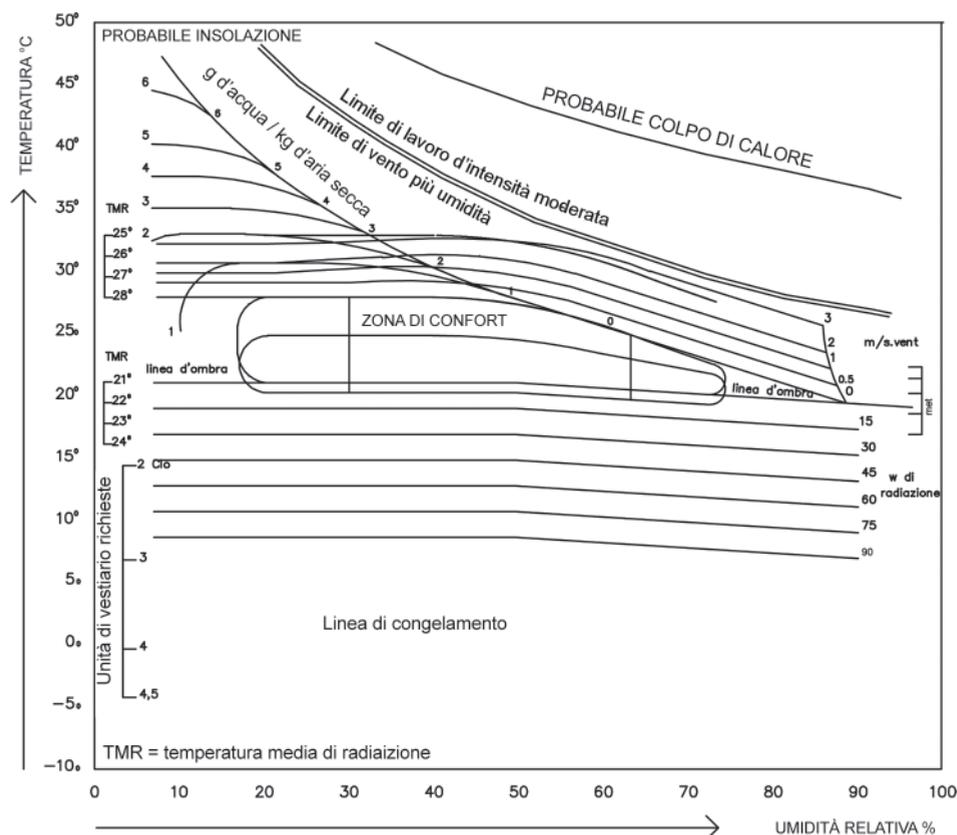


Figura 2.3. Il diagramma bioclimatico di Olgay

con andamento quasi costante di 27.8 °C fino al 50% di umidità relativa oltre la quale la temperatura prende a decrescere.

Viene identificata un'area di comfort, costituita dal luogo dei punti corrispondenti a condizioni di temperatura e umidità relativa ritenute accettabili, e due zone di disagio, una superiore e una inferiore, per le quali deve essere previsto rispettivamente raffrescamento o riscaldamento.

Nell'area inferiore alla zona del comfort, che identifica condizioni sottoriscaldare, il diagramma fornisce la potenza che le superfici circostanti dovrebbero irraggiare per il raggiungimento delle condizioni di benessere.

Nel caso in cui la temperatura sia al di sopra della zona del benessere ci si trova nelle condizioni di surriscaldamento, condizioni per le quali sarebbe auspicabile un'azione di raffreddamento. La possibilità di ampliare l'area del benessere oltre i confini prestabiliti, grazie ai benefici dovuti alla velocità dell'aria e all'effetto

