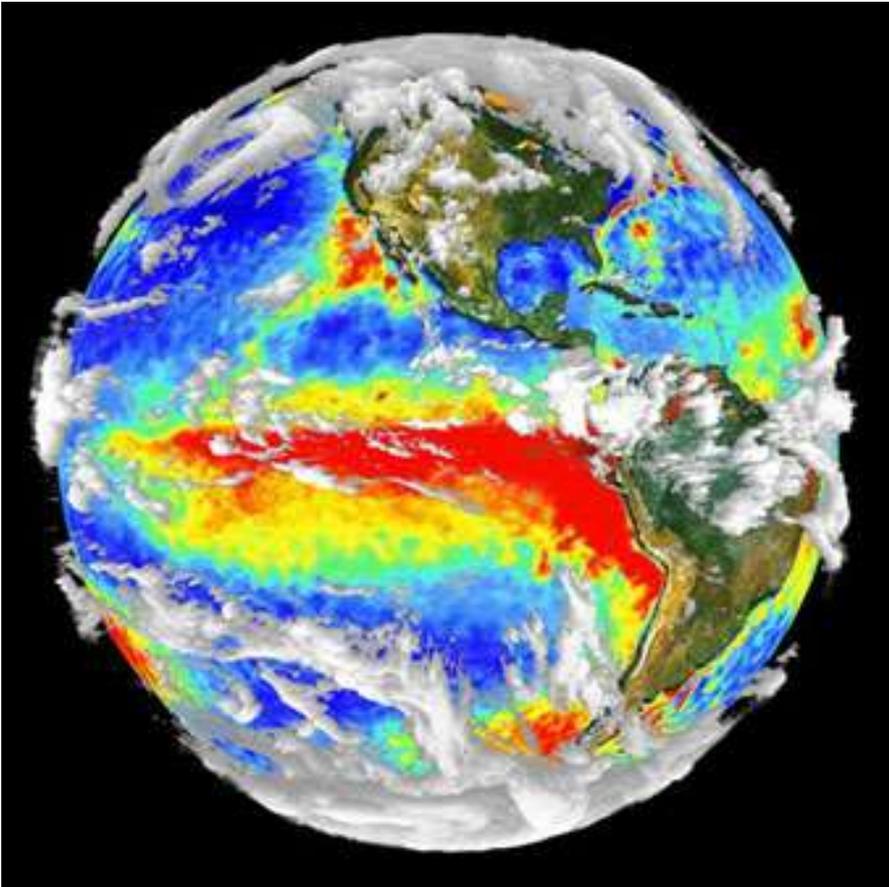


2016

# CLIMATOLOGIA DELL'AMBIENTE COSTRUITO



PROF. ING. GIULIANO CAMMARATA

**FILE: CLIMATOLOGIA AMBIENTE COSTRUITO.DOC**

**AUTORE: Giuliano Cammarata**

**DATA: 4 SETTEMBRE 2016**

[www.giulianocammarata.it](http://www.giulianocammarata.it)  
[cammaratagiuliano@gmail.com](mailto:cammaratagiuliano@gmail.com)

La riproduzione a scopi didattici di quest'opera è libera da parte degli utenti purché non siano cancellati i riferimenti all'Autore sopra indicati. Non sono consentiti usi commerciali di alcun genere senza il consenso dell'Autore

# 1. INTRODUZIONE ALLA CLIMATOLOGIA

La Climatologia dell'ambiente Costruito riveste oggi una grande importanza dal punto di vista energetico. Per millenni l'Uomo ha costruito i suoi edifici tenendo conto del clima del luogo, dei materiali disponibili e delle funzioni da svolgere. Solo nel 'novecento, con l'introduzione del cemento armato, si è avuto un distacco fra le esigenze climatiche esterne e le tecniche progettuali e costruttive. L'utilizzo di materiali sempre più leggeri, la perdita della massa delle murature esterne, ora sostituite da strutture intelaiate con tondini sempre più sottili e leggeri, hanno determinato un comportamento energetico degli edifici non più in linea con il clima esterno. L'utilizzo di impianti di climatizzazione attivi ha fatto sì che gli edifici potessero essere sempre e comunque riscaldati e, in epoca più recente, anche raffrescati. Le esigenze energetiche degli edifici sono divenute abnormi e solo da una decina d'anni varie norme europee ed italiane stanno cercando di rimediare all'*energy building unconscious design* imponendo verifiche energetiche che portano agli **Edifici a Quasi Zero Energia**. La conoscenza della Climatologia è divenuta importante per operare le corrette scelte progettuali che vedono il Clima far parte integrante della metafora progettuale.

L'evoluzione delle costruzioni edilizie è sempre stata dettata da esigenze di adattamento dell'uomo alle condizioni climatiche esterne: l'edificio, anche nelle sue primitive espressioni, era in

primo luogo un riparo sicuro che consentiva di affrontare sia le condizioni climatiche che di superare le situazioni di pericolo (difesa dell'uomo). Il binomio **forma-funzionalità** ha avuto fin dall'inizio un legame inscindibile, spesso inconsapevole, che ha consentito una evoluzione lenta ma precisa dell'Architettura verso le tipologie attuali segnate anche da un nuovo binomio: **struttura-energia** che segna una linea di demarcazione netta fra l'Architettura classica e quella moderna.

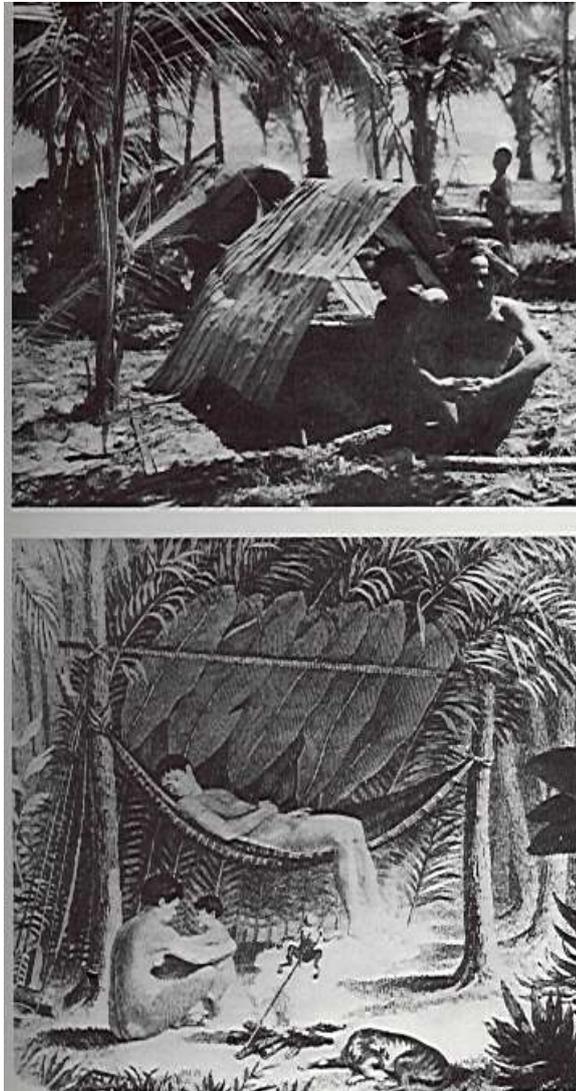


Figura 1: Esempio di architettura primitiva: la capanna.

In figura 1 si ha un esempio di *costruzione* semplice ma funzionale, la capanna delle zone tropicali: essa ha il compito di riparare l'uomo dai raggi solari, di fornirgli un giaciglio sicuro e di avere vita sociale all'interno del proprio nucleo familiare.

In figura 2 si ha un esempio di capanna più evoluta della prima e di dimensioni maggiori e tali da consentirne l'uso a nuclei plurifamiliari. Si tratta sempre di architetture primitive che coniugano al massimo l'esigenza di una funzionalità minima con le capacità costruttive e la disponibilità dei materiali nei villaggi tropicali. In questo caso si ha un ingresso ben delimitato ed una cucina esterna. La capanna è tutta chiusa ed appare evidente un minimo di ingegneria costruttiva (colonnine esterne e copertura a cono) per una costruzione di certo più impegnativa rispetto alla capanna elementare della figura 1.

In ogni caso le costruzioni sin qui viste sono caratterizzate dall'essere leggere<sup>1</sup> ed essenziali. Queste costruzioni sono ben lontane dai concetti di *benessere* e di funzionalità come oggi li intendiamo, sono del tutto prive di soluzioni impiantistiche evolute e consentono solamente una sorta di vita essenziale e/o di sopravvivenza degli occupanti.



Figura 2: Capanna più evoluta e plurifamiliare.

Una maggiore evoluzione troviamo nella costruzione della figura 3.

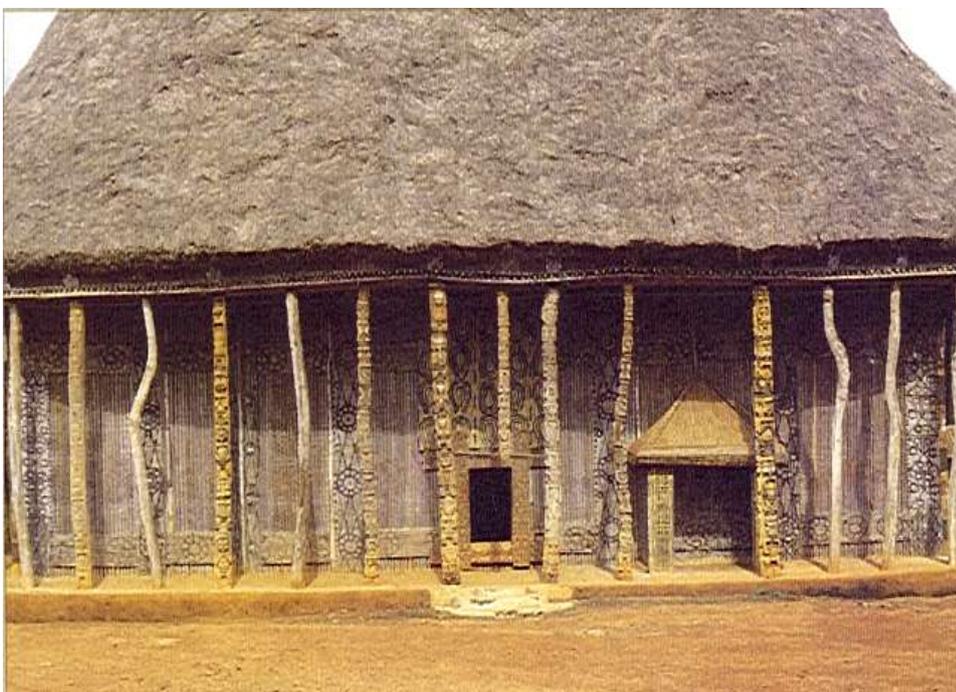


Figura 3: Esempio di capanna più evoluta rispetto alla figura 1.

---

<sup>1</sup> Vedremo meglio nel prosieguo come questa *leggerezza* comporti una ridotta *capacità termica* dell'involucro esterno che ben si adatta all'evoluzione climatica esterna, ai forti irraggiamenti e alle elevate temperature medie.

Non si deve pensare che una costruzione primitiva sia priva di interesse scientifico, al contrario essa spesso è di grande interesse perché sintetizza mirabili intuizioni architettoniche e tecnologiche e rappresenta spesso il miglior compromesso fra esigenze architettoniche<sup>2</sup> e tecniche costruttive tipico delle costruzioni *vernacolari*.

Si prenda in considerazione l'*igloo* eschimese di figura 4.

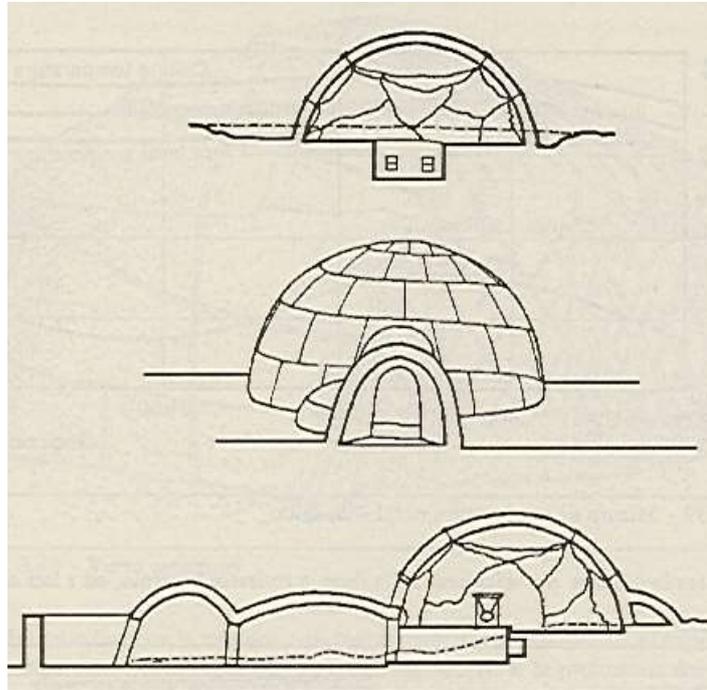


Figura 4: Esempio di architettura funzionale: l'*igloo* eschimese

Esso è un esempio mirabile di sintesi architettonica e tecnologica: la forma sferica è la migliore per ridurre le perdite di calore<sup>3</sup> verso l'esterno e i materiali sono gli unici reperibili sul posto, lastre di ghiaccio segato in modo da formare superfici continue, senza soluzione di continuità apparenti.

La *forma* architettonica è legata all'evoluzione culturale di un popolo, al suo gusto del bello, alla coscienza di costruire un manufatto espressione della propria civiltà, per cui le soluzioni dei problemi appaiono diversificati e peculiari per ciascun popolo e per ciascuna civiltà.

Se rivolgiamo l'attenzione all'evoluzione storica dell'architettura si può senz'altro affermare che l'esigenza di maggior benessere ambientale<sup>4</sup> è cresciuta di pari passo con l'evoluzione sociale dei popoli e con la maggiore disponibilità di tecnologia. In fondo fino all'inizio di questo secolo l'incidenza dell'impiantistica<sup>5</sup> sul costo complessivo di un edificio era di qualche percento (non superiore al 5%) del costo delle murature.

---

2 Intese come realizzazione del binomio *forma-funzionalità* con riferimento al clima esterno e alle tecnologie e materiali di costruzione disponibili.

3 Si vedrà in seguito come le perdite di calore dipendano, a parità di condizioni, dal rapporto S/V fra superficie esterna e volume interno. La sfera è la forma geometrica che la minore superficie esterna a pari volume e quindi il rapporto S/V minimo. Un problema dispersivo analogo si ha nella costruzione dei forni a legna e ancora una volta la forma migliore è quella semisferica, come nell'*igloo*.

4 Si intende qui per *benessere ambientale* l'insieme di condizioni fisico-tecniche (termoigrometriche, acustiche, illuminotecniche, visive, ...) atte a raggiungere il benessere dell'uomo all'interno degli edifici in funzione dell'attività svolta, della tipologia costruttiva e delle condizioni climatologiche esterne.

5 Si intende per *impiantistica* l'insieme di strumenti, dispositivi o insieme di essi (impianti) capaci di modificare il comportamento naturale di un edificio. Ad esempio possiamo parlare di impiantistica termica

Oggi si è avuto un capovolgimento di importanza e l'impiantistica, soprattutto per gli edifici più complessi, raggiunge e supera il 60% del costo dell'edificio. Si parla di *edifici intelligenti* proprio per indicare quell'insieme complesso di architettura e tecnologia governati da controllori sofisticati e computerizzati. Si pensi alla gestione integrale di un grattacielo, di un moderno complesso ospedaliero, ...

In figura 5 si ha un esempio di caseggiato romano nel quale sono ben visibili costruzioni a più livelli organizzate in un tessuto urbano. Apparentemente sembra di vedere un caseggiato di una città moderna: la differenza è tutta nelle condizioni abitative interne e nell'impiantistica prima quasi del tutto assente se si eccettua per la distribuzione dell'acqua e per la raccolta delle acque nere che nelle abitazioni romane erano ben sviluppate. In figura 6 si ha un esempio di costruzione palazziale a Cnosso: anche qui si hanno più livelli ed è presente un sistema di captazione delle acque piovane e di eliminazione delle acque nere.



*Figura 5. Palazzo di Cnosso- Costruzione a più livelli.*

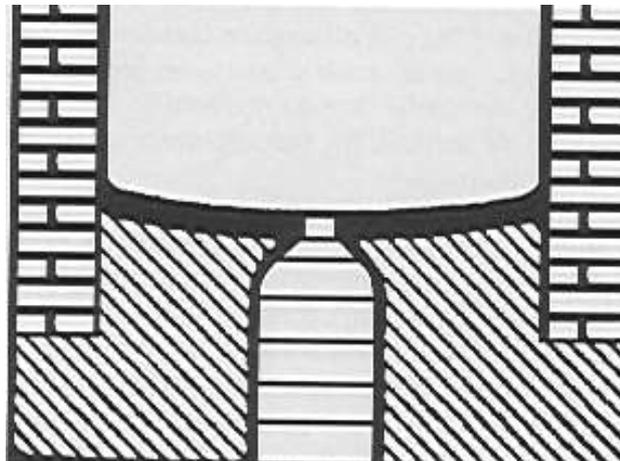
---

(riscaldamento, condizionamento), illuminotecnica (impianto di illuminazione artificiale), impiantistica acustica (impianto di amplificazione artificiale), ...



*Figura 6: Esempio di caseggiato romano*

Dal confronto con le costruzioni romane della figura precedente appare evidente quell'evoluzione architettonica associata all'evoluzione della civiltà dei popoli prima indicata.



*Figura 7: Esempio di bagno babilonese.*

L'impiantistica essenziale era presente anche nelle antiche costruzioni babilonesi: in figura 7 si ha un esempio di bagno babilonese progenitore del *bagno alla turca* utilizzato ancora oggi. Si vede bene un foro centrale di scarico ed un canale verticale che convogliava le acque nere in una cisterna di raccolta.

Ben diversa è la situazione con i moderni bagni, come indicato nella figura 8. L'impiantistica è qui elemento essenziale per la soluzione architettonica del bagno speciale per portatori di handicap.



Figura 8: Un bagno moderno per handicappati.

Con il passare dei secoli le abitazioni hanno avuto le evoluzioni architettoniche che conosciamo: in figura 9 si ha un esempio di casa araba nella quale sono ben visibili i segni distintivi di questa tipologia costruttiva ma che poco aggiunge alla casa romana. Il gusto e la raffinatezza architettonica sono certamente migliorati rispetto alle costruzioni dei secoli precedenti ma l'incidenza dell'impiantistica è sempre essenziale. La volumetria degli edifici, la disposizione e l'orientamento e i materiali costituiscono un esempio mirabile, ancor' oggi, di architettura. L'evoluzione ha portato ad avere oggi edifici sofisticati del tipo di quello indicato in figura 10. Si tratta del Centro Pompidou di Parigi nel quale l'architettura delle forme si coniuga mirabilmente alle funzionalità degli impianti e con la scelta dei materiali. Del resto non deve meravigliare che l'evoluzione tecnologica abbia portata ad una evoluzione delle forme di questo tipo.

Lo sviluppo della tecnologia, la disponibilità di nuovi materiali e di metodologie costruttive ha portato la fantasia degli architetti ad immaginare strutture ardite nelle quali il binomio *forma-funzionalità* sono sviluppati al massimo. L'evoluzione dell'architettura ha comunque tenuto conto dell'esigenza primaria del raggiungimento del benessere dell'uomo.

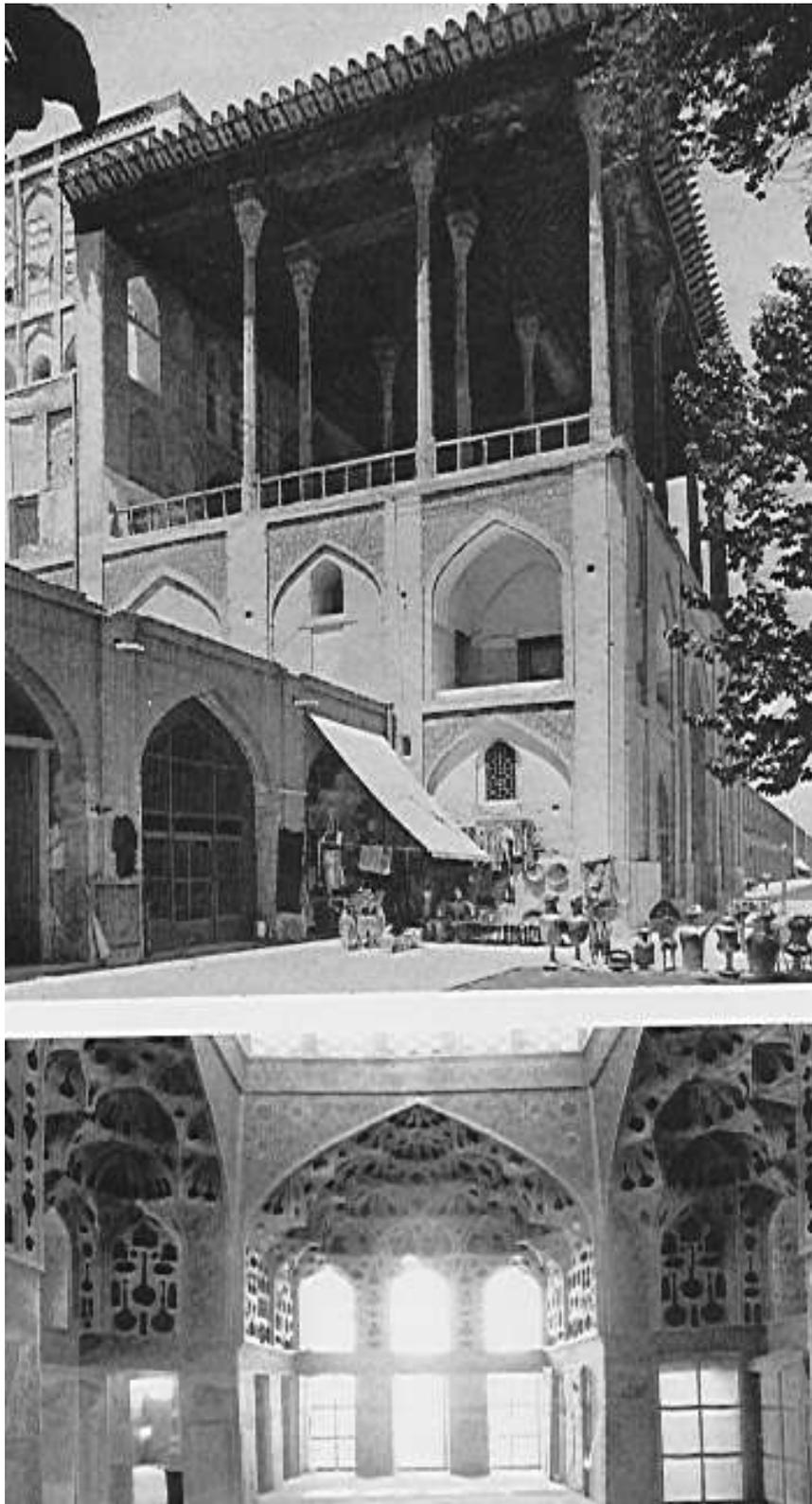
Così, ad esempio, l'uso smodato delle superfici vetrate e l'utilizzo delle strutture in calcestruzzo armato con murature leggere ha indotto la necessità di avere impianti di climatizzazione estiva ed invernale<sup>6</sup> In pratica l'architettura di questo secolo si è sempre più generalizzata, perdendo le specificità e le tipicità dei luoghi e rendendo le costruzioni sempre più simili a qualunque latitudine e in qualunque condizione.

Così l'abitazione moderna di Oslo, di Roma, di Città del Capo si differenziano solo per l'impiantistica interna che consente di affrontare situazioni climatiche diverse (dal freddo intenso al caldo intenso) senza apparentemente modificare la forma.

In fondo ora l'Architetto può facilmente subire il fascino dei grandi progettisti emulandoli nella progettazione corrente senza più doversi preoccupare delle condizioni climatiche locali esterne ed interne: ci penseranno gli impianti a rimettere a posto le incongruenze energetiche create dalla dissociazione del più volte citato binomio *forma-funzionalità*

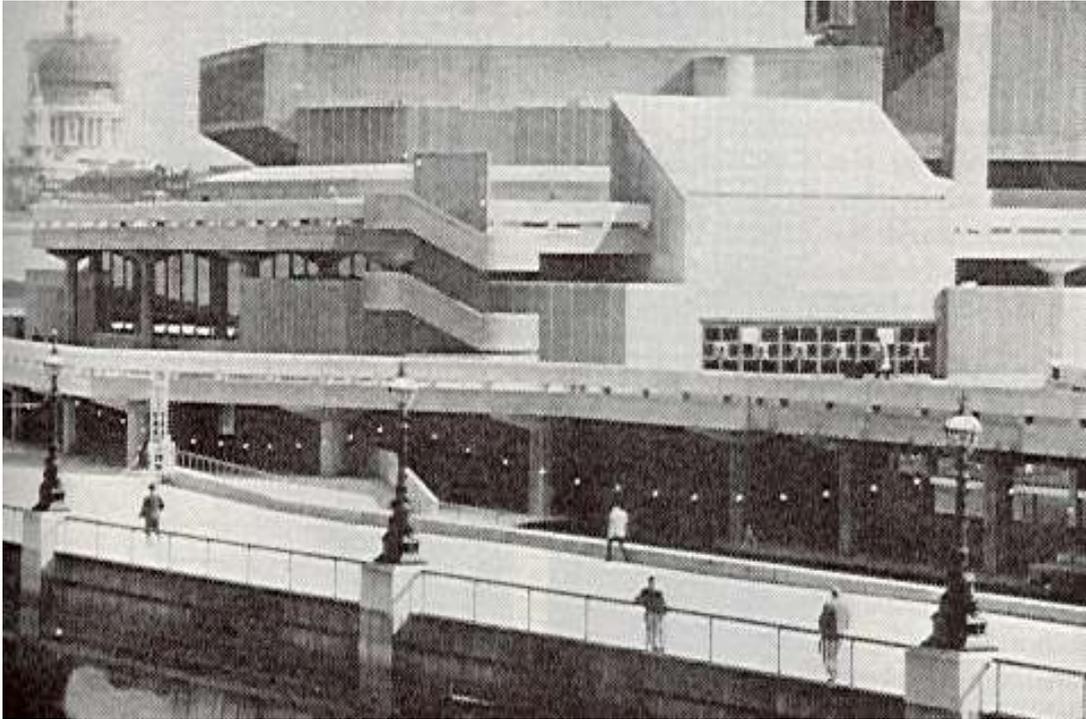
---

<sup>6</sup> La *climatizzazione* è il controllo delle condizioni di temperatura, umidità e benessere interno degli edifici sia invernali che estive. Qui si esplicitano gli attributi *estiva* ed *invernale* non per creare una tautologia ma per far risaltare meglio in chi legge le esigenze impiantistiche nelle due stagioni più impegnative, l'estate e l'inverno.

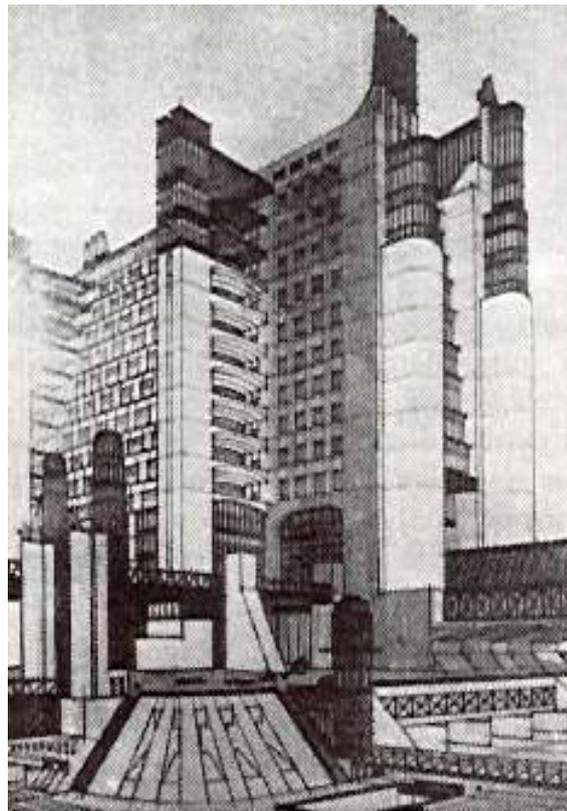


*Figura 9: Esempio di costruzione araba (Granada)*

Oggi i progettisti sembrano più affascinati dal creare una forma architettonicamente bella (come se fosse una scultura) che dal creare un'opera di sintesi di forma e funzionalità. Forse la grande evoluzione delle varie discipline scientifiche ha portato ad un'eccessiva specializzazione dei ruoli con conseguente separazione delle funzioni.



*Figura 10: Centro Pompidou a Parigi.*



*Figura 11: La città del futuro.*

Certo la progettazione architettonica di grandi opere è sempre più un'opera di sintesi mirabile e di equilibrio fra componenti diverse che non deve essere sottovalutata dai giovani. Nel prosieguo si vedrà come il problema del controllo del clima interno degli edifici in funzione delle tipologie costruttive e del clima esterno condiziona fortemente una corretta progettazione architettonica e pertanto i concetti basilari della climatologia debbono far parte del patrimonio culturale del moderno architetto.

Non va poi trascurata l'importanza che riveste una corretta progettazione nei confronti della gestione energetica dell'edificio. Con il crescere del costo dell'energia e con una grande quantità di leggi e norme tecniche sulla limitazione dei consumi energetici negli edifici, la progettazione *energeticamente cosciente* è diventata un obbligo inalienabile per tutti i progettisti.

Proprio l'esigenza di raggiungere risparmi energetici sempre più elevati, come le norme richiedono, o le crisi energetiche planetarie degli anni settanta, hanno portato gli studiosi a studiare con maggiore attenzione la possibilità di avere edifici capaci di controllare il microclima interno con scelte costruttive particolari che non richiedono forti apporti energetici esterni. In questi ultimi decenni si è sviluppata l'*architettura bioclimatica* che, al di là dei risultati quantitativi, ha avuto il grande merito di sensibilizzare l'Architettura moderna al problema della corretta progettazione energeticamente cosciente (*building conscious design*). Spesso la sola forma architettonica non può soddisfare tutte le esigenze di benessere interno degli edifici e pertanto si ricorre anche ad elementi solari attivi, quali i collettori piani, per fornire all'edificio l'energia termica necessaria per un corretto riscaldamento ambientale: in figura 13 si ha un esempio di architettura solarizzata nella quale sono ben visibili i collettori solari piani sulla faccia a sud.

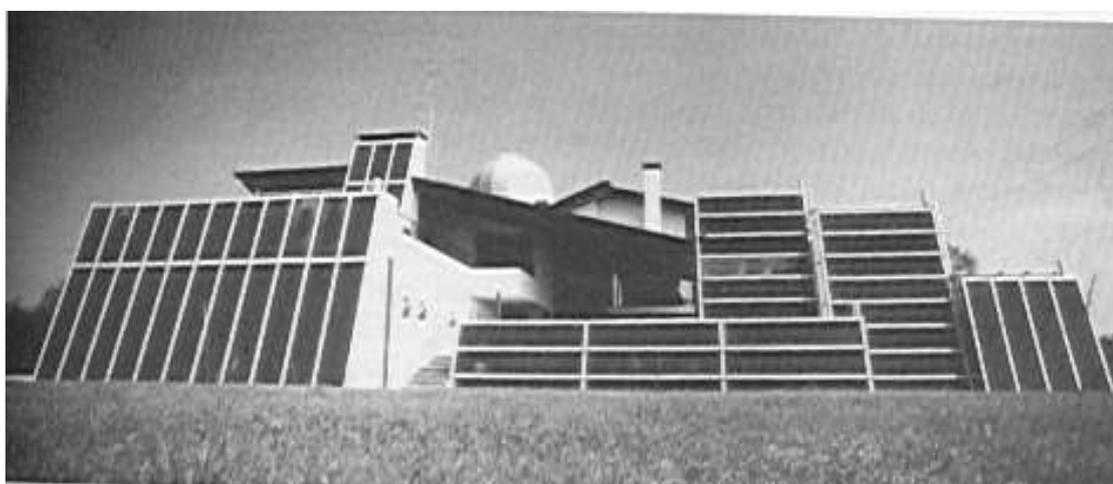


Figura 12: Esempio di casa solarizzata con collettori piani

In figura 13 si ha una foto del laboratorio di climatologia ambientale Jule Verne all'interno del quale vengono effettuati studi di simulazione su edifici a scala reale. Ciò dimostra la grande importanza che lo studio della climatologia (esterna ed interna) ha assunto nell'architettura di oggi.

Va però osservato che poco possiamo fare per modificare il clima esterno mentre molto è possibile fare per modificare e creare un microclima interno agli ambienti soddisfacente e capace di garantire tutti gli standard qualitativi di vita.

Ormai l'architettura non deve solo consentire la sopravvivenza dell'uomo rispetto alle condizioni climatiche esterne ma deve anche assicurare all'uomo il massimo rispetto della propria personalità e dignità garantendo le condizioni di benessere necessarie.

Difficilmente possiamo accettare un'abitazione priva di riscaldamento ambientale o, nei climi più caldi, di condizionamento estivo. Questi impianti non sono più un lusso per benestanti ma una necessità primaria da garantire a tutti i cittadini.

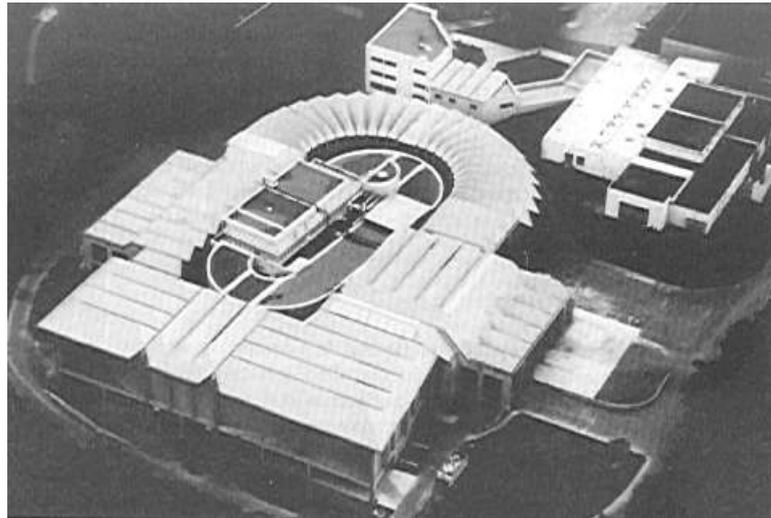


Figura 13: Centro di ricerca di climatologia Jule Verne.

Pertanto l'evoluzione delle coscienze dei popoli verso l'acquisizione di condizioni di vita dignitose e quindi il sorgere di diritti minimi garantiti di qualità della vita ha trasformato l'architettura di questo secolo. Non è più solo la forma ad avere il *focus* del progettista ma anche la funzionalità globale dell'edificio. Possiamo sintetizzare, parzialmente, l'evoluzione dell'Architettura con il seguente prospetto:

FORMA	FUNZIONALITA'
Evoluzione della civiltà	Evoluzione della tecnologia
Evoluzione del gusto	Evoluzione delle esigenze funzionali

Non si deve pensare ad una evoluzione indipendente della *forma* e della *funzionalità*: esiste un'interazione forte fra le evoluzioni e del resto è l'Uomo che cresce e si evolve nella globalità del suo pensiero. Nei riguardi del secondo binomio **struttura-energia** si può riassumere nel seguente prospetto l'evoluzione di questo ultimo secolo.

STRUTTURA	ENERGIA
Evoluzione della tecnologia	Distacco della forma dalle esigenze energetiche
Liberazione dai vincoli formali	Evoluzione delle esigenze sociali per i servizi

Se, come diceva Le Corbusier, l'introduzione del cemento armato ha *liberato* l'architetto dai vincoli costruttivi (muri portanti, cordoli perimetrali per i solai, ...) consentendogli la *pianta libera, i solai aggettanti, le pareti finestrate a nastro continuo, ...*, è anche vero che la libertà di plasmare l'involucro su canoni estetici sempre più liberi ha comportato lo scollamento diffuso e generalizzato fra comportamento termofisico dell'edificio e le leggi della termodinamica. Questo scompenso è stato quasi del tutto compensato con l'impiantistica termotecnica chiamata a sanare i *guasti* termodinamici generati da una progettazione *energeticamente non cosciente*. Le condizioni interne, qualunque siano quelle esterne, possono oggi essere create *ad hoc* in conformità a qualunque necessità tecnologica e/o fisiologica, basta solo *pagare* la bolletta energetica che la suddetta impiantistica comporta.

Inoltre, come si può ben osservare nella figura 14, l'impiantistica influenza fortemente la moderna architettura e deve essere tenuta in considerazione dal progettista fin dal primo momento perché ne condiziona la volumetria, la distribuzione compositiva e il funzionamento complessivo.

In alcuni casi la mancanza di sinergie progettuali fra l'edificio e l'impiantistica porta ad una diminuzione drastica delle prestazioni della costruzione e costringe i progettisti a ricorrere a modifiche strutturali (superfetazioni impiantistiche) di discutibile gusto.

Ad esempio, se la climatizzazione degli ambienti è effettuata con distruzione di aria (calda e/o fredda) mediante canalizzazioni, allora occorre prevedere fin dall'inizio cavedi tecnologici di dimensioni non trascurabili, locali da assegnare alle apparecchiature impiantistiche (centrali di trattamento aria, centrali termiche, centrali frigorifere) che non possono poi essere trovati come per miracolo se non sacrificando altri locali utili.

In figura 15 si può vedere un esempio della complessità di un semplice impianto di climatizzazione con distribuzione dell'aria mediante canalizzazioni: non è pensabile di mascherare gli impianti come si può fare con delle tubazioni per l'acqua perché le loro dimensioni non sono trascurabili. Con il crescere delle dimensioni dell'edificio crescono anche le dimensioni dei rami principali dei canali e pertanto i volumi occupati diventano significativi ed occorre prevederli fin dal primo momento progettuale.

Nel caso di edifici complessi, quali ospedali ed edifici pubblici in genere, la complessità degli impianti è tale da condizionare completamente anche le scelte progettuali architettoniche. E non vuole qui parlare dei soli impianti termici<sup>7</sup> ma anche degli altri impianti oggi sempre più richiesti e necessari per lo standard qualitativo di vita prima citato.

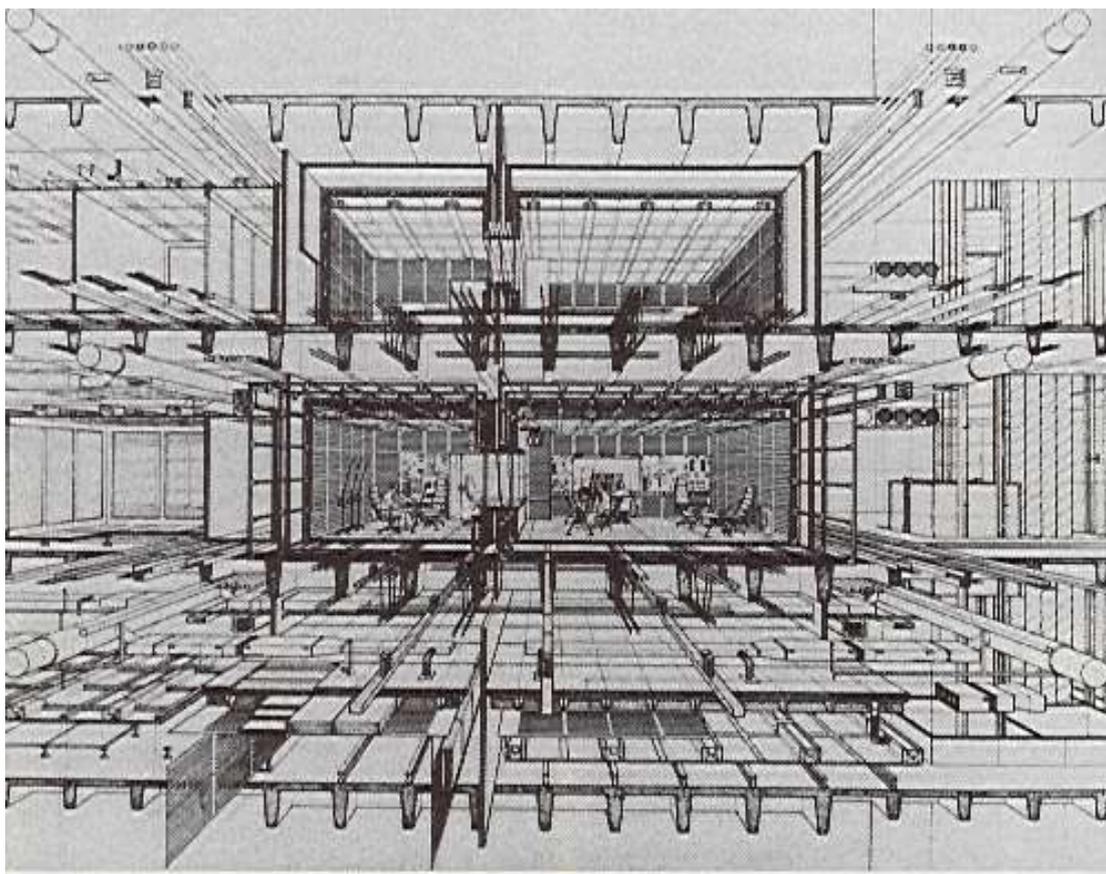


Figura 14: Esempio di impiantistica in un moderno edificio.

---

<sup>7</sup> Sono questi gli impianti strettamente connessi alla climatologia interna.

Oggi si richiedono impianti elettrici (di illuminazioni e/o di potenza) sempre più complessi e al tempo stesso sicuri, come pure si richiedono impianti telefonici e telematici più sofisticati<sup>8</sup>. Il cablaggio di tubi, cavi elettrici e cavi telematici si sviluppa per chilometri all'interno degli edifici e richiede un'attenzione particolare da parte del progettista architettonico per evitare attraversamenti in zone sensibili, mancanza di funzionalità (ad esempio per mancanza di ispezionabilità) ed altri difetti gravi e/o pericolosi per gli occupanti.