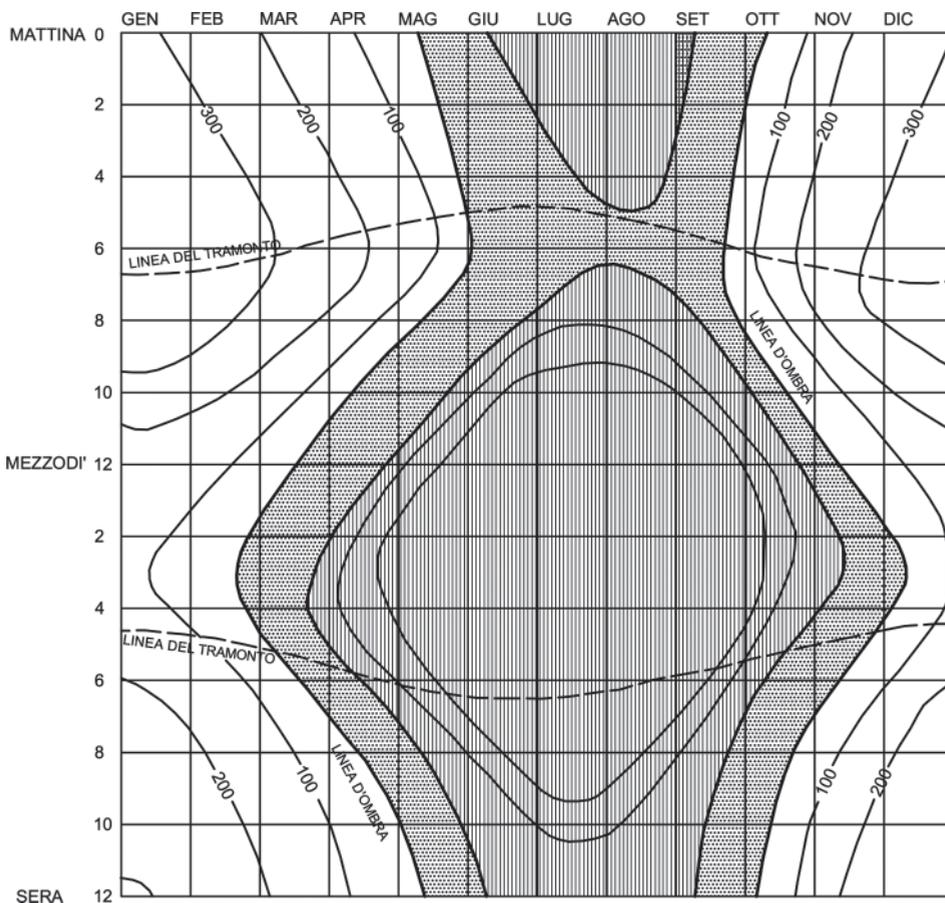


Figura 2.4. Il diagramma dall'analisi temporale del fabbisogno climatico di Olgay

raffrescante dovuto all'evaporazione, viene considerata nel diagramma attraverso le linee di velocità. I cicli mensili della temperatura e dell'umidità relativa vengono riportati graficizzando l'estensione delle zone di sottoriscaldamento, di comfort e di surriscaldamento.

Un altro noto diagramma (figura 2.4) è quello dell'analisi temporale del fabbisogno climatico, la cui ascissa riporta i mesi dell'anno e l'ordinata le ore del giorno. Conoscendo l'ora e il mese, in un dato luogo è possibile verificare se si riscontrano condizioni di benessere, di surriscaldamento o di sottoriscaldamento a seconda della zona del diagramma in cui ricade il punto rappresentativo dell'ora prescelta.

I diagrammi di Olgyay sono basati sui dati climatici rilevati a Phoenix in Arizona in ambiente esterno. Sono concepiti per essere utilizzati a condizione che la temperatura interna sia approssimabile a quella esterna. Tale ipotesi potrebbe essere considerata legittima solo per edifici caratterizzati da bassa inerzia termica e per particolari condizioni, tipicamente riscontrabili nelle abitazioni considerate da Olgyay nei suoi studi. Tali condizionamenti rendono quindi la metodologia considerata difficilmente applicabile, risultando fortemente critica nel caso degli edifici in muratura o in cemento armato, dove l'effetto dell'inerzia termica svolge un ruolo non trascurabile nel ritardo e nello smorzamento della sollecitazione termica esterna.