Quanto sopra detto giustifica l'interesse per il corso di Climatologia che qui si intende svolgere. Probabilmente l'Architetto non sarà il progettista di tutte le componenti dell'edificio e relegherà agli specialisti la progettazione degli impianti (termici, elettrici e telematici) ma è indispensabile che Egli sappia dialogare con un linguaggio comune con essi.

Non solamente sono gli impianti a condizionare fisicamente la progettazione architettonica<sup>9</sup> perché volumetricamente ingombranti ma anche la notevole quantità di norme e disposizioni legislative, oggi divenute cogenti, che interessano ormai tutti gli aspetti progettuali dell'edilizia.

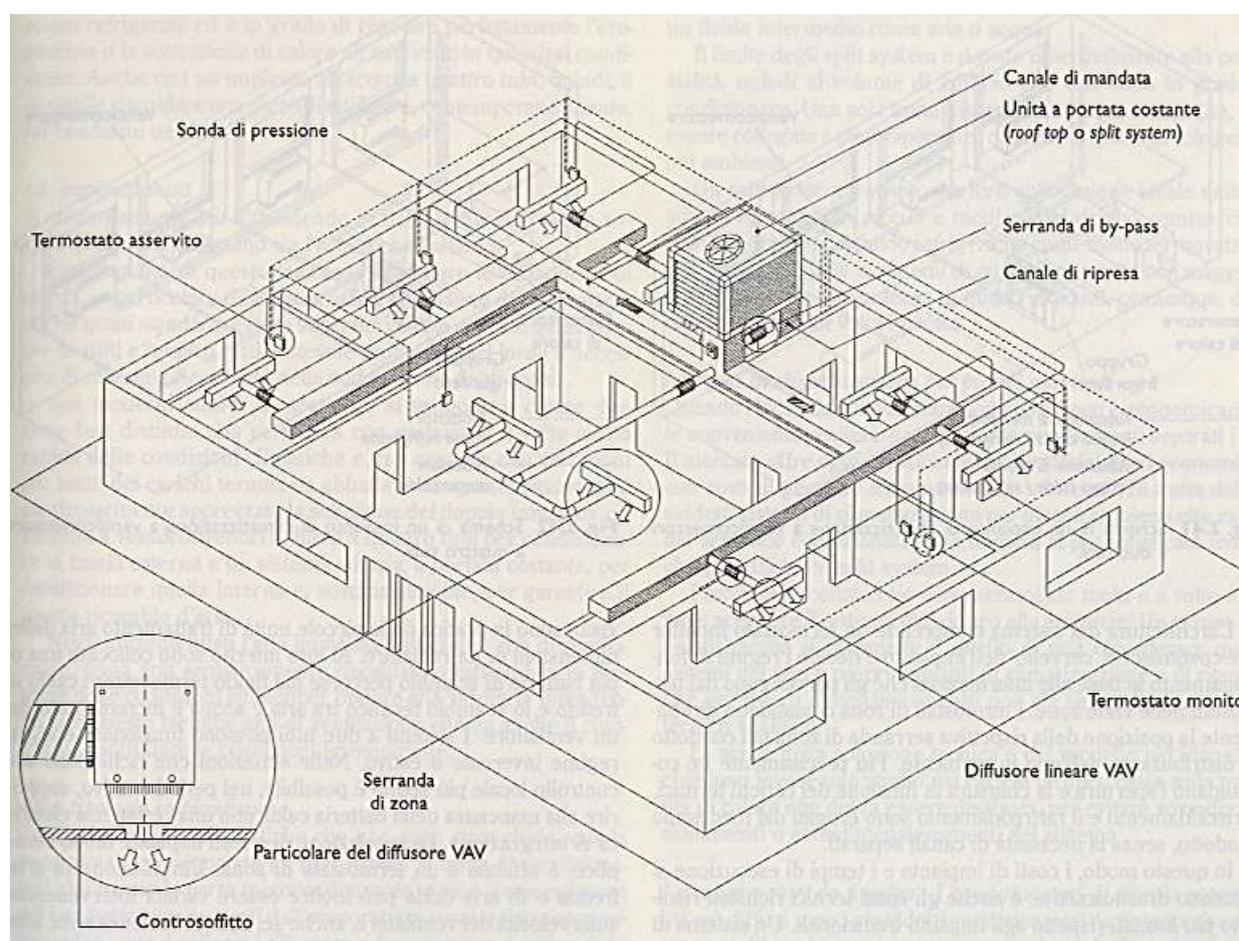


Figura 15: Esempio di canalizzazioni per la distribuzione dell'aria in un appartamento.

<sup>8</sup> L'uso di strumenti telematici quali il collegamento ad *Internet* è oggi limitato a pochi casi ma domani potrebbe essere uno standard di vita come lo è divenuto il telefono in ogni famiglia.

<sup>9</sup> In questa sede intenderemo *progettazione architettonica* la sola progettazione dell'involucro edilizio e per *progettazione impiantistica* quella dei soli impianti. In realtà la *progettazione* dell'edificio è unica, è un atto creativo globale che interessa più competenze specifiche. E' proprio la sinergia di queste competenze che determina la qualità del progetto e quindi la funzionalità operativa del manufatto. La figura professionale dell'Architetto è oggi fondamentale nella gestione del coordinamento progettuale globale dell'edificio: esso è il regista e al tempo stesso l'interprete principale del processo progettuale.

Alcune di queste norme finiscono per dettare vincoli assoluti per la progettazione della *forma* in funzione dei materiali scelti e delle prestazioni prevedibili. Ad esempio la L. 10/91 e il D.M. 412/94 impongono che l'edificio abbia disperdimenti termici limitati in funzione della zona climatica e della destinazione d'uso dell'edificio.

In particolare in funzione del rapporto S/V (e quindi di forma e volumetria dell'edificio) è fondamentale per il calcolo dei limiti massimi di disperdimenti termici consentiti in funzione delle proprietà globali trasmissive delle pareti (loro trasmittanza termica e quindi loro composizione strutturale). Pertanto la progettazione architettonica non è più un momento creativo assoluto e libero ma vincolato al rispetto delle esigenze funzionali e prestazionali dell'opera che si intende progettare.

Questo volume tratta anche argomenti che per millenni hanno fatto parte della cultura dei popoli in modo non sempre cosciente e che le varie crisi energetiche hanno fatto riemergere come fatti fondamentali per l'*Architettura Bioclimatica*. L'architettura è una e non ha bisogno di avere attributi specifici se, come sempre dovrebbe essere, Essa assolve a tutte le funzioni che Le derivano e che deve assolvere per l'habitat umano. Si è più volte detto che è il *clima* a condizionare la vita dell'uomo, a renderla possibile o impossibile nei vari posti della Terra ove sono presenti condizioni estreme.

L'evoluzione dell'Architettura a partire dal XX secolo è stata sempre più rivolta all'utilizzo di tecnologia sia nella scelta dei materiali che (si dovrebbe dire per conseguenza) degli impianti. Si è verificato uno scollamento fra le funzioni dell'involucro esterno, per millenni unico elemento di regolazione delle condizioni termoigrometriche interne, e il comportamento termofisico globale dell'edificio. La scelta di materiali sempre più leggeri e di tecniche costruttive a geometria libera facenti uso di strutture in cemento armato o metalliche, la progettazione di forme non più legate a funzioni ma, quasi sempre e sempre più spesso, al solo gusto estetico del progettista hanno reso l'edificio un paradosso termodinamico la cui esistenza impone l'uso sempre più massiccio di tecnologia e di energia.

Testimonia questa tendenza la nascita dell'*intelligent building* (neologismo quanto mai significativo di quanto sin qui detto) che esprime il trionfo dell'impiantistica sul *mattone* tanto da conferirgli l'attributo di *intelligente*. Questo poco intelligente modo di vedere le cose nasconde interessi economici consolidati e costumi progettuali ormai ritenuti così *normali* che neppure l'altro neologismo che si è cercato di contrapporre, l'*energy conscious design*, ha portato a risultati visibili se non per poche eccezioni, quasi prototipali, di edilizia *bioclimatica*.

Ritengo questa necessità dell'Architettura moderna di assumere attributi specifici e qualificanti un inizio di crisi di pensiero e di metodo. Dire solamente Architettura non basta, occorre qualificarla in qualche modo: *bioclimatica* o non, *tecnologica* o non. Da solo il termine *Architettura* sembra volesse essere sinonimo di *confusione*, *disordine*, *incoerenza*. L'Architettura, quella buona, è *passiva*, *bioclimatica*, *energeticamente cosciente*, ... altrimenti non va più bene.

Questa confusione di termini e di idee è nata una trentina di anni fa quando il mondo occidentale fu costretto a fare i conti, per la prima volta (e in modo apparentemente salutare) con la disponibilità limitata dell'energia di origine fossile. La crisi mediorientale conseguente alle guerre arabo-israeliane portò al blocco del flusso del petrolio, all'inizio dell'aumento del costo unitario (si passò in breve tempo da 2\$ a 39\$ per barile di petrolio grezzo) e quindi ad una crisi di identità culturale e materiale di una civiltà del consumo che sembrava avere raggiunto i caratteri dell'onnipotenza: tutto poteva essere fatto purché se ne avesse la volontà. Così, per quel che riguarda l'Architettura, si poteva spezzare il delicatissimo equilibrio che essa aveva raggiunto in ogni luogo della Terra fra microclima e tipologia costruttiva (vedi *architettura vernacolare*) a favore del *libero pensiero* dei progettisti che potevano essere liberi di costruire allo stesso modo

all'equatore come nei paesi nordici, annullando la stessa identità culturale delle città, sempre più eguali ad un prototipo privo di origini fisiche e culturali.

Tutti gli scompensi provocati da questa *evoluzione* dell'Architettura, in particolare quelli energetici, venivano aggiustati dalla tecnologia e dagli impianti. E ciò è andato avanti senza vedere gli effetti ambientali, economici e culturali che questo modo di vivere ha prodotto. Oggi è nata una *coscienza ambientale* che pare più attenta ai problemi dell'inquinamento (in senso lato), dell'uso dell'energia di origine fossile (causa primaria di inquinamento chimico e termico) e in genere ai problemi della *qualità della vita*. Non sappiamo se sia già tardi o se possiamo ancora riprendere il controllo dell'ambiente ma è certo che sempre più spesso si parla di *nuovi criteri* di progettazione architettonica che tengono conto di molteplici aspetti (forse troppi e in troppo poco tempo): energetici, qualitativi, ambientali, culturali. L'origine di questa presa di coscienza la si può far nascere negli anni '70 e si spera possa continuare a lungo. Ma l'imprevisto calo del costo del petrolio ha fatto sopire quegli interessi culturali che sembravano essere nati in quegli anni. Non basta più parlare di *progettazione energeticamente cosciente*, di *edifici bioclimatici* o di problematiche simili; il problema è oggi di realizzare edifici congruenti con queste idee.

Fin quando l'energia costerà relativamente poco sarà sempre più allettante costruire alla *vecchia maniera*, più economica, più conosciuta e addirittura standardizzata commercialmente. E ai bei principi bioclimatici chi ci pensa? Si vedrà! Forse alla prossima crisi energetica .....! Per ora è così comodo continuare come se nulla fosse accaduto: ci sono metodologie consolidate, manuali già pieni di dati, imprese che operano nel modo già noto; perché dovere studiare nuovi sistemi, perché dover faticare per l'analisi di metodologie costruttive nuove per le quali non ci sono dati nei manuali ma occorre effettuare analisi complesse magari con simulazioni matematiche complicate, perché spendere soldi in più per cambiare le tipologie costruttive con altre che disperdono meno calore, che isolino acusticamente dal rumore urbano, che evitino gli effetti di surriscaldamento estivo, che non abbiano condense, ..... Tutto costa troppo e costa anche fatica. Domani ... Domani si vedrà!

Da qualche anno i corsi universitari hanno modificato i piani di studio inserendo materie nuove quali, per l'appunto, la ***Climatologia dell'Ambiente Costruito***. Si spera che i nuovi progettisti abbiano una formazione culturale più attenta alle problematiche dell'ambiente, della qualità della vita e dell'energia. Dico *si spera* perché non sono del tutto convinto che sia sufficiente solo insegnare qualche concetto in più ai giovani e futuri professionisti. Occorre più profondamente incidere nella coscienza e nella formazione dei professionisti che non hanno mai studiato queste problematiche e che, spesso per inerzia intellettuale oltre che per banale pigrizia, continuano ad operare come se niente fosse accaduto in questi anni. Occorre incidere sul mondo reale obbligando a costruire in modo nuovo mediante inventivi di varia natura (economici, fiscali, ...) altrimenti gli effetti del nuovo pensiero, già miseri considerato che la percentuale delle nuove costruzioni è abbondantemente inferiore all'1% del parco costruito, saranno del tutto insignificanti.

Nel mese di febbraio del 1981 si è tenuto a Catania il *Primo Seminario di Architettura Bioclimatica d'Italia*. Erano gli anni di maggior fervore nel mondo accademico per tutto ciò che era *Architettura Passiva e Bioclimatica*. Lo stesso Consiglio Nazionale delle Ricerche aveva avviato una *Progetto Finalizzato Energetica* che aveva, fra i vari sottoprogetti, quello per le *Energie Rinnovabili (RERE)* e per l'energia solare. In sede internazionale nascevano i primo Congressi sull'Architettura Bioclimatica e fra questi si ricorda il *PLEA (Passive Low Energy Architecture)* ancora oggi stancamente esistente. Nel 1983 vi fu una rassegna organizzata dall'*ENEA (Ente Nazionale per le Energie Alternative)* e da *IN/ARCH (Istituto Nazionale di Architettura)*. Seguirono alcuni concorsi nazionali e internazionali sull'architettura bioclimatica.

Ma la passione e la voglia di ricerca di quel periodo si è spenta, come una moda, nell'arco di pochissimi anni. Lo stesso *CNR* ha chiuso e non più rinnovato il *PFE* e i temi bioclimatici sono rimasti ristretti a pochi *intimi*. Occuparsene non fa più moda! Non fa più cultura! Il numero di pubblicazioni su queste tematiche va sempre più diminuendo. Tutto è rinviato alla prossima crisi energetica.

Nei prossimi capitoli si riportano quasi integralmente alcune delle relazioni presentate in quel *Primo Seminario di Architettura Bioclimatica* nel quale i maggiori studiosi internazionali vennero in Sicilia, a Catania presso il Dipartimento di Architettura ed Urbanistica, ad esprimere le loro idee e a presentare le loro ricerche. C'ero anch'io! L'ho organizzato e voluto quel seminario con i colleghi della Facoltà di Ingegneria perché credevo fermamente in quelle idee. Ci credo ancora e desidero trasmettere questa convinzione ai giovani allievi nella speranza che almeno loro sappiano essere superiori alle mode e alle frivolezze.

I primi capitoli saranno di introduzione alla tematica dell'Architettura Bioclimatica: essi costituiscono una giustificazione teorica e logica della necessità di una nuova metodologia di studio e di un nuovo percorso progettuale che dia all'edificio quelle funzioni che l'evoluzione di quest'ultimo secolo ha fatto perdere. Seguiranno quindi i capitoli di approfondimento delle tipologie fondamentali: muro Trombe - Michell, serra addossata, sistema Barra - Costantini, camino solare.

Gli ultimi capitoli prenderanno in esame alcune applicazioni e/o esempi tipici cercando di coglierne l'aspetto bioclimatico.

## 1.1 IMPORTANZA DELLA TERMOFISICA DELL'EDIFICIO

L'evoluzione dell'Architettura è stata condizionata dall'esigenza primaria di consentire la vita dell'uomo all'interno degli edifici. Vi sono state, necessariamente, altre motivazioni allo sviluppo di essa dettate da esigenze economiche, militari, religiose etc ma in ogni caso l'Architetto non può prescindere dal considerare l'edificio come un sistema vitale nel quale si sommano effetti fisici che determinati dall'interazione dello stesso edificio con l'ambiente esterno in cui è immerso. Possiamo qui considerare numerose tipologie di interazione edificio-ambiente e che brevemente elenchiamo:

- interazioni luminose relative alle condizioni di benessere visivo degli ambienti;
- interazioni acustiche relative alle condizioni di benessere acustico degli ambienti;
- interazioni termiche relative alle condizioni di benessere termoigrometriche degli ambienti.

Sono queste le interazioni fisico-tecniche che condizionano la progettazione architettonica anche per effetto delle numerose norme cogenti entrate in vigore negli ultimi anni. In questa sede ci si limiterà a studiare solo le interazioni termoigrometriche che condizionano e determinano la climatologia interna dell'edificio. Se non ci si vuole fermare alle sole considerazioni qualitative occorre senz'altro pervenire a formulazioni quantitative legate alla Termofisica dell'edificio: questo deve essere visto come un *sistema* complesso costituito da *forma* e da *materia* che interagisce con l'ambiente esterno secondo leggi termofisiche oggi perfettamente note e che in parte saranno oggetto dei capitoli futuri.

L'evoluzione termica e fluidodinamica dell'ambiente esterno costituisce la climatologia esterna che deve essere considerata come la causa *forzante* del *sistema-edificio* nel senso che

quest'ultimo risponderà alle sollecitazioni termoigrometriche provenienti dall'ambiente esterno in funzione delle proprie capacità di risposta<sup>10</sup> oltre che dalle stesse tipologie di sollecitazione.

Per fare un esempio consideriamo un edificio immerso in un ambiente esterno: sappiamo che le condizioni climatiche esterne variano con le stagioni e con l'alternarsi del dì e della notte quindi con l'irraggiamento solare. La variazione della temperatura esterna viene trasmessa all'interno degli edifici in un modo dipendente sia dalle caratteristiche esterne (valori massimi e minimi, periodo di oscillazione) che da quelle proprie delle pareti (densità, calore specifico, conducibilità termica).

Pertanto non ci meravigliamo di osservare che le pareti spesse e pesanti di una cattedrale consentano di avere fresco d'estate e temperature più miti in inverno mentre le pareti leggere e sottili delle moderne abitazioni non ci proteggono sufficientemente dalle variazioni di temperatura esterna tanto che siamo costretti a ricorrere ad impianti ausiliari per riscaldarci in inverno o raffrescarci in estate.

## 1.2 SCOPO DEL VOLUME

Lo scopo del volume è di fornire indicazioni metodologiche e progettuali per la corretta progettazione degli edifici.

I metodi di progettazione sono sviluppati nei corsi di Architettura.

I metodi di progettazione sono sviluppati nei corsi di Impianti Meccanici (Termotecnici o Tecnici Edili) sia dei corsi di Laurea in Architettura che di Ingegneria.

Le indicazioni progettuali indicate nel presente volume sono pertanto solo indicative e comunque non debbono mai ritenersi in contrasto con le regole di progettazione architettonica ed impiantistica.

---

<sup>10</sup> Una moderna visione della *Termofisica* dell'edificio porta a considerare questo come un *sistema* al quale si può applicare la *Teoria dei Sistemi*. In pratica lo studio dell'evoluzione del *sistema-edificio* coincide con lo studio della risposta di questo sistema alle *forzanti* esterne. Pertanto risultano importanti i *modi propri* del sistema (che determinano l'evoluzione transitoria immediata) e la *risposta stabilizzata* nella quale i cosiddetti *modi deboli* si sono spenti e il sistema risponde alla forzante esterna in modo dipendente principalmente dalla stessa forzante.

## 2. IL CLIMA: FATTORI FISICI

Si è già detto che il *Clima* esterno è l'insieme di fattori che condizionano il comportamento degli edifici in quanto ne determinano le condizioni forzanti alle quali essi debbono rispondere. In breve il *Clima* esercita una fortissima influenza su tutti i comportamenti dell'uomo e delle cose. Il *Clima* di un'area è dato dall'insieme delle condizioni atmosferiche, medie o anche istantanee, di quell'area. In particolare sono di interesse nell'ambito di questo corso: l'irraggiamento solare, le condizioni termoigrometriche e i regimi dei venti e di nuvolosità di una determinata zona.

Il clima terrestre si può considerare come la somma di due fattori a scala mondiale:

- Le **dimensioni** e la forma della Terra e i fattori astronomici relativi al movimento apparente del sole attorno ad essa;
- **Fattori** esclusivamente terrestri della composizione ed estensione dell'atmosfera, la distribuzione della terra e dei mari e la distribuzione dei principali caratteri geomorfologici quali le catene montuose, le pianure, i laghi, ....

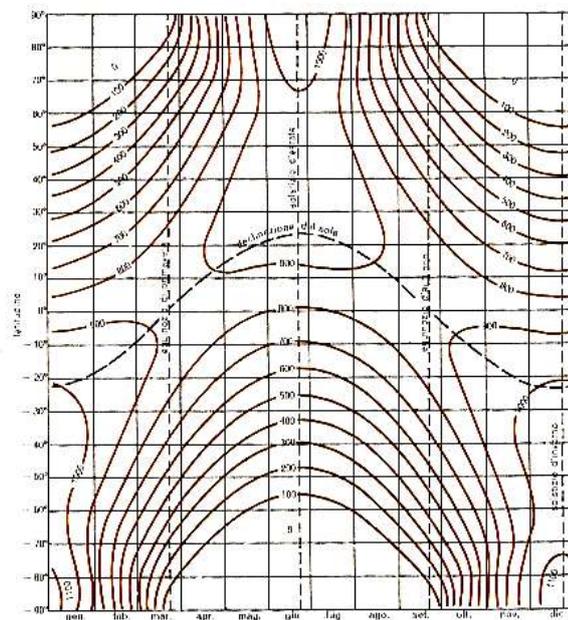
Questi fattori influenzano sia l'*illuminazione* che la *radiazione solare*. Del primo effetto qui non ci curiamo, considerate le finalità del corso, mentre dell'*irradiazione solare* si parlerà in modo più approfondito nel prosieguo.

## 2.1 ELEMENTI DI CLIMATOLOGIA TERRESTRE

Il comportamento termico degli edifici e quindi l'evoluzione del *microclima interna* è funzione, come si approfondirà nel prosieguo, sia delle condizioni climatiche esterne che delle caratteristiche termofisiche dell'involucro esterno dello stesso edificio. E' opportuno, quindi, conoscere bene gli elementi della climatologia terrestre che definiscono le condizioni forzanti esterne alle quali l'edificio deve rispondere.

### 2.1.1 LA RADIAZIONE SOLARE E L'ATMOSFERA DELLA TERRA

Gli effetti dell'atmosfera sulle radiazioni sono marcati. Senza atmosfera, la radiazione incidente sarebbe distribuita in modo ordinato come una funzione della data e della latitudine (vedi figura 16).



Radiazione totale diurna per una Terra senza atmosfera. In colore, la radiazione totale giornaliera (cal/cm<sup>2</sup>) in funzione della data e della latitudine (da T. B. Leighton)

Figura 16: Livelli di radiazione solare sulla Terra

Con l'atmosfera, la radiazione incidente è riflessa, rifratta, diffratta e assorbita. Particelle atmosferiche come polvere, goccioline d'acqua e cristalli di ghiaccio producono riflessione diffusa. Particelle molto più piccole, come le molecole, producono diffrazione che è inversamente proporzionale alla quarta potenza della lunghezza d'onda della radiazione. Ozono e vapor d'acqua sono le principali sostanze assorbenti; con l'ozono si ha assorbimento a lunghezze d'onda inferiori a 0,3  $\mu\text{m}$ , col vapor d'acqua assorbimento in parecchie bande strette fra 0,7 e 1,9  $\mu\text{m}$  e in due bande ampie a circa 2,0  $\mu\text{m}$ , come già osservato introducendo l'irraggiamento solare.

In media circa il 43 % della radiazione solare che entra nell'atmosfera raggiunge la superficie della Terra. In giorni sereni questo valore può superare l'80 %; in giorni nuvolosi può essere minore del 30%. In ogni caso la radiazione che raggiunge la superficie della Terra è in parte riflessa e in parte assorbita. La maggior parte delle aree continentali ha un'albedo (coefficiente di riflessione) del 5÷20 %, col valore medio del 12%. Quindi il terreno assorbe circa l'88 % della radiazione incidente.

Un'eccezione importante è la superficie di neve fresca con un albedo di circa l'80% (assorbimento 20%). L'acqua ha un'albedo media del 20%, con valori superiori all'80% quando il Sole è presso l'orizzonte e inferiori al 2% quando il Sole è sopra i 50°.

La terra a sua volta irraggia energia con lunghezze d'onda nell'infrarosso. L'assorbimento da parte dell'atmosfera di queste radiazioni terrestri è principalmente dovuto all'acqua allo stato di vapore e liquida (particelle di circa 3  $\mu\text{m}$  di diametro) e dalla  $\text{CO}_2$  (13÷18  $\mu\text{m}$ ). Queste sostanze a loro volta irraggiano, trasferendo energia non solamente verso l'alto dello spazio ma anche verso il basso, restituendone alla Terra una parte. G. C. Simpson è riuscito a stimare come la radiazione netta varia entro ampi limiti sulla Terra. Le sue carte per gennaio e luglio sono rappresentate nelle figure seguenti.

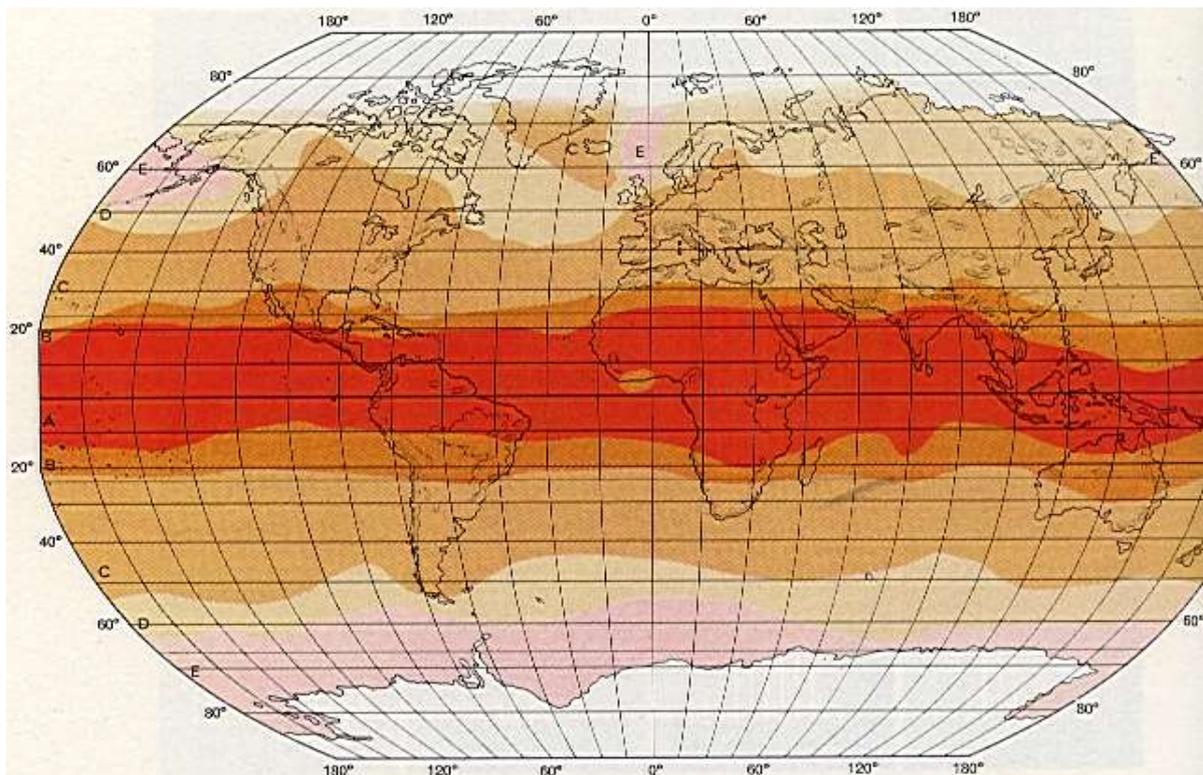


Figura 17: Guadagni solari netti sulla Terra secondo Simpson.

Gli aspetti più significativi di queste carte sono che anche d'estate le aree di massimo guadagno di radiazione netta stanno fra l'equatore e 40° (usualmente a meno di 30°) e si trovano sui continenti (dentro o adiacenti alle regioni di aria secca) e che le grandi perdite nette sono alle alte latitudini sopra gli oceani.

### 2.1.2 INFLUENZE DELLE SUPERFICI DI TERRA E DI MARE.

Il significato climatico della distribuzione delle terre e dei mari sta nel contrasto fra questi due maggiori tipi di superficie nei riguardi del riscaldamento e del raffreddamento. Eccettuate le regioni coperte di neve. O le masse d'acqua poste in mezzo a terre, le terre sono riscaldate a più alte temperature che i mari, sia durante il giorno sia durante l'estate.

Viceversa di notte e durante l'inverno le terre si raffreddano a più basse temperature che non i mari. Come risultato diretto le ampiezze di variazione delle temperature diurna e annua sono più grandi sopra la terra che sul mare.

### 2.1.3 INFLUENZA DELLE MASSE OCEANICHE.

Gli oceani esercitano un notevole effetto moderatore sul clima. La spiegazione che abitualmente se ne dà è che l'acqua marina ha un calore specifico maggiore di quello della superficie dei continenti; questo fattore è però solo uno dei molti che, in maggiore o minore misura, intervengono a modificare il riscaldamento degli strati dell'atmosfera presso la superficie terrestre. Tali fattori sono:

- 1) la maggior parte della energia solare assorbita alla superficie del mare viene utilizzata nell'evaporazione dell'acqua di mare; una frazione molto minore (in media il 10%) viene utilizzata nel riscaldare direttamente l'atmosfera con la superficie del mare;
- 2) una gran quantità del calore solare assorbito dalla superficie del mare durante l'estate alle medie latitudini viene immagazzinata dagli oceani per essere ceduta all'aria durante le stagioni più fredde, quando c'è scarsità di energia solare. Per lo stesso meccanismo, molta energia alle basse latitudini viene trasportata dalle correnti oceaniche e ceduta all'atmosfera a latitudini maggiori dove l'energia solare ricevuta è pure relativamente scarsa;
- 3) l'energia assorbita alla superficie del mare viene diffusa in uno strato di notevole spessore, mentre l'energia assorbita dalla superficie del suolo è limitata al riscaldamento di uno strato superficiale poco profondo; né le zone superficiali molto riscaldate, né quelle molto fredde restano inalterate per lungo tempo nell'oceano aperto;
- 4) l'energia di più corta lunghezza d'onda che raggiunge la superficie del mare viene trasmessa a profondità notevoli a causa della trasparenza dell'acqua di mare a tali radiazioni (ma ciò è di importanza secondaria nel bilancio energetico degli oceani);
- 5) la maggiore albedo delle aree oceaniche fa sì che vi sia meno energia solare assorbita dal mare che dalla terra; l'elevata albedo risulta dalla maggiore nebulosità media, più che dal grande potere riflettente della superficie del mare.

### 2.1.4 CONTINENTALITÀ DEL CLIMA

Nelle aree più lontane dal mare, l'influenza moderatrice di quest'ultimo non può far sentire i propri effetti: si parla allora di *clima continentale*. Le superfici dei continenti possono riscaldarsi o raffreddarsi abbastanza rapidamente perché gli effetti termici sono limitati, come si è già visto, a uno strato superficiale poco profondo; l'aria a contatto col suolo si mette rapidamente in equilibrio termico col terreno sottostante e di conseguenza subisce fluttuazioni di temperatura di grande ampiezza, in lieve ritardo rispetto ai periodi annui e diurni di insolazione.

Poiché l'aumento dell'escursione annua della temperatura costituisce l'effetto più notevole della superficie continentale sul clima, i climatologi hanno assunto tale escursione ( $\Delta t$ ) come criterio per la misura della *continentalità*.

La formula più usata è quella proposta da **O. V. Johansson**, che definisce l'*indice di continentalità*  $K$  come:

$$K = \frac{1.6\Delta T}{\sin \varphi} - 14$$

$\Delta T$  è l'escursione annua della temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $\varphi$  è la latitudine.  $K$ , in percentuale, per un clima puramente oceanico ha il valore dello 0% e per un clima puramente continentale il valore del 100%.

In Europa si definisce il clima **dolce** se la differenza fra temperatura media del mese più caldo e quella del mese più freddo è inferiore a 10 °C; **temperato** se la suddetta differenza è compresa fra 10 e 20 °C; **continentale o rigido** se la differenza è superiore a 20 °C.

### 2.1.5 INFLUENZA DELLE CORRENTI ATMOSFERICHE E OCEANICHE.

La distribuzione delle terre e dei mari e quella della radiazione sono due dei tre maggiori fattori che determinano i lineamenti più importanti della distribuzione della temperatura. Il terzo fattore è la circolazione dell'atmosfera e degli oceani. In media entrambe le circolazioni trasportano energia dalle più basse alle più alte latitudini.

L'85% del trasporto è dovuto alla circolazione dell'atmosfera che trasporta energia in forma sia di calore sensibile che di calore latente (come vapor d'acqua che condensando darà calore).

Le regioni delle alte latitudini che hanno perdita netta delle radiazioni sono in gran parte alimentate dall'energia derivata dal calore latente. L'altro 15% del trasporto si ha con la circolazione delle acque oceaniche, con acqua calda che va verso i poli lungo le rive occidentali degli oceani e con acqua fredda che va verso l'equatore lungo le rive orientali.

Questa circolazione è riflessa nelle tavole delle temperature media di gennaio e di luglio (vedi figure seguenti) dove appare chiara, ad esempio, la deformazione delle isoterme nell'area Islanda – Spitzbergen - Norvegia.

Altre notevoli caratteristiche di queste carte sono le posizioni dei *poli del freddo* nell'interno delle grandi masse continentali e lo spostamento a nord dell'equatore della zona di massimo caldo, spostamento associato con la grande massa continentale dell'Africa alle latitudini di 10°÷30° N.

### 2.1.6 RELAZIONI CON LA PRESSIONE ATMOSFERICA E I VENTI.

La distribuzione della temperatura è legata alla distribuzione della pressione al suolo e del vento (vedi figure seguenti).

Queste relazioni non sono né semplici né dirette, ma c'è tendenza a una relazione inversa tra la temperatura media e la pressione superficiale media sopra i continenti, con le aree calde desertiche sovrastate da minimi termici e le aree polari fredde sovrastate da massimi termici.

Le aree di bassa e alta pressione media sopra gli oceani sono completamente differenti.

Nel primo caso esse rappresentano la somma di vari minimi di pressione in movimento (cicloni extratropicali), strutture particolarmente comuni sulle Aleutine, sull'Islanda e sulle acque settentrionali dell'Antartico.

Nel secondo caso esse rappresentano la somma delle celle di alta pressione subtropicale che sono aspetti persistenti della circolazione generale sopra gli oceani subtropicali, anche se variano continuamente in dimensione, intensità e posizione.

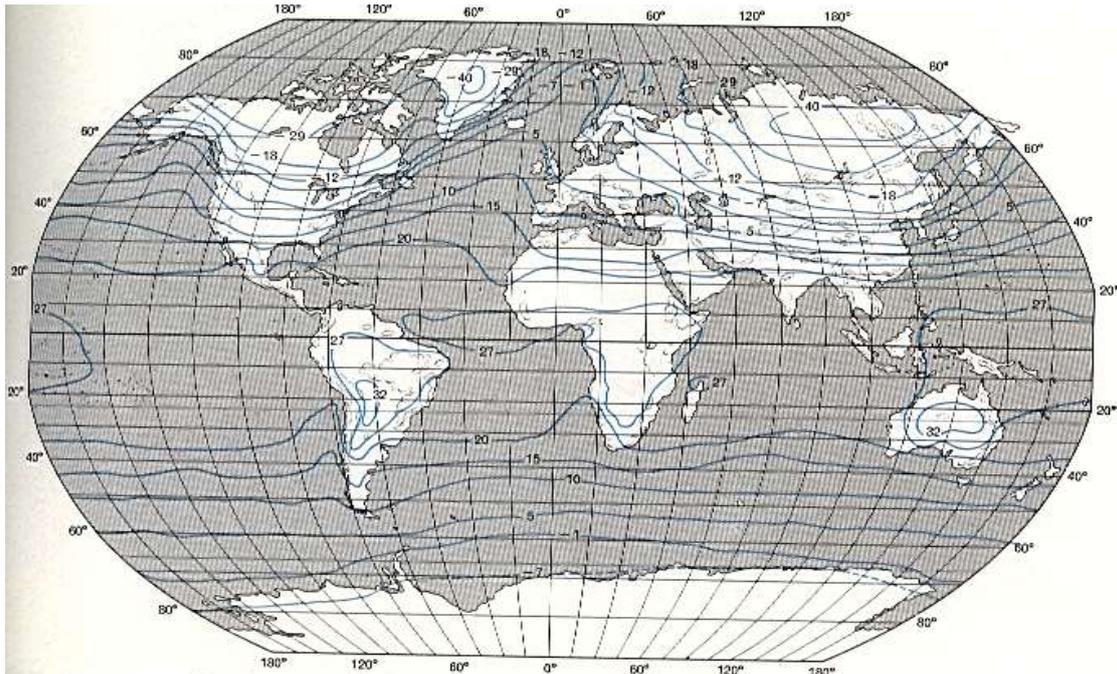


Figura 18: Temperature medie al livello del mare nel mese di gennaio.

La distribuzione media della pressione determina i percorsi dei venti dominanti. I venti più costanti sono gli alisei, che spirano dalla zona delle alte pressioni oceaniche subtropicali verso l'equatore, e i monsoni, nell'area asiatico - australiana.

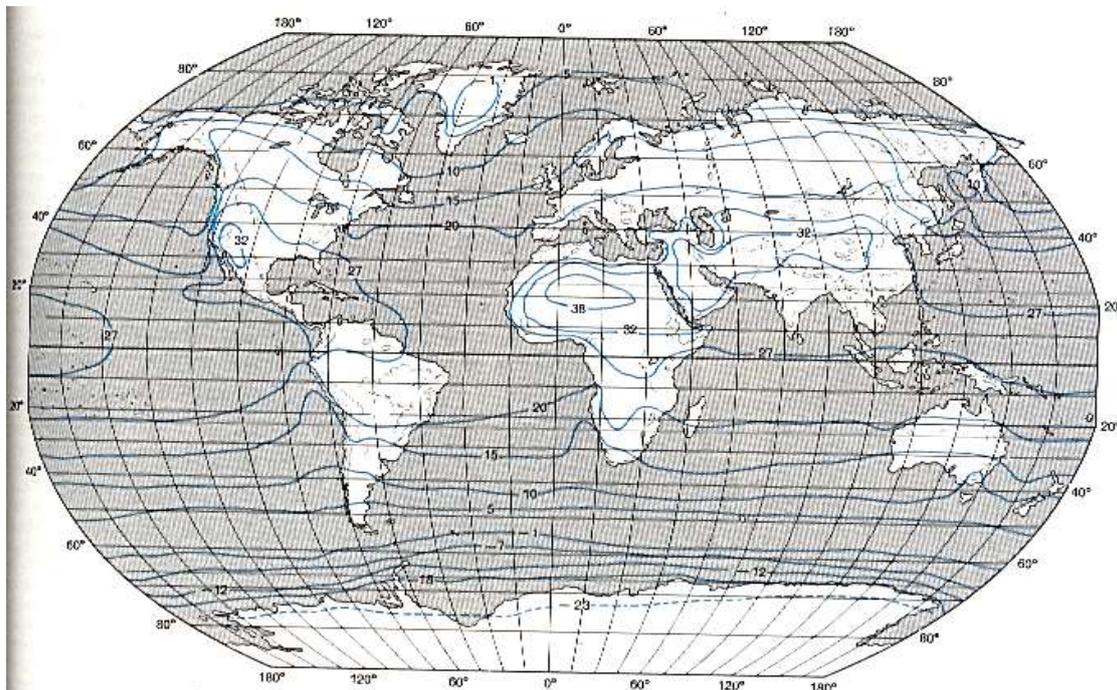


Figura 19: Temperature medie a livello del mare nel mese di luglio.

Nella circolazione dei monsoni i venti soffiano verso il mare in Asia e verso il continente in Australia durante l'inverno dell'emisfero settentrionale, con un rovesciamento della circolazione durante l'estate.

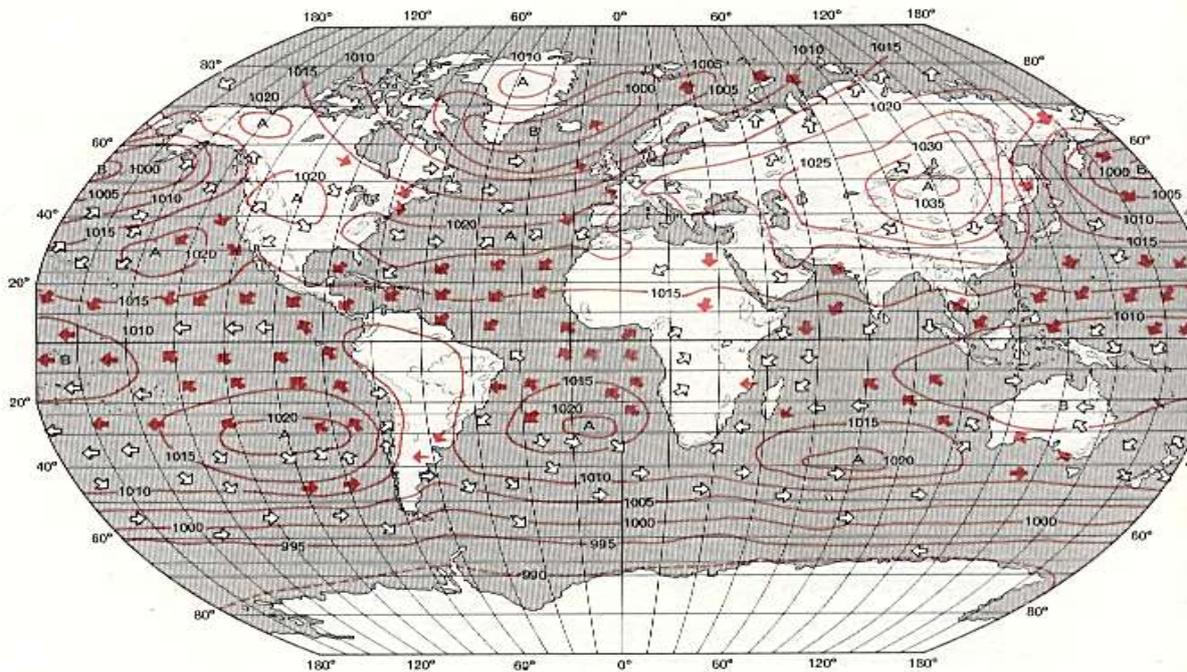


Figura 20: Pressione atmosferica media al suolo nel mese di gennaio.