#### *2.4.2. Diagrammi di Givoni*

La metodologia proposta da Olgyay riscosse grande interesse per la nuova sensibilità mostrata nei confronti delle condizioni climatiche esterne e per la peculiarità di considerare edifici con ventilazione naturale. Nonostante gli evidenti limiti del metodo, la possibilità di utilizzare nuovi strumenti alternativi al diagramma ASHRAE diede origine a numerose ricerche. Il diagramma bioclimatico per gli edifici sviluppato nel 1976 da Baruch Givoni e continuamente aggiornato fino ai giorni nostri, nell'ambito di tale filone critico, definisce le condizioni ambientali interne di accettabilità sul diagramma psicrometrico ASHRAE, analogamente a quanto fatto con la temperatura effettiva, sulla base delle esperienze effettuate su campioni di popolazione caratterizzate culturalmente e dal punto di vista delle aspettative climatiche [3, 4]. Su tale diagramma psicrometrico sono riportate le aree di accettabilità delle condizioni climatiche interne in relazione alle seguenti strategie di attenuazione delle azioni termiche esterne:

- ventilazione diurna: basata sull'incremento dei limiti di accettabilità della temperatura dell'aria all'aumentare della sua velocità;
- inerzia termica, con o senza ventilazione notturna: basata sulla capacità da

parte dell'involucro di ritardare e smorzare l'effetto delle sollecitazioni termiche esterne;

- raffrescamento evaporativo diretto: basato sull'assorbimento del calore sensibile dell'aria da parte dell'acqua in evaporazione, con conseguente incremento dell'umidità dell'aria nell'ambiente trattato;
- raffrescamento evaporativo indiretto: ottenibile quando il processo evaporativo viene effettuato al di fuori dell'ambiente, a contatto con le superfici dell'involucro.

Il diagramma è stato costruito sulla base di ricerche effettuate negli Stati Uniti, in Europa e in Israele e successivamente esteso ai paesi in via di sviluppo, per i quali le condizioni ambientali e le consuetudini culturali differenti hanno permesso l'ampliamento dei limiti di accettabilità.

Ogni strategia di controllo del clima interno è caratterizzata da una specifica zona di comfort. L'area di comfort meno estesa è quella in cui non si prevede nessuna strategia di raffrescamento in assenza di moto dell'aria. All'aumentare delle strategie di climatizzazione tale zona di comfort viene progressivamente ampliata fino a coprire la massima area del diagramma psicrometrico. Il che significa che utilizzando tutte le possibili strategie di raffrescamento aumentano le possibili combinazioni di temperatura e di umidità per le quali si raggiunge il comfort termoisometrico.

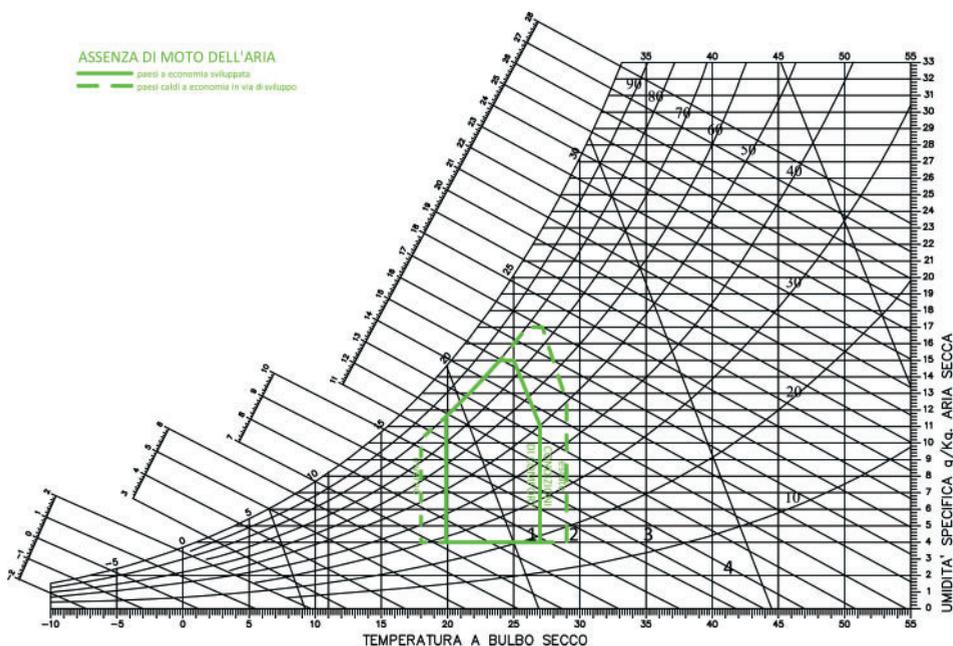


Figura 2.5. Condizioni di benessere in assenza di moto dell'aria