Altre importanti regioni di flusso di vento sono quelle dei venti di ovest che spirano verso i poli dalle alte pressioni oceaniche e quella dei venti di est polari sull'Antartico e la Groenlandia. Né i venti di ovest né i venti di est polari sono costanti come gli alisei o i monsoni, perché entrambi sono su aree frequentemente percorse da cicloni che possono portare venti da ogni direzione.

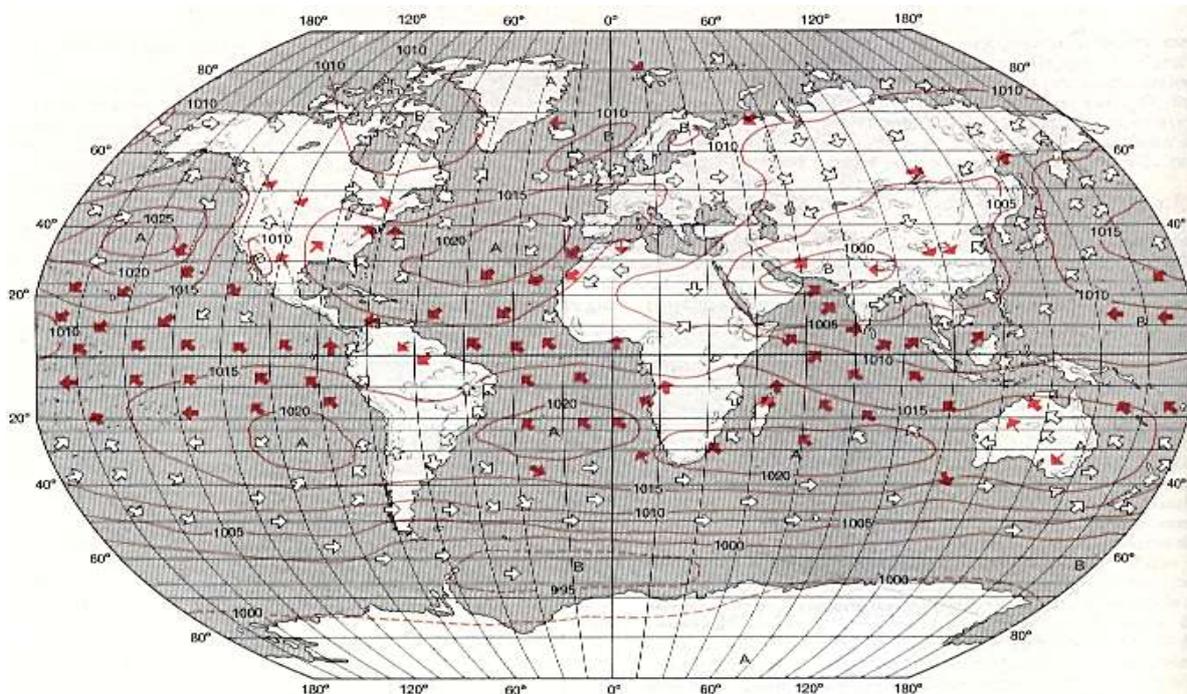


Figura 21: Pressione atmosferica media al suolo nel mese di luglio.

### 2.1.7 INFLUENZE MARINE SULL'ATMOSFERA.

L'aria che percorre lunghe distanze attraverso gli oceani acquista grandi quantità di vapore d'acqua a causa dell'evaporazione dalla superficie dell'oceano.

Poiché l'evaporazione è massima dove aria fredda e secca si muove sopra acqua oceanica più calda, il più rapido passaggio di umidità dal mare all'aria si ha sulla riva occidentale degli oceani dell'emisfero settentrionale alle medie latitudini durante l'inverno boreale e sopra le acque dell'Antartico durante l'inverno australe. Per esempio a 35° N nell'Atlantico occidentale una media di circa 25000 kJ/m<sup>2</sup> giornaliera di energia termica è spesa nell'evaporazione dell'acqua del mare, mentre alle latitudini comprese fra 0° e 20° N nell'Atlantico orientale il valore non supera le 8500 kJ/m<sup>2</sup> in nessuna stagione.

A parte le variazioni locali, gli oceani danno ovunque un netto contributo di acqua all'aria a meno che non siano coperti di ghiaccio. In seguito questa umidità è portata sulle terre dalle masse di aria marittima e ivi essa dà luogo a precipitazioni come pioggia, neve, grandine, rugiada o brina. Dopo di che l'acqua ritorna agli oceani attraverso i fiumi oppure come lame d'acqua lungo i margini delle terre, come acqua sotterranea o nelle masse in movimento di aria continentale secca che acquistano acqua dal suolo attraverso l'evaporazione e la traspirazione.

### 2.1.8 TIPI DI PRECIPITAZIONE CONTINENTALE.

Precipitazioni medie annue apprezzabili si hanno solamente se l'aria umida è forzata a salire e ciò avviene in gran parte per convezione, per sollevamento orografico (sollevamento forzato di aria su pendio, come avviene sui fianchi di una montagna) o attraverso convergenza e ascesa forzata di aria dentro un vortice, particolarmente dentro un ciclone extratropicale o tropicale. Quindi l'andamento generale delle precipitazioni può essere considerato in termini di frequenza relativa della presenza di aria marittima umida e di frequenza dei fenomeni che costringono tale aria a salire ad altezze apprezzabili.

Anche la distribuzione verticale della temperatura e dell'umidità è importante, perché la struttura può essere stabile e così resistere al movimento verticale o può essere condizionalmente instabile, così che quando il sollevamento forzato ha prodotto condensazione la liberazione del calore latente provoca la salita dell'aria a sempre più grande altezza.

La precipitazione annua è molto alta sulle coste occidentali dei continenti alle latitudini medie e alte, nell'area dei monsoni e nelle aree equatoriali. Sulle coste occidentali dei continenti gli alti valori sono associati con precipitazioni cicloniche frequenti e prolungate e con il sollevamento orografico dell'aria marittima. In queste aree la maggior parte delle precipitazioni si verifica nel periodo invernale, quando le burrasche cicloniche sono più comuni. Al contrario, le aree monsoniche hanno il loro massimo di pioggia durante l'estate, con un afflusso di aria molto umida condizionalmente instabile. Qui come nelle aree umide equatoriali i meccanismi della precipitazione sono convezione, sollevamento orografico e convergenza nei sistemi vorticosi minori. Tuttavia nelle aree equatoriali la precipitazione è bene distribuita lungo tutto l'anno.

Le aree estremamente secche sono caratterizzate da invasioni non frequenti di aria instabile umida e da una attività ciclonica relativamente ridotta. Queste aree secche sono: i deserti delle coste occidentali dei continenti, come il Sahara; i bacini desertici riparati dall'aria marittima fredda da alte montagne, come il bacino del Tarim; le terre polari. La più ampia variazione nella precipitazione annua da un anno all'altro si presenta nelle aree monsoniche più umide e nelle regioni equatoriali. In queste regioni non è raro che durante un periodo di 20 anni si passi da un minimo annuo di 1500÷2000 mm a un massimo di 5000÷7500 mm. In termini di percentuale la variabilità massima è nelle aree più secche i deserti e le regioni polari. Qui il minimo è inferiore a 50 mm in parecchie località e il massimo raggiunge i 400 mm negli anni più umidi. La situazione idrografica di una località non è soltanto funzione della precipitazione totale annua e della sua variabilità ma anche e in maggior misura della distribuzione della precipitazione lungo l'anno.

## 2.1.9 REGIONI CLIMATICHE

Per la definizione delle regioni climatiche sono statati immaginati gli schemi più diversi. Questi schemi costituiscono due classi: quelli che cercano di mettere in evidenza l'altro aspetto delle relazioni e dei processi entro l'atmosfera e quelli basati sulle relazioni tra le variazioni areali nelle condizioni climatiche e le corrispondenti nei fenomeni atmosferici.

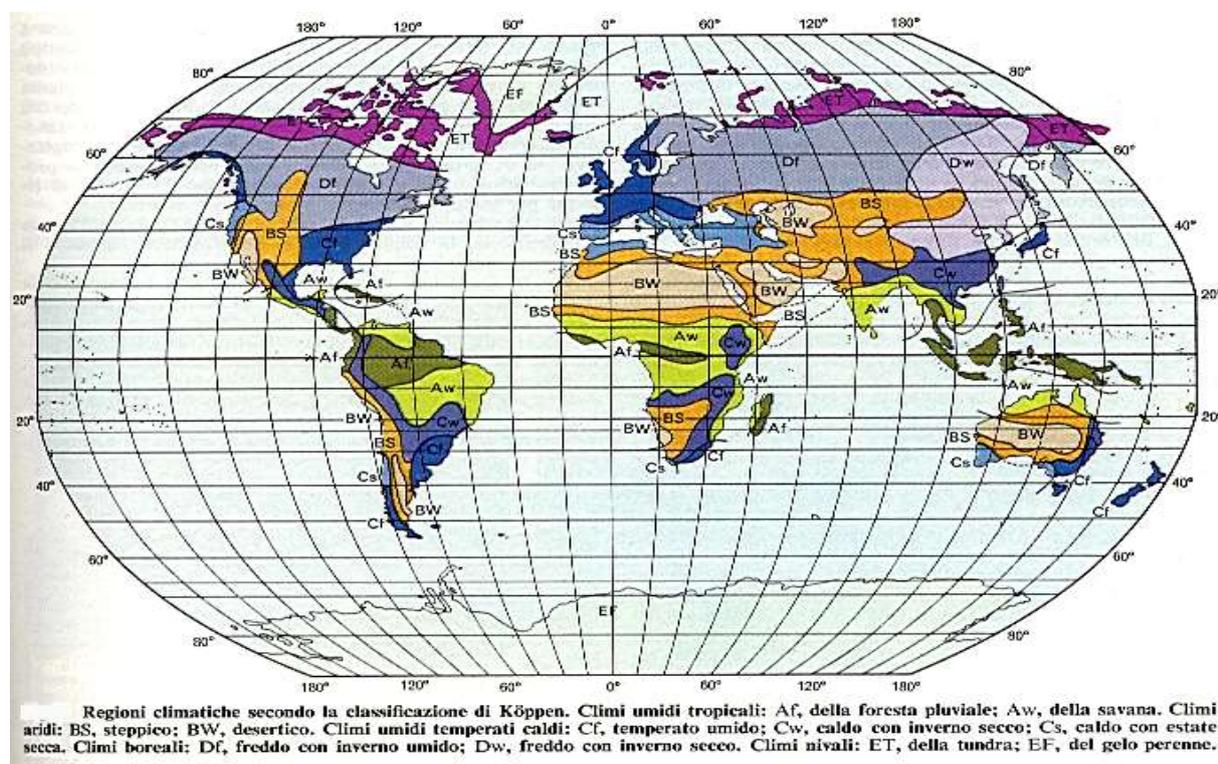


Figura 22: Distribuzione delle regioni climatiche secondo Köppen.

La prima classe di schemi è rappresentata dalla figura 56 che mostra l'entità della radiazione netta sulle diverse regioni della Terra. Sono distinte le regioni nelle quali il bilancio mensile di radiazione è sempre positivo (in media), sempre negativo, mai fortemente positivo, mai fortemente negativo.

La seconda classe di schemi è rappresentata dalla distribuzione di Köppen che mostra le maggiori zone climatiche della Terra. Inizialmente Köppen si proponeva di mettere in evidenza la coincidenza generale tra la distribuzione della vegetazione naturale e le condizioni climatiche, ma poi preferì una classificazione indipendente dalle specie vegetali. Essa serve anche, tuttavia, per scopi di descrizione generale, in termini di definizioni quantitative delle precipitazioni e delle condizioni di temperatura. Questa classificazione è stata in seguito un po' rimaneggiata ma le classi sono rimaste invariate. Tali classi sono cinque (climi **umidi tropicali, aridi, umidi temperati caldi, boreali e nivali**).

Esse vengono indicate, nell'ordine, con le lettere A, B, C, D, E; l'aggiunta di una seconda lettera esprime l'ulteriore suddivisione in sottoclassi. Il significato della seconda lettera è il seguente: s = tempo secco principalmente in estate, w = in inverno; f = pioggia in tutti i mesi; S = steppa; W = deserto; T = tundra; F = gelo. La notazione Cf; per esempio, si legge: clima umido temperato caldo con pioggia in tutti i mesi. È possibile e interessante distinguere regioni climatiche minori, non su scala mondiale, ma entro aree molto più piccole. Se tali aree sono definite sulle terre emerse, il fattore topografico diventa molto importante, specialmente quando l'area è dell'ordine di pochi chilometri quadrati o ancora inferiore.

### 2.1.10 CAMBIAMENTI CLIMATICI

Numerose testimonianze geologiche e paleontologiche mostrano che il clima ha subito grandi fluttuazioni durante la Storia della Terra. Tuttavia nella presente trattazione ci si limita alla discussione di una dimostrazione meteorologica delle fluttuazioni climatiche del recente periodo storico. Bisogna sottolineare che per lo più le testimonianze meteorologiche di cambiamenti climatici sono insignificanti in quantità e controverse per la qualità. Prima di tutto l'intervallo di tempo coperto anche dalle più estese osservazioni è breve rispetto agli intervalli di tempo delle maggiori fluttuazioni climatiche. Inoltre il meteorologo che intenda raccogliere dati per l'analisi di tali fluttuazioni ha a che fare con metodi diversi per i diversi Paesi e con materiale talvolta di dubbia qualità; le grandi variazioni mostrate dalle registrazioni possono essere il risultato erroneo di una varietà di fattori umani e di osservazioni non dipendenti affatto da cause naturali.

Tuttavia i climatologi accettano come vere alcune delle testimonianze meteorologiche dei cambiamenti climatici durante il periodo storico; per esempio, le numerose prove di un riscaldamento dell'aria su tutto il globo durante gli ultimi 70÷95 anni. Questo riscaldamento è stato particolarmente significativo sull'Artico nei mesi invernali, superando 3 °C nella parte occidentale della Groenlandia e 2°C sopra una gran parte dell'area adiacente. Ci sono anche testimonianze di alcuni andamenti significativi delle precipitazioni a partire dal 1885, ma questi appaiono irregolari regionalmente e meno appariscenti del caso della temperatura. Precipitazioni al disotto della media pare siano cadute sopra la maggior parte degli USA, sulla parte settentrionale dell'America meridionale, sulla Penisola Malese e sull'Australia. Precipitazioni al disopra della media pare siano cadute sopra l'Artico, la zona temperata settentrionale, il Messico, il Rio de la Plata, l'India meridionale e l'Asia sud orientale.

Anche i percorsi medi dei venti mostrano simili fluttuazioni ed esse sembrano accordarsi coi cambiamenti della distribuzione della pressione media sulla Terra. Difatti i cambiamenti della pressione al livello del mare, della temperatura e delle precipitazioni alle medie e alte latitudini sono sorprendentemente costanti. Se si ammette che non esiste un meccanismo interno dell'atmosfera che renda conto dei cambiamenti progressivi o ciclici, le cause dei cambiamenti devono essere attribuite a fattori extraterrestri o a cambiamenti di altre influenze terrestri. Le teorie più plausibili attribuiscono le cause dei cambiamenti climatici a una o più delle seguenti:

- 1) variazioni nella quantità o nel carattere della radiazione solare;
- 2) variazioni nella trasmissione di energia attraverso l'atmosfera dovute a cambiamenti della sua composizione per esempio, del suo contenuto di CO<sub>2</sub> o di ozono);
- 3) variazioni nella trasparenza dell'atmosfera dovute a cambiamenti della torbidità causati dalla presenza di polveri vulcaniche e impurità meteoriche;
- 4) variazioni nella quantità di calore trasportato dalle correnti oceaniche dovute a cambiamenti della circolazione oceanica;
- 5) variazioni nella natura della superficie terrestre (distribuzione delle terre e dei mari, orografia, estensione della copertura di neve e altri fattori come ghiacci marini, copertura di vegetazione), variazioni nella inclinazione dell'asse di rotazione terrestre, variazioni negli elementi dell'orbita o nelle forze planetarie di marea.

L'ultimo gruppo di cause può essere trascurato per quanto riguarda cambiamenti climatici recenti (storici), eccetto forse in senso locale. Ci sono alcune testimonianze, tuttavia, dalle quali risulta che i primi quattro gruppi di fattori hanno avuto qualche connessione con le recenti fluttuazioni climatiche. H. Wexler afferma che variazioni climatiche piuttosto significative possono essersi verificate in connessione con le variazioni nell'attività delle macchie solari. Lo ha provato confrontando i dati climatici medi per periodi di massimo e minimo delle macchie solari. Riguardo

alle cause 2) e 3) Wexler ha accumulato prove tendenti a mostrare che il riscaldamento dell'aria osservato per tutta la Terra durante l'ultimo mezzo secolo può essere attribuito a due variazioni secolari (non periodiche): l'aumento del contenuto di CO<sub>2</sub> e la diminuzione della torbidità atmosferica. Il primo è probabilmente dovuto all'aumento dei residui della combustione industriale del carbone fossile. La seconda è considerata da parecchi come il risultato di una diminuita attività vulcanica di tipo esplosivo durante gli ultimi 70 anni. Queste variazioni secolari sono, del resto, sovrapposte agli effetti della variazione ciclica della radiazione solare associata con il ciclo delle macchie solari.

Rispetto ai cambiamenti climatici derivanti dalle variazioni nella circolazione oceanica, alcune prove teoriche e altre recenti empiriche indicano che la quantità di calore trasportato alle alte latitudini dalle correnti oceaniche può offrire un carattere periodico (forse dell'ordine di un decennio). Tali considerazioni sarebbero importanti se per mezzo di esse noi potessimo render conto delle fluttuazioni di periodo relativamente breve delle temperature superficiali dei mari polari. M. Ewing (1958) ha considerato gli effetti di tale meccanismo tentando di rendere conto delle alternanze dei climi glaciali con gli interglaciali, che si verificarono durante il periodo pleistocenico.

## 2.2 L'IRRADIAZIONE SOLARE DIRETTA

Se si considera la Terra come una grande sfera nello spazio in movimento attorno al sole e si applicano le regole della geografia astronomica allora si può calcolare con grande precisione l'irraggiamento solare<sup>11</sup> che risulta dato da:

$$I_o = I_{cs} r \cos \theta \quad [44]$$

ove si ha:

- $I_{cs}$  costante solare pari a **1353 W/m<sup>2</sup>**;
- $R$  correzione per variazione della distanza terra-sole;
- $\cos \theta$  angolo di inclinazione rispetto alla normale alla superficie terrestre.

La correzione per distanza terra-sole è data da:

$$r = 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \quad [45]$$

essendo  $n$  il giorno giuliano<sup>12</sup>. Si definisce *angolo solare*  $\omega$  l'angolo corrispondente allo spostamento relativo del sole nelle 24 ore per cui si ha  $\omega = 15^\circ/\text{ora}$ . L'irraggiamento extraterrestre varia da un minimo di 1325 W/m<sup>2</sup> a 1415 W/m<sup>2</sup> durante l'anno. L'intensità giornaliera extra-atmosferica della irradiazione solare è data dall'integrale della [44] estesa dall'alba<sup>13</sup> al tramonto e quindi da:

$$H_o = \int_{-\omega_s}^{\omega_s} I_o d \left( \frac{24}{2\pi} \omega \right) \quad [46]$$

<sup>11</sup> L'irraggiamento solare è dato dall'energia che incide nell'unità di tempo sull'unità di superficie. Le unità di misura sono [W/m<sup>2</sup>].

<sup>12</sup> Il giorno giuliano è dato dal numero progressivo del giorno a partire dal 1° gennaio, pari a  $n=1$ , fino al 31 dicembre pari a  $n=365$ . In questo modo i giorni dell'anno seguono una numerazione progressiva da 1 a 365.

<sup>13</sup> L'alba e il tramonto sono detti *sun rise* e *sun set* e indicati con  $\omega_s$  nella letteratura internazionale.

In geografia astronomica, nota la latitudine  $\varphi$  di un sito, si definisce *declinazione solare* l'angolo rispetto al piano orizzontale corrispondente all'altezza massima del sole e si indica con  $\delta$  ed è dato, indicando con  $n$  il giorno giuliano, dalla relazione:

$$\delta = 23.45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad [46']$$

il cui andamento è dato nella seguente figura 56 bis.

Pertanto si dimostra che la radiazione media giornaliera extra - atmosferica è data dalla relazione:

$$H_o = \frac{24}{2\pi} rI_{cs} \int_{-\omega_s}^{\omega_s} (\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta) d\omega = \frac{24}{2\pi} rI_{cs} \left( \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \varphi \sin \delta \right) \quad [46'']$$

Per una superficie generica è necessario calcolare l'angolo di inclinazione solare  $\theta$  che, mediante considerazioni di trigonometria sferica, dati la latitudine  $\varphi$  la declinazione  $\delta$  e l'angolo solare  $\omega$ , è dato dalla relazione:

$$\cos \theta = \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \delta \cos \omega + \sin \beta \sin \gamma \cos \delta \sin \omega + \sin \varphi \cos \beta \sin \delta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma \sin \delta \quad [47]$$

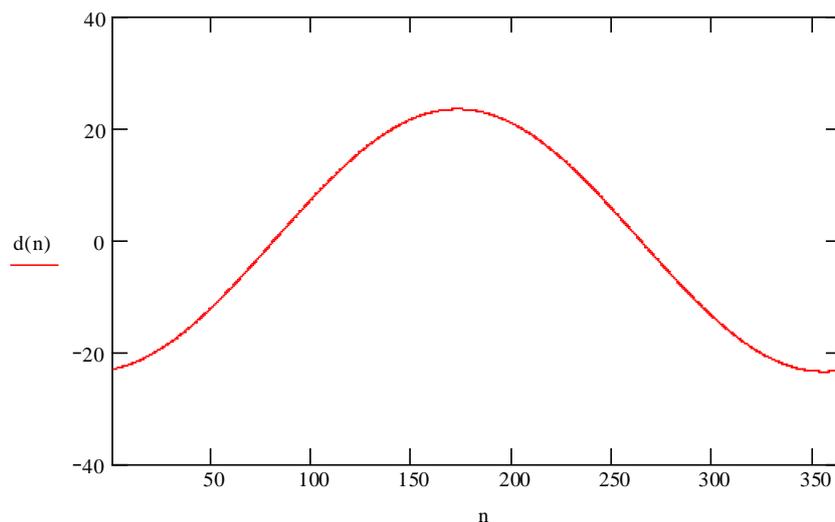


Figura 56

Figura 23

Figura 24 bis: Andamento della declinazione solare

ove si ha il seguente simbolismo, vedi figura 57:

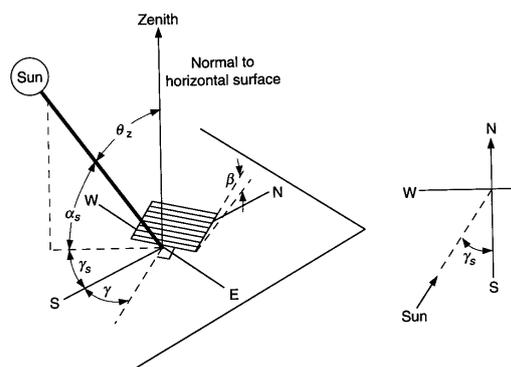


Figura 25: Angoli fondamentali per l'irradiazione solare.

- $\beta$  *angolo di inclinazione* della superficie rispetto al piano orizzontale,  $0 \leq \beta \leq 180^\circ$ ;  $\beta > 90^\circ$  significa superficie rivolta verso il basso;
- $\gamma$  *angolo azimutale* dato dalla deviazione rispetto al meridiano locale della proiezione sul piano orizzontale della normale alla superficie: azimut 0 significa superficie rivolta a sud, per superficie rivolta ad est si hanno valori negativi e positivi se rivolte ad ovest, pertanto è  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ ;
- $\omega$  *angolo solare*,  $15^\circ$  per ogni ora di spostamento apparente del sole verso est o verso ovest;
- $\delta$  *angolo di declinazione* dato dalla posizione del sole a mezzogiorno rispetto al piano dell'equatore, considerato positivo verso nord e variabile fra  $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$ ;
- $\theta$  *angolo di incidenza* fra la radiazione solare sulla superficie e la normale alla stessa superficie;
- $\varphi$  *latitudine* cioè la posizione angolare a nord (positiva) o a sud (negativa) dell'equatore e variabile fra  $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ ;

Per alcuni casi particolari si hanno le seguenti relazioni:

Superficie orizzontale ( $\beta=0$ ):

$$\cos \vartheta_h = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta$$

Superficie verticale rivolta verso l'equatore ( $\beta=90^\circ$ ,  $\gamma=0$ ):

$$\cos \vartheta_{vs} = \sin \varphi \cos \delta \cos \omega - \cos \varphi \sin \delta$$

Superficie rivolta a sud con inclinazione qualunque ( $\gamma=0$ ,  $\beta$  qualunque):

$$\cos \vartheta_\beta = \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta \quad [48]$$

Durata del giorno per superficie orizzontale:

$$\cos \omega_s = -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta \quad [49]$$

da cui si deriva la durata in ore pari a:

$$T_g = \frac{2}{15} \omega_s \quad [50]$$

Durata del giorno per superficie inclinata  $\beta$ :

$$\omega'_s = \min(\omega_s, \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi - \beta) \operatorname{tg} \delta]) \quad [51]$$

## 2.2.1 RAPPORTO FRA RADIAZIONE DIRETTA SU UNA SUPERFICIE INCLINATA RISPETTO A QUELLA SU SUPERFICIE ORIZZONTALE

L'irradiazione extra - atmosferica su una superficie orizzontale è data dalla (46') mentre quella su superficie inclinata  $\beta$  è data dalla relazione:

$$H_{o\beta} = \frac{24}{\pi} rI_{cs} \left[ \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \sin(\varphi - \beta) \sin \delta \right] \quad [52]$$

Viene definito il rapporto fra i valori medi giornalieri delle due irradiazioni:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \varphi \sin \delta} \quad [53]$$

Con  $\bar{R}_b$  si indica il valore medio mensile.

## 2.2.2 RADIAZIONE TOTALE SU UNA SUPERFICIE INCLINATA CON CIELO ISOTROPICO

Su una superficie inclinata arriva, oltre alla radiazione diretta, anche la radiazione diffusa dal cielo e quella riflessa. Ciascuna di queste due ultime componenti risulta in genere di difficile valutazione.

Possiamo, però, supporre che il cielo abbia un comportamento isotropico e pertanto queste valutazioni risultano semplificate. In particolare la radiazione riflessa non ha una formulazione unica potendo questa variare, ad esempio, per effetto di edifici o corpi riflettenti vicini alla superficie considerata.

Possiamo in genere scrivere la relazione:

$$A_c I_T = I_b R_b A_c + I_{d, isotropica} A_s F_{s-c} + \sum_i I_i \rho_i A_i F_{i-c}$$

ove il primo termine a secondo membro rappresenta la radiazione diretta sulla superficie  $A_c$ , il secondo termine la radiazione diffusa isotropica e l'ultimo termine la radiazione diffusa dalle superfici circostanti a quella considerata.

Con  $F_{s-c}$  e  $F_{i-c}$  si sono indicati i fattori di forma superficie-cielo e superficie-corpi vicini. Il modello di radiazione diffusa isotropica è stato proposto da Liu e Jordan (1963): la radiazione totale su una superficie inclinata è composta ancora da tre termini: diretta, diffusa isotropica e diffusa dal terreno.

Il termine relativo alla riflessione va calcolato caso per caso in funzione delle geometrie di scambio radiativo con le superfici vicine utilizzando i fattori di forma visti in precedenza. Per una superficie inclinata  $\beta$  il fattore di forma  $F_{s-c}$  è facilmente calcolabile e risulta pari a:

$$F_{c-s} = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad [54]$$

e, nell'ipotesi di cielo isotropo, si può anche dire che esso è anche il rapporto  $R_d$  fra la radiazione diffusa sul piano inclinato e quella sul piano orizzontale.

Il fattore di vista superficie-terreno è pari a:

$$F_{s-t} = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad [55]$$

Pertanto la radiazione totale sulla superficie inclinata risulta data dalla relazione:

$$I_T = I_b R_b + I_d R_d + I_t R_t = I_b R_b + I_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + I_t \rho_t \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad [56]$$

ove si è definito, analogamente a quanto fatto per  $R_d$  il rapporto  $R_t$  fra la radiazione diffusa dal terreno sulla superficie inclinata rispetto a quella sul piano orizzontale e pari a  $F_{s-t}$ . Ancora in analogia alle precedenti definizioni, possiamo indicare con  $R$  il rapporto fra la radiazione totale sulla superficie inclinata  $\beta$  rispetto a quella sul piano orizzontale che risulta data da:

$$R = \frac{I_b}{I} R_b + \frac{I_d}{I} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho_t \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad [57]$$

Ai fini del calcolo della radiazione totale nelle applicazioni pratiche (collettori solari, edifici solarizzati, edifici bioclimatici) occorre calcolare la radiazione solare media giornaliera mensile<sup>14</sup>  $H_T$ .

Pertanto possiamo parafrasare quanto detto sopra per il calcolo di  $I_T$  sommando i contributi della radiazione diretta e di quella diffusa dal cielo e dal terreno. Le equazioni divengono le seguenti:

$$\bar{H}_T = \bar{H} \left( 1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) R_b + \bar{H}_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \bar{H} \rho_t \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad [58]$$

e per il rapporto  $R$  medio la relazione:

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left( 1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) R_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho_t \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad [59]$$

Il rapporto fra la radiazione media diretta sulla superficie inclinata e quella su superficie orizzontale è indicato con  $\bar{R}_b = \bar{H}_{br}/\bar{H}_b$  ed è funzione della trasparenza atmosferica. Liu e Jordan propongono di calcolare questo rapporto supponendo che l'atmosfera sia assente e pertanto, per una superficie nell'emisfero boreale e rivolta verso l'equatore, cioè con  $\gamma=0^\circ$  si ha, vedi la (53):

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \varphi \sin \delta} \quad [53']$$

ove  $\omega'$  è l'angolo solare per l'alba e il tramonto calcolato nel giorno medio del mese e dato dalla relazione:

$$\omega'_s = \min \left[ \begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi - \beta) \tan \delta) \end{array} \right] \quad [60]$$

Ove con *min* si intende il minore dei due valori in parentesi quadra.

### 2.2.3 LA TRASMITTANZA O TRASPARENZA ATMOSFERICA

Il rapporto  $\bar{H}_d / \bar{H}$  può essere calcolato nota che sia la *trasparenza atmosferica* data da  $\bar{K}_T = \frac{H}{H_o}$ . La *trasparenza* dipende dal sito, dalla torbidità atmosferica (presenza di industrie, smog, ...), presenza di vapore (per nebbia, per presenza di laghi o del mare) e pertanto non si può fornire una correlazione universale per il suo calcolo. Hottel (1976) ha presentato un metodo semplificato per il calcolo della radiazione solare diretta trasmessa attraverso un'atmosfera chiara e che prende in esame l'angolo zenitale, l'altitudine e tipologie climatiche. La trasmittanza solare diretta atmosferica è definita dalla relazione:

$$\tau_b = \frac{H_d}{H_o} = a_o + a_1 e^{-k/\cos \theta_z}$$

ove le costanti  $a_o$ ,  $a_1$ ,  $k$  per atmosfera standard (con 23 km di visibilità) sono determinate dalla costanti (valide per altitudini inferiori a 2500 m s.l.m.):

<sup>14</sup> E' la radiazione media giornaliera calcolata nel mese di riferimento.

$$\begin{aligned}
 a_o^* &= 0.4237 - 0.00821(1 - A)^2 \\
 a_1^* &= 0.5055 + 0.00595(6.5 - A)^2 \\
 k^* &= 0.2711 + 0.01858(2.5 - A)^2
 \end{aligned}$$

con  $A$  altitudine (in  $km$ ) dell'osservatore.

Partendo dai valori delle costanti asteriscate si applicano opportuni fattori correttivi per tenere conto delle tipologie climatiche dati in tabella:

Tipo di Clima	$r_o = a_o / a_o^*$	$r_1 = a_1 / a_1^*$	$r_k = k / k^*$
Tropicale	0.95	0.98	1.02
Estivo di mezza latitudine	0.97	0.99	1.02
Estivo subartico	0.99	0.99	1.01
Invernale di mezza latitudine	1.03	1.01	1.00

Pertanto, la radiazione diretta per cielo pulito è data dalla relazione:

$$I_{cd} = I_o \tau_d \cos \vartheta_z$$

con  $I_o$  dato dalle [44] e [45]. Analoghe relazioni valgono per gli irraggiamenti orari o giornalieri o medi mensili. Liu e Jordan hanno presentato una teoria secondo la quale la trasparenza oraria  $k_T = I/I_o$  o giornaliera  $K_T = H/H_o$  dell'atmosfera presenta andamenti statistici simili per luoghi aventi la stessa trasparenza media mensile  $\bar{K}_T = \bar{H}/\bar{H}_o$ . Questa teoria è stata recentemente criticata per alcune incongruenze che si vengono ad avere nelle zone a clima tropicale. Pur tuttavia la teoria di Liu e Jordan trova tutt'oggi ampia diffusione e Bendt (1981) ha proposto una correlazione che risponde bene per valori delle frequenze distributive<sup>15</sup> inferiori a  $f=0.9$ . Per valori superiori si ha una sovrastima dell'indice di trasparenza. Le equazioni di Bendt sono le seguenti:

$$f(K_T) = \frac{e^{\gamma \bar{K}_T, \min} - e^{\gamma K_T}}{e^{\gamma \bar{K}_T, \min} - e^{\gamma \bar{K}_T, \max}}$$

ove il parametro  $\gamma$  è determinato dalla seguente equazione:

$$\bar{K}_T = \frac{\left(K_{T, \min} - \frac{1}{\gamma}\right) e^{\gamma K_{T, \min}} - \left(K_{T, \max} - \frac{1}{\gamma}\right) e^{\gamma K_{T, \max}}}{e^{\gamma K_{T, \min}} - e^{\gamma K_{T, \max}}}$$

Risolviendo l'equazione trascendentale per la variabile  $\gamma$  si può calcolare la funzione cumulativa  $f(K_T)$ . Herzog (1985) fornisce una via semplificata per calcolare  $\gamma$  mediante la semplice relazione:

$$\gamma = -1.498 + \frac{1.184\xi - 27.182e^{-1.5\xi}}{K_{T, \max} - K_{T, \min}}$$

<sup>15</sup> Per i vari siti si possono disegnare le frequenze dei giorni aventi vari valori di  $\bar{K}_T$  in funzione di  $\bar{K}_T$ . Queste curve sono dette *curve distributive* e, normalmente, presentano un picco (*curve modali*) o due (*curve bimodali*). Da queste curve distributive si possono disegnare (integrando) le curve *cumulative* che rappresentano la frazione  $f$  dei giorni che sono meno chiari di  $\bar{K}_T$  in funzione della stessa  $\bar{K}_T$ . Queste curve cumulative sono dette *curve* ( $\bar{K}_T, f$ ), secondo il simbolismo proposto da Whillier.

ove si è posto:

$$\xi = \frac{K_{T,\max} - K_{T,\min}}{K_{T,\max} - K_T}$$

Infine Hollands e Huget (1983) propongono la seguente correlazione per il calcolo di  $K_{T,\max}$ :

$$K_{T,\max} = 0.6313 + 0.267K_T - 11.9(\bar{K}_T - 0.75)^8$$

Gli andamenti delle trasparenze orarie e giornaliere sono simili, secondo Whillier, a quelle delle trasparenze medie mensili.

Il valore istantaneo del rapporto  $\bar{H}_d / \bar{H}$  può essere calcolato mediante molteplici relazioni fornite da numerosi ricercatori in questi ultimi decenni. Ad esempio una buona relazione è data da Collares - Pereira e Rabl:

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.99 & \text{per } K_T \leq 0.17 \\ 1.188 - 2.272K_T + 9.473K_T^2 - 21.865K_T^3 + 14.648K_T^4 & \text{per } 0.17 \leq K_T \leq 0.75 \\ -0.54K_T + 0.632 & \text{per } 0.75 \leq K_T \leq 0.80 \\ 0.2 & \text{per } K_T > 0.80 \end{cases}$$

Qualora si desideri introdurre una dipendenza stagionale (tramite l'angolo orario  $\omega_s$  per l'alba o per il tramonto) occorre usare le seguenti correlazioni:

Per  $\omega_s < 81.4^\circ$

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1.0 - 0.2727K_T + 2.4495K_T^2 - 11.9514K_T^3 + 9.3879K_T^4 & \text{per } K_T < 0.715 \\ 0.143 & \text{per } K_T \geq 0.715 \end{cases}$$

Per  $\omega_s > 81.4^\circ$

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1.0 - 0.2832K_T - 2.5557K_T^2 + 0.8448K_T^3 & \text{per } K_T < 0.715 \\ 0.175 & \text{per } K_T \geq 0.715 \end{cases}$$

Per stimare la radiazione oraria su una superficie orizzontale usando i valori medi mensili occorre utilizzare opportune correlazioni statistiche mediate su numerose osservazioni. Queste presentano il rapporto  $r_t = I/H$  fra la radiazione oraria totale e quella giornaliera totale in funzione della lunghezza del giorno e dell'ora in esame. Una correlazione molto buona, data da Collares - Pereira Rabl, è la seguente:

$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s}$$

ove i coefficienti  $a$  e  $b$  sono dati dalle relazioni:

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60)$$

Naturalmente in queste equazioni  $\omega$  è l'angolo orario in gradi per il tempo in esame (ad esempio il punto centrale dell'ora per la quale si effettua il calcolo) ed  $\omega_s$  è l'angolo orario dell'alba.

Per gli andamenti orari si può utilizzare la correlazione proposta da Orgill e Hollands:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.249k_T & \text{per } k_T < 0 \\ 1.557 - 1.884k_T & \text{per } 0.35 < k_T < 0.75 \\ 0.177 & \text{per } k_T > 0.75 \end{cases}$$

Molto utilizzata è anche la correlazione di Erbs seguente:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.09k_T & \text{per } k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 & \text{per } 0.22 < k_T \leq 0.8 \\ 0.165 & \text{per } k_T > 0.8 \end{cases}$$

In genere per valori di  $k_T > 0.8$  si hanno pochissimi dati e questi mostrano un incremento della frazione diffusa rispetto a quella diretta.

## 2.2.4 FENOMENI CHE MODIFICANO LA TRASPARENZA ATMOSFERICA

La radiazione solare extraterrestre come sopra calcolata non è tutta disponibile sulla superficie terrestre poiché l'atmosfera modifica, spesso anche fortemente, la radiazione solare attenuandola per effetto degli assorbimenti dei gas che la compongono, vedi figura 58. Viene indicata *massa d'aria* il rapporto fra la massa dell'atmosfera attraversata dalle radiazioni solari e la massa corrispondente alla posizione dello Zenith del sole (cioè perpendicolare, ove possibile). A livello del mare  $m=1$  quando il sole è allo Zenith ed  $m=2$  per un angolo di  $60^\circ$ . Per un angolo zenitale variabile fra 0 e  $70^\circ$  si ha, con buona approssimazione, la relazione:

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

L'atmosfera modifica la radiazione solare mediante due meccanismi.

### Scattering (Diffusione) atmosferico

Quando la radiazione solare attraversa l'atmosfera interagisce con le molecole dell'aria (principalmente del vapore d'acqua e gocce varie) e con la polvere determinando il fenomeno dello *scattering* cioè della diffusione dei raggi solari. Questo fenomeno dipende dal numero di particelle con le quali la radiazione viene a contatto e le dimensioni di queste particelle rispetto alla lunghezza d'onda  $\lambda$  delle stesse radiazioni. La lunghezza del cammino della radiazione attraverso le molecole dell'aria è descritto dalla *massa d'aria* mentre le particelle di aria e di polvere dipendono anche dalle condizioni locali e temporali dell'atmosfera. Il risultato dello *scattering* è la perdita di coerenza direzionale dei raggi solari che, invece, provengono da tutte le direzioni dello spazio.

### Assorbimento atmosferico

La radiazione solare subisce diversi fenomeni di assorbimento nell'attraversare l'atmosfera (vedi figura seguente) a causa delle interazioni con i gas presenti. L'assorbimento è dovuto in modo preponderante all'ozono nel campo dell'ultravioletto ( $\lambda < 0,38 \mu\text{m}$ ) e al vapore d'acqua e il biossido di carbonio nell'infrarosso ( $\lambda > 0,78 \mu\text{m}$ ). In particolare l'ozono assorbe quasi del tutto la radiazione per  $\lambda < 0,29 \mu\text{m}$

### Influenza della *massa d'aria*

Gli effetti della *massa d'aria* sono illustrati dalla figura 59. Al crescere della massa d'aria da 0 (radiazione extraterrestre) fino al valore 5 (atmosfera con bassa *turbidità*) si ha una progressiva attenuazione della radiazione al suolo. Si osservi anche il progressivo spostamento verso lunghezze d'onda maggiore, ciò che provoca il caratteristico colore rossastro all'alba e al tramonto.

## 2.2.5 RADIAZIONE EMESSA DALLA TERRA

Uno dei fattori importanti nel bilancio della radiazione terrestre è il termine relativo alla radiazione emessa dalla superficie terrestre e da alcuni costituenti atmosferici. Tale radiazione può ancora essere valutata secondo la relazione:

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

con  $\varepsilon$  e  $T$  rispettivamente l'emissività (con valori molto prossimi ad 1, ad esempio l'acqua ha  $\varepsilon=0.97$ ) e la temperatura della superficie terrestre (comprese fra  $250 \div 320$  K). La radiazione terrestre è concentrata nell'intervallo di lunghezze d'onda  $4 \div 40 \mu\text{m}$  con un valore massimo interno ai  $10 \mu\text{m}$ .

L'emissione atmosferica è dovuta essenzialmente alle molecole di  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  con range di emissione variabili fra  $5 \div 8 \mu\text{m}$  e oltre i  $13 \mu\text{m}$ .

Nell'intervallo  $8 \div 12 \mu\text{m}$  si ha una regione di trasparenza detta **finestra atmosferica**. Il calcolo dell'emissione atmosferica può essere fatto supponendo che la terra veda la volta celeste avente una temperatura equivalente  $T_{vc}$  variabile fra  $230 \div 285$  K. In pratica si può scrivere la relazione:

$$E_{atm} = \sigma T_{vc}^4$$

Secondo questo modello si può dire che lo scambio radiativo netto, in assenza di radiazione solare tra la superficie terrestre e l'atmosfera, è rappresentato dalle curve di figura 60 ove si sono rappresentate due curve: la curva **b)** è relativa ad un corpo nero alla stessa temperatura dell'atmosfera mentre la curva **a)** e la curva di emissione atmosferica nella quale risulta evidente la **finestra radiativa**.

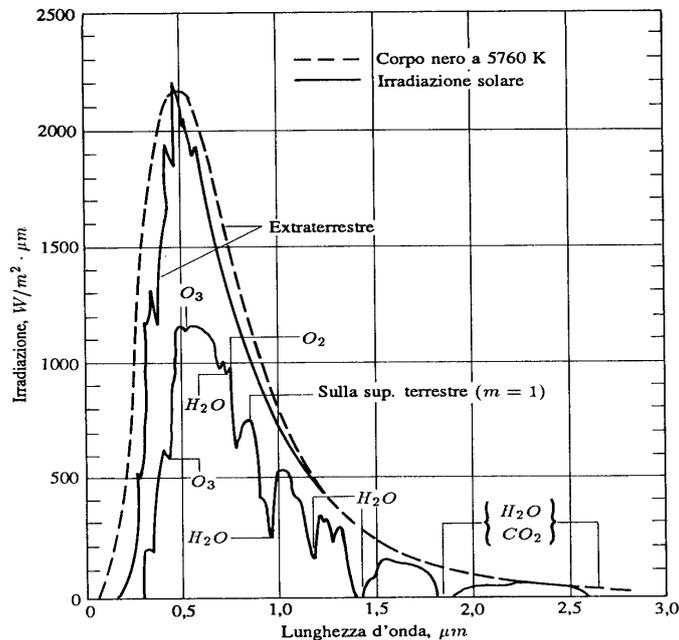


Figura 26: Radiazione solare fuori dell'atmosfera e al suolo.

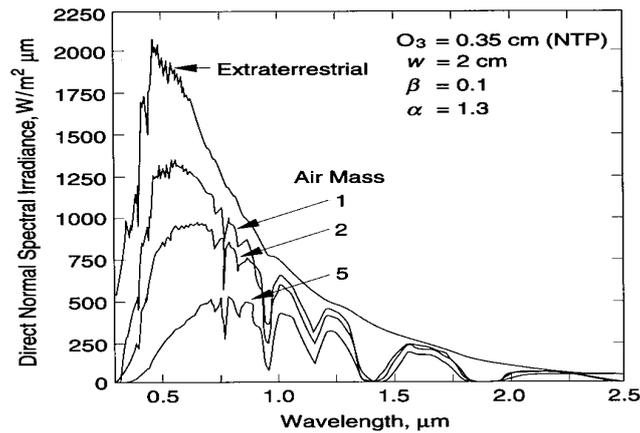


Figura 27: Effetti della massa d'aria sulla radiazione al suolo

L'area tratteggiata (differenza fra le due emissioni radiative) rappresenta la potenza radiativa scambiata fra la superficie terrestre e la volta celeste.

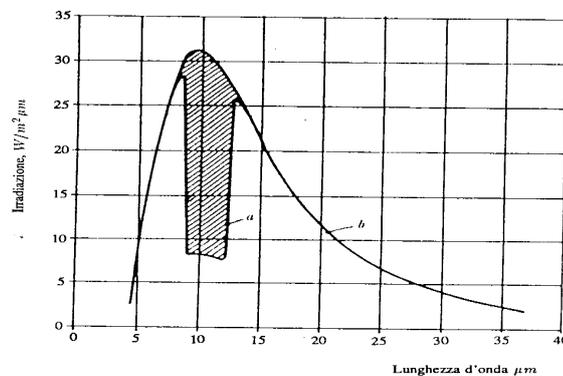


Figura 28: Emissione terrestre - atmosferica (curva a) e del corpo nero (curva b)

Un'applicazione interessante della *finestra radiativa* si ha con il *raffreddamento naturale* (anche al di sotto di 0°C) che si può ottenere ricoprendo le superfici con pellicole selettive (della famiglia dei *Mylar*) che emettano in corrispondenza della *finestra*.

## 2.2.6 LA TEMPERATURA ARIA-SOLE

Uno dei concetti più importanti per lo studio della Climatologia dell'edificio è quella della *Temperatura Aria-sole* cioè di una temperatura fittizia che tiene conto contemporaneamente sia degli scambi termici (conduttivi e convettivi) con l'aria esterna che dell'irraggiamento solare ricevuto.

E' sensazione comune avere la sensazione che la temperatura esterna sia più elevata nelle zone soleggiate rispetto a quelle in ombra. La valutazione della *temperatura aria-sole* fornisce indicazioni utili alla comprensione di questo fenomeno. Si supponga di avere la parete esterna di figura 61 soggetta ai flussi termici indicati e all'irraggiamento solare  $I$ . Il bilancio energetico complessivo sulla parete, tenendo conto dei flussi di calore per convezione e per radiazione, è dato dalla relazione:

$$\begin{aligned}
 q &= aI - \alpha_{re}(T_s - T_c) - \alpha_{ce}(T_s - T_e) + \alpha_{re}T_e - \alpha_{ce}T_e = \\
 &= aI - \underbrace{(\alpha_{ce} + \alpha_{re})}_{h_{oe}}(T_e - T_s) + \alpha_{re}(T_c - T_e) \quad [61]
 \end{aligned}$$

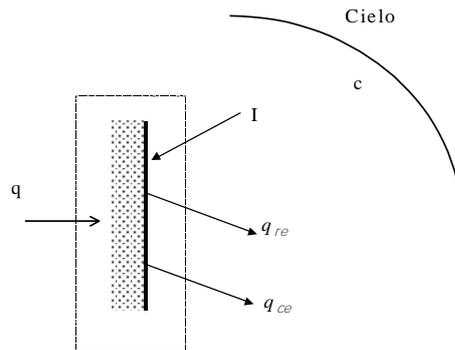


Figura 29: Scambi termici di una parete esterna soleggiata.

Si definisca ora la **Temperatura aria-sole** “quella temperatura fittizia dell’aria esterna che produrrebbe, attraverso una parete in ombra, lo stesso flusso termico che si ha nelle condizioni reali, ossia sotto l’azione simultanea della temperatura esterna e della radiazione solare”.

Per trovare  $T_{as}$  basta allora imporre che il flusso reale  $q$  sia uguale al flusso termico che si avrebbe per una parete in ombra a contatto con l’ambiente esterno a temperatura  $T_{as}$ :

$$q^* = h_{oe} (T_{as} - T_{se})$$

Ossia:

$$aI - h_{oe} (T_e - T_s) + \alpha_r (T_c - T_e) = h_{oe} (T_{as} - T_e)$$

da cui :

$$T_{as} = T_e + \frac{aI}{h_{oe}} + \frac{\alpha_r}{h_{oe}} (T_c - T_e) \quad [62]$$

Nei calcoli tecnici è lecito adottare l’espressione approssimata:

$$T_{as} = T_e + \frac{aI}{h_{oe}} \quad [63]$$

Pertanto la *temperatura aria-sole* dipende dal fattore di assorbimento dei materiali, dalle capacità di scambio convettivo e dall’irraggiamento solare. Nelle figure 62 e 63 seguenti si ha modo di osservare come  $T_{as}$  vari al variare di questi parametri. Si osservi, in figura 63, come la temperatura aria-sole sia legata all’esposizione della parete e quindi al suo irraggiamento solare.

## COEFFICIENTI DI ASSORBIMENTO DI ALCUNI MATERIALI

MATERIALE	$\alpha_c$	$\alpha_l$
Intonaco bianco	0.12	0.91
Pittura bianca	0.20	0.91
Sabbia bianca	0.45	0.84
Pittura a olio verde	0.50	0.90
Mattoni rossi	0.55	0.92
Cemento amianto bianco	0.59	0.96
Marmo	0.60	0.90
Cemento rugoso	0.60	0.97
Pittura grigia	0.75	0.95
Pittura a olio rossa	0.74	0.90
Ardesia	0.81	0.96
Asfalto da copertura	0.93	0.96

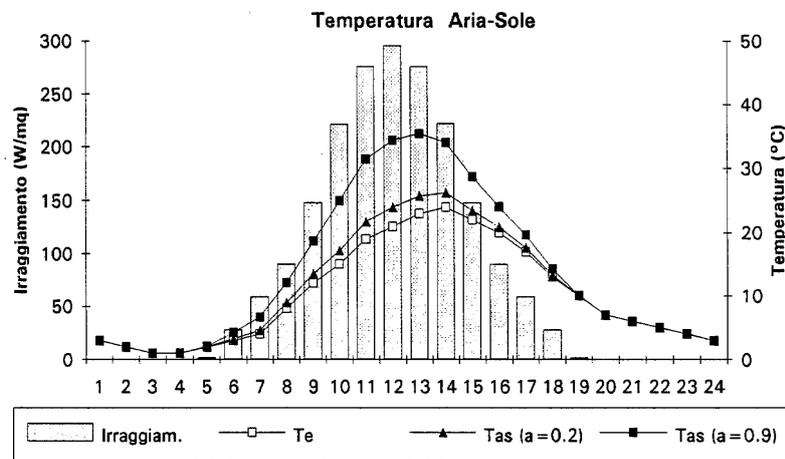


Figura 30: Andamento della temperatura aria-sole per  $a=0.2$  e  $a=0.9$  per un dato irraggiamento.

In particolare, osservando i fattori di assorbimento per lunghezze d'onda corte ( $\alpha_c$ ) nella tabella di figura 62, si intuisce il perché, nell'Architettura Mediterranea le pareti esterne degli edifici siano bianche. Si può ben dire che l'Architettura Mediterranea sia caratterizzata dal *bianco*, cioè che questa sia un'Architettura *solare*.

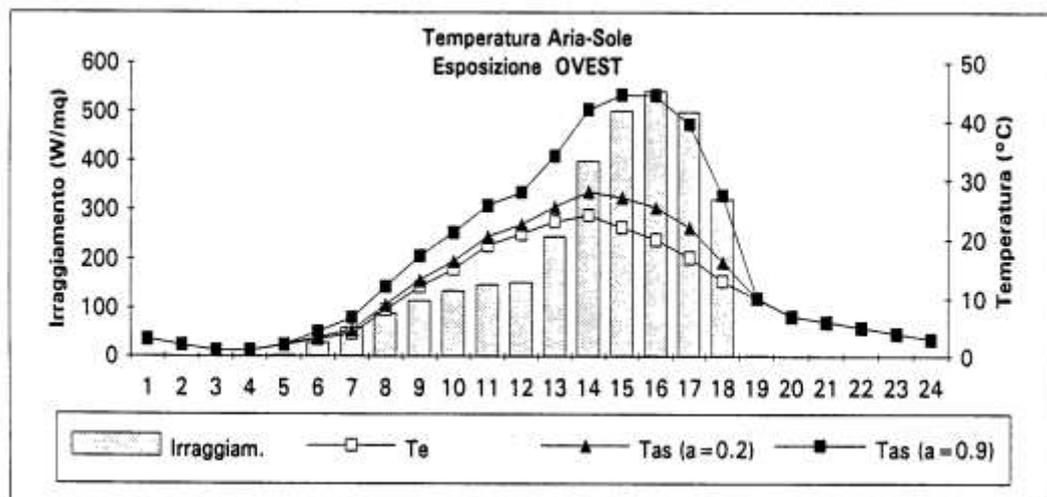
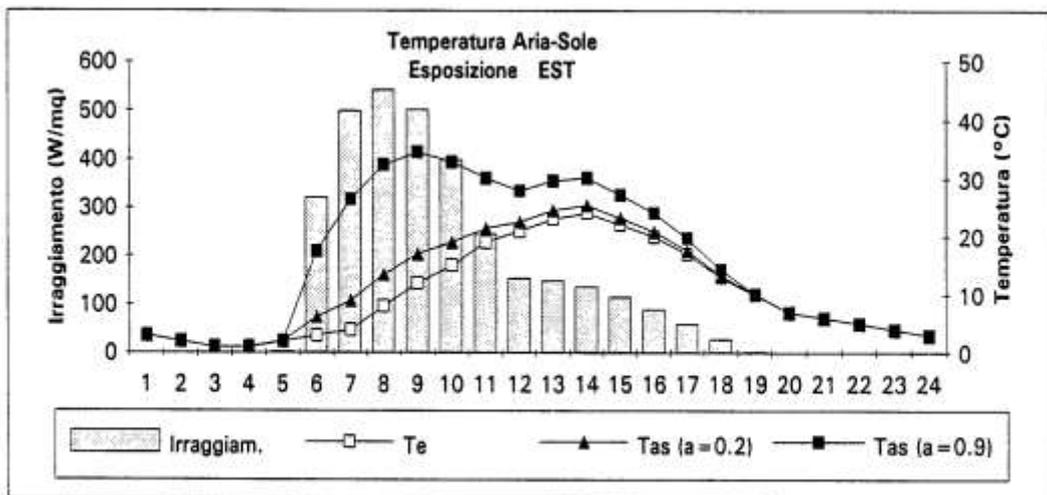
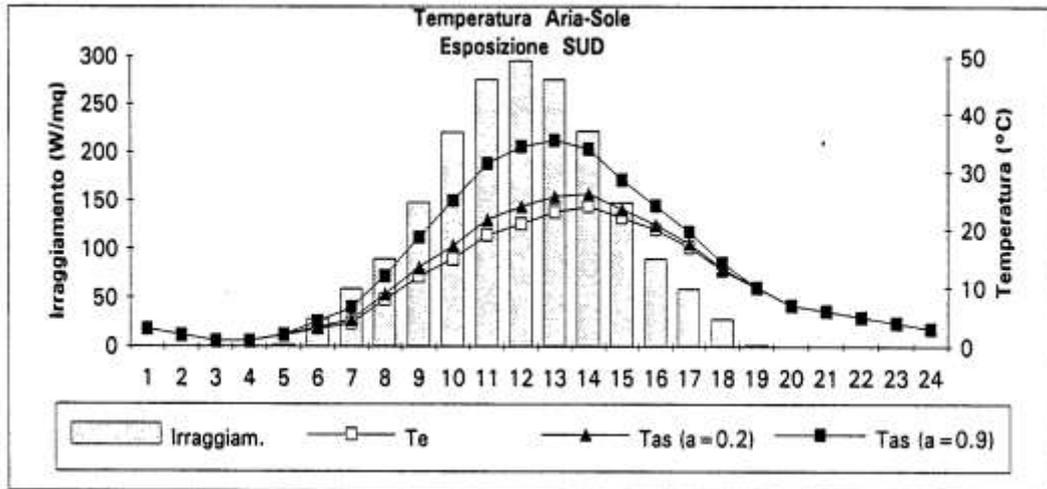


Figura 31: Temperatura aria-sole per  $a=0.2$  e  $a=0.9$  ed esposizione Sud, Est ed Ovest.

## 2.2.7 LE CARTE SOLARI – DIAGRAMMA ELIODIADROMICO

Utilizzando le relazioni geometriche viste nei paragrafi 3.2 e 3.3 si possono costruire dei diagrammi polari (dette *carte dei percorsi solari*) nei quali si possono leggere l'azimut del sole alle diverse ore del giorno e per ciascun mese dell'anno. Questi diagrammi sono spesso utilizzati per lo studio delle ombre e dei soleggiamenti superfici verticali ed orizzontali. In pratica si riporta nei diagrammi polari l'altezza solare e l'azimut per alcuni giorni del mese e per data latitudine dati dalle seguenti relazioni:

$$\sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega$$

$$\sin \gamma = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h}$$

ove  $h$  è l'altezza solare<sup>16</sup> (è anche  $h=90^\circ-\vartheta$ , cioè è il complementare dell'angolo formato dai raggi solari diretti con la normale alla superficie),  $\gamma$  è l'angolo azimutale,  $\omega$  l'angolo solare,  $\varphi$  la latitudine del luogo e  $\delta$  la declinazione solare, secondo il simbolismo già indicato nei paragrafi 3.1 e 3.2. In figura 64 sono riportate tre orbite tracciate dal sole sulla sfera celeste con riferimento ad un osservatore posto alla latitudine  $\varphi$  in corrispondenza ai solstizi<sup>17</sup> d'estate (ove si ha  $\delta=+23.5^\circ$ ) e d'inverno (ove si ha  $\delta = -23.5^\circ$ ) e agli equinozi di primavera ed autunno ( $\delta=0^\circ$ ).

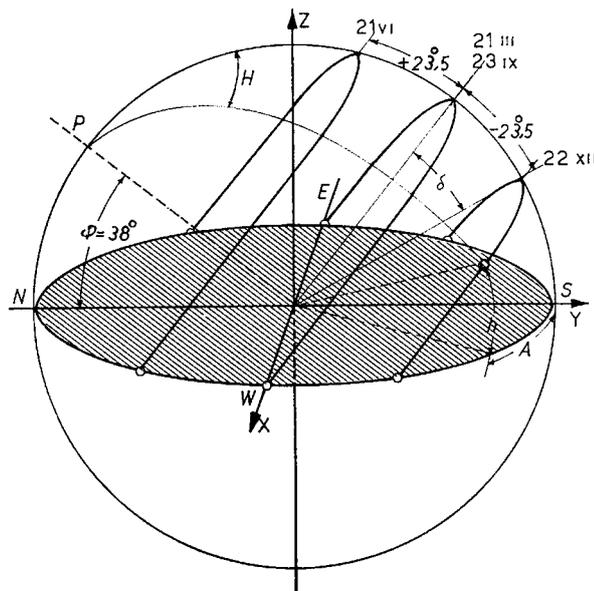


Figura 32: Percorso apparente del sole per alcuni giorni dell'anno

Per una determinata ora solare media si può individuare la posizione solare sulla *sfera celeste* mediante l'angolo orario  $\omega$  e la declinazione  $\delta$ , naturalmente per data latitudine  $\varphi$  dell'osservatore.

In figura seguente si ha la rappresentazione<sup>18</sup> di  $\gamma$  e  $h$  per la latitudine di  $38^\circ 6' 44''$  corrispondente alla città di Palermo<sup>19</sup> per valori della declinazione solare  $\delta$  pari a  $\pm 23.5^\circ$ ,  $\pm 20^\circ$ ,

<sup>16</sup> Per *Altezza Solare* si intende l'angolo che la visuale collimata al sole forma con il piano orizzontasse. Esso ha valori massimi allorquando il sole passa sul meridiano e valori nulli all'alba e al tramonto.

<sup>17</sup> Si ricorda, dalla *Geografia Astronomica*, che nel solstizio del 21 giugno il giorno raggiunge la sua massima durata, nel solstizio d'inverno, 22 dicembre, si ha la minima durata mentre agli equinozi, 23 settembre e 21 marzo, si ha che il dì eguaglia la notte.

<sup>18</sup> Nella figura si ha una rappresentazione *gnomonica*, cioè si ha la proiezione su un piano tangente la sfera terrestre al polo da un punto collocato al centro della sfera. In questo modo i meridiani sono rappresentati da rette ed

$\pm 15^\circ$ ,  $\pm 10^\circ$ ,  $0^\circ$  per il solo arco diurno ( $-90^\circ \leq \omega \leq 90^\circ$ ) con angoli solari  $\omega$  variabili a passi di  $15^\circ$  (cioè di un'ora).

Nella rappresentazione di figura le orbite solari sono rappresentate da curve di raggio crescente al crescere di  $\delta$  e di segno discorde per valori positivi o negativi dello stesso angolo di declinazione solare. Per  $\delta=0$  si ha una curva degenera in una retta. Infine sempre nella stessa figura gnomonica si ha la rappresentazione delle curve orarie per cui la posizione del sole è data da un punto della stessa curva oraria per il giorno di riferimento. Ad esempio la posizione solare alle ore 17 del 22 giugno è rappresentata dal punto *K* della stessa figura per il quale si leggono anche  $h=26^\circ$  e  $\omega=100^\circ$ .

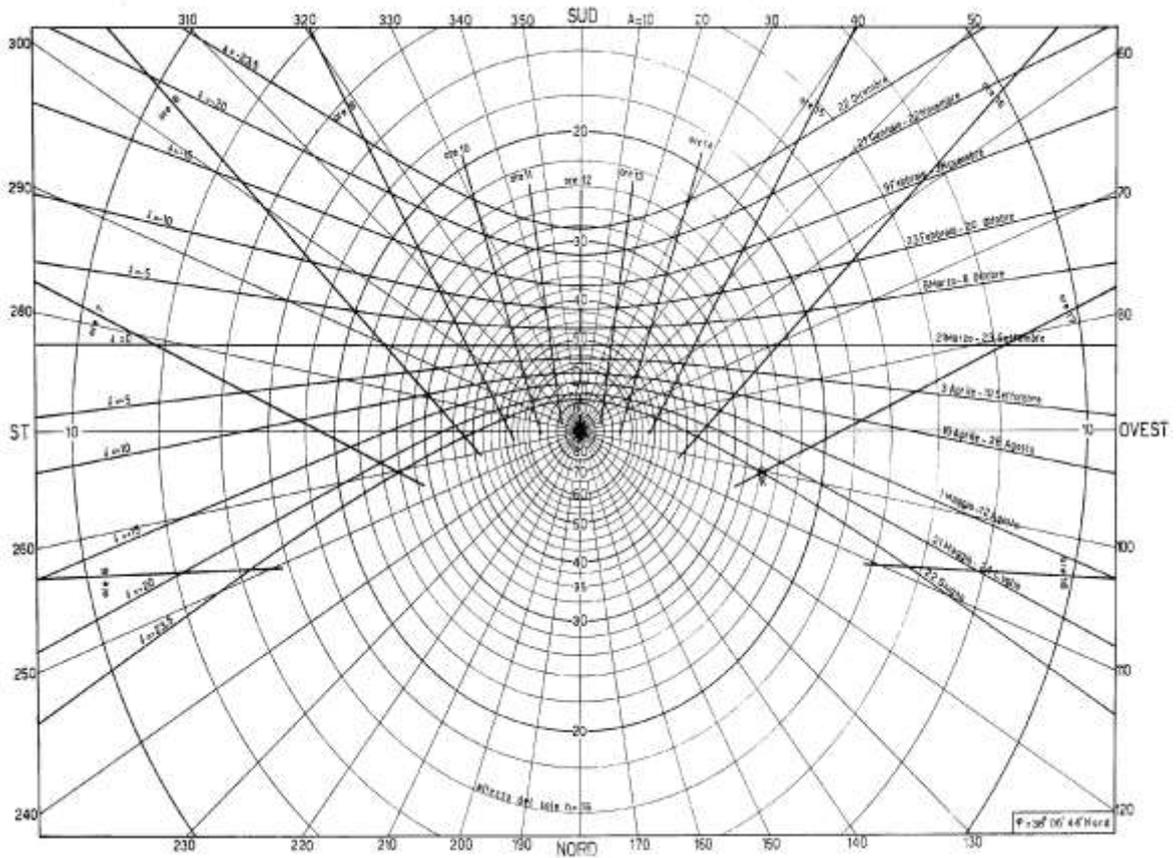


Figura 33: Diagramma eliadiadromico per latitudine di  $38^\circ$

La figura 33 è detta **diagramma eliadiadromico** dal greco  $\epsilon\lambda\iota\omicron\sigma$ =sole e da  $\delta\iota\alpha\delta\rho\omicron\mu\eta$ =traiettoria. Inoltre si deve sempre tener presente che gli angoli sopra citati si riferiscono sempre alle condizioni locali vere del sito e non a quelle medie civili.

Ad esempio il meridiano corrispondente al fuso orario italiano passa per il monte Etna e risulta in ritardo di  $6'30''$  rispetto al tempo medio civile.

---

i paralleli da circonferenze di raggio crescente fino al valore infinito in corrispondenza al circolo massimo. Si hanno, tuttavia, diversi modi di rappresentare i diagrammi eliadiadromici, ad esempio utilizzando diagrammi polari o anche riferendoli a semplici coordinate piane. E' bene tenere presente che le grandezze rappresentate sono sempre l'altezza solare e l'angolo azimutale.

<sup>19</sup> In buona parte dei calcoli che riguardano l'applicazione della Climatologia all'Architettura si può accettare questo valore come medio per la Sicilia.

## 2.2.8 UTILIZZO DEI DIAGRAMMI ELIODIADROMICI

### Determinazione delle ore di soleggiamento di una parete.

Il diagramma eliadiadromico può essere utilizzato per determinare facilmente le ore di soleggiamento di una facciata, comunque orientata, in un qualunque giorno dell'anno. E' sufficiente, in questo caso, segnare sul diagramma eliadiadromico la traccia della facciata e leggere, per il giorno desiderato, le ore segnate nella metà del diagramma delimitata dalla traccia stessa e l'esposizione considerata.

Ad esempio per il giorno 3 aprile, una facciata esposta a Sud-Ovest ed avente traccia azimutale coincidente con l'asse 150°-330° (vedi figura) ha un periodo di soleggiamento che va dalle ore 11,00 al tramonto. Questo genere di calcoli risulta comodo per la corretta orientazione degli edifici o degli assi viari in urbanistica.

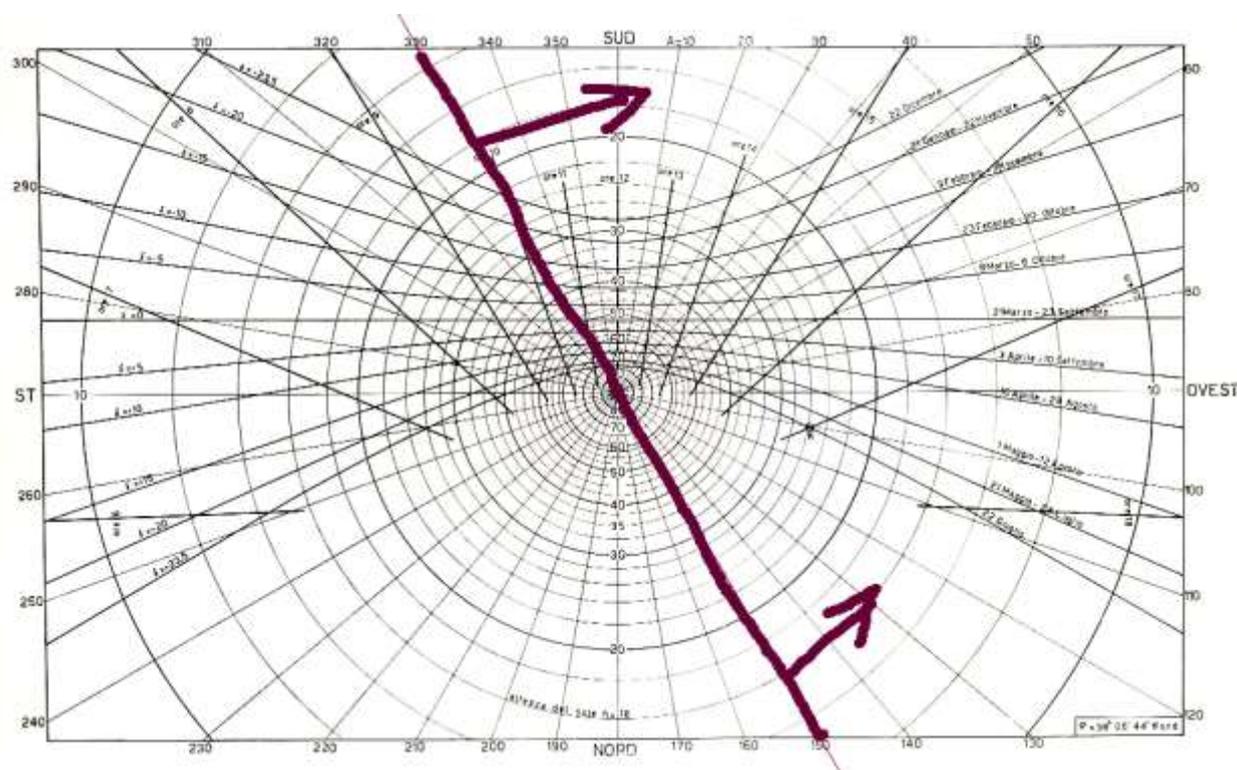


Figura 34: Determinazione delle ore di soleggiamento su una parete comunemente orientata.

In figura si ha ancora un esempio di determinazione del periodo di soleggiamento: si sovrappone il centro del diagramma eliadiadromico ad un punto qualsiasi (in figura è segnato con A) della traccia della facciata scelta e si orienta il diagramma con il suo Nord nella direzione del Nord della planimetria alla quale appartiene la facciata da esaminare. I rami della curva che rimangono esterni alla facciata individuano i periodi di soleggiamento nei giorni segnati sul diagramma eliadiadromico.

Ad esempio, per il giorno 22 giugno il sole irradia la facciata segnata in figura dalle ore 5 circa alle ore 10.30 e nel giorno 22 dicembre la facciata resta sempre in ombra.

Il diagramma solare è comodo anche per determinare la direzione dei raggi solari proiettata sul piano orizzontale: basta congiungere il centro dei diagrammi (punto A della figura) con il punto rappresentativo del giorno e dell'ora considerati. Ad esempio alle ore 8 del giorno 28 agosto la direzione dei raggi solari è rappresentata dalla retta AA'.

Analogo procedimento si può seguire per la determinazione della direzione solare proiettata su un piano verticale: in questo caso si sovrappone sulla sezione della facciata il diagramma eliodiadromico facendo coincidere le altezze solari, come indicato in figura 67: in essa è riportato l'esempio delle ore 14 del giorno 22 giugno corrispondente ad un angolo di incidenza delle radiazioni solari su un piano verticale pari a  $60^\circ$  e la direzione di incidenza è data dalla congiungente  $BB'$ .

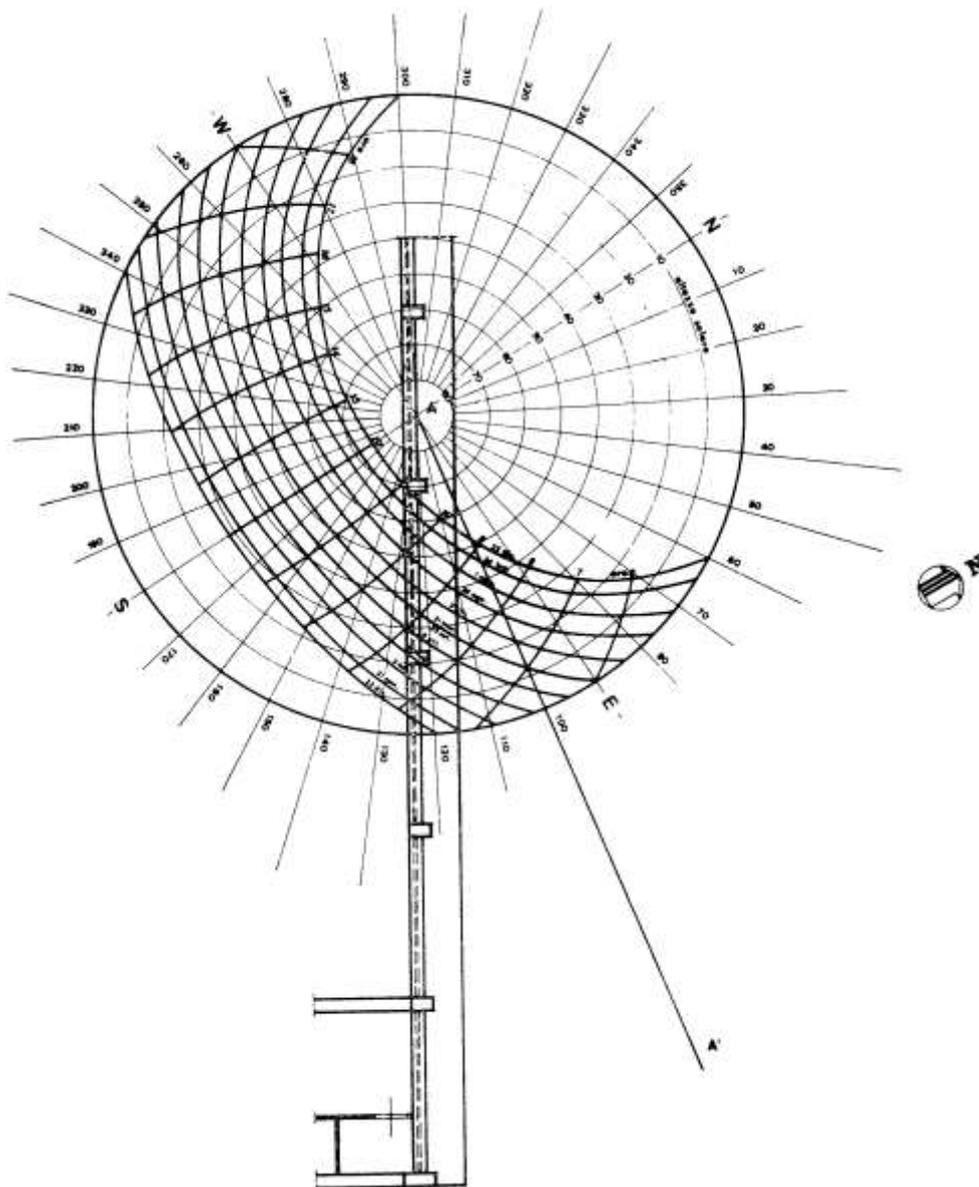


Figura 35 Determinazione della direzione solare proiettata su un piano orizzontale

### Tracciamento delle ombre portate

Con procedimento geometrico del tutto simile a quello sopra indicato per la determinazione delle direzioni dei raggi solari proiettate su piani orizzontali e verticali si possono determinare le tralce delle ombre di un qualunque ostacolo proietta sulla facciata, sia in planimetria che in sezione.

Nelle figure 68 e 69 sono rappresentati due esempi: il primo determina l'ombra proiettata dal balcone sul piano orizzontale e la seconda sul piano verticale. L'interpretazione delle figure è immediata ricordando che sul piano orizzontale occorre considerare, per la direzione delle ombre, la direzione complementare a quella dei raggi solari.

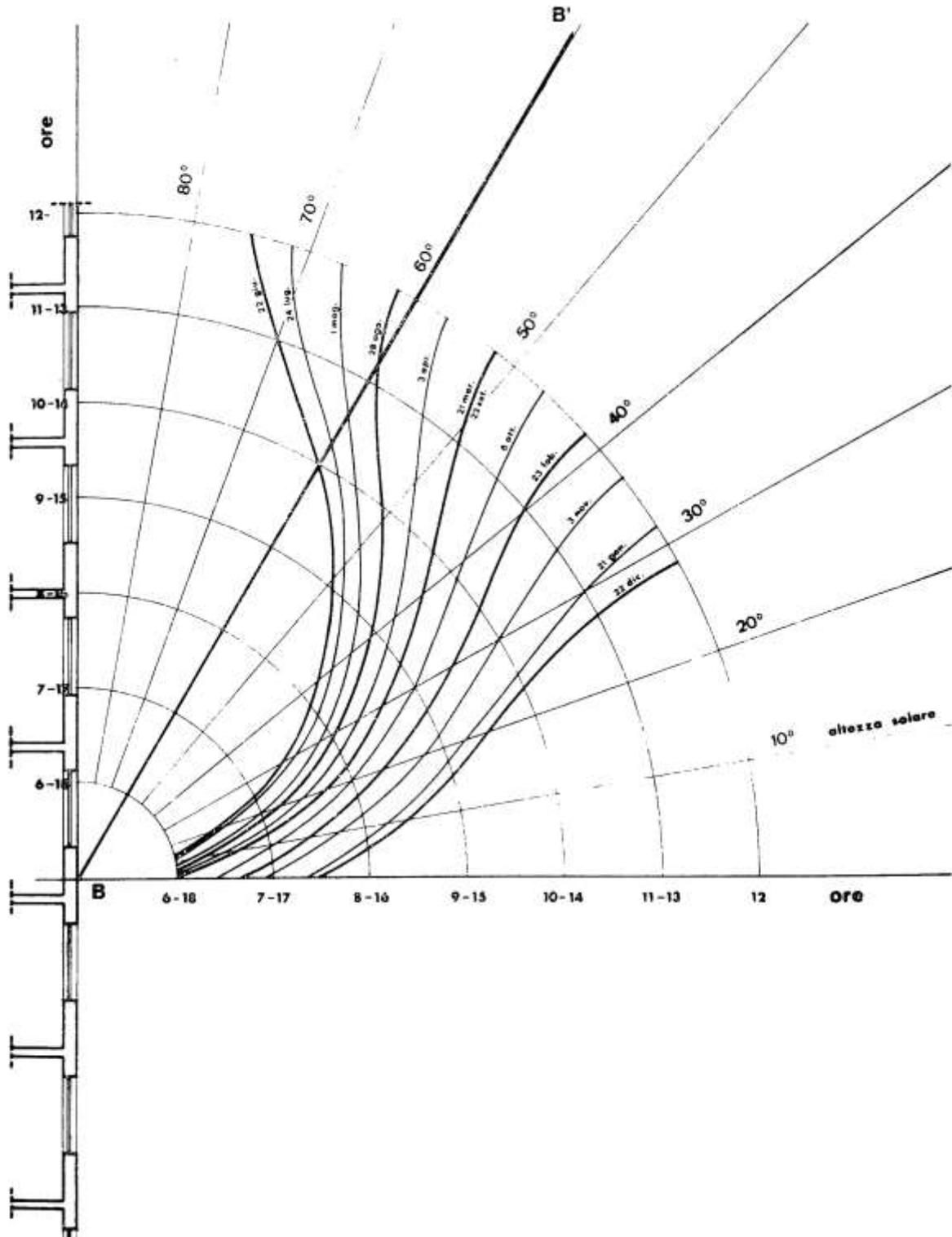


Figura 36: Determinazione della direzione dei raggi solari proiettata su un piano verticale

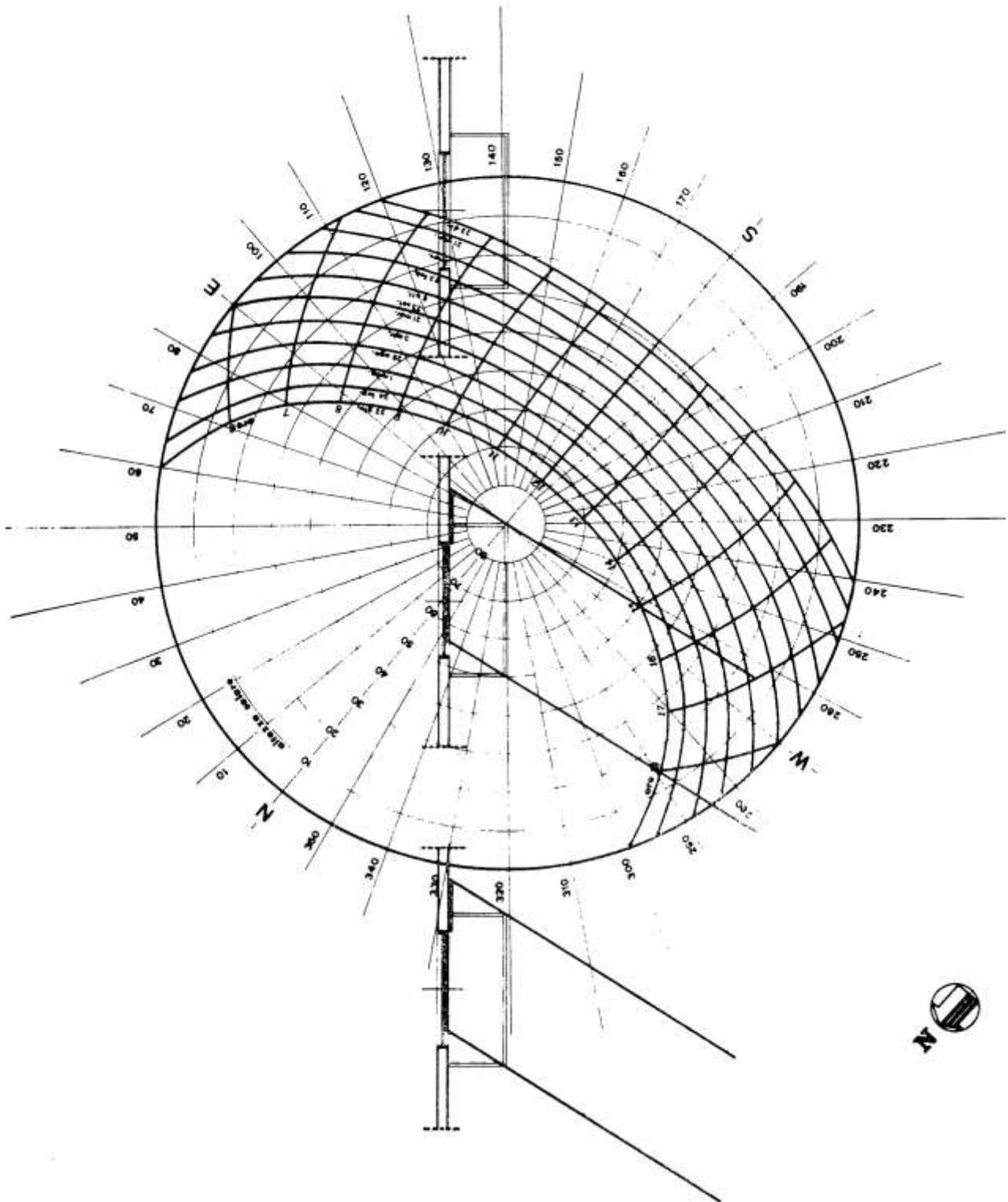


Figura 37: Determinazione della traccia dell'ombra proiettata dal balcone sul piano orizzontale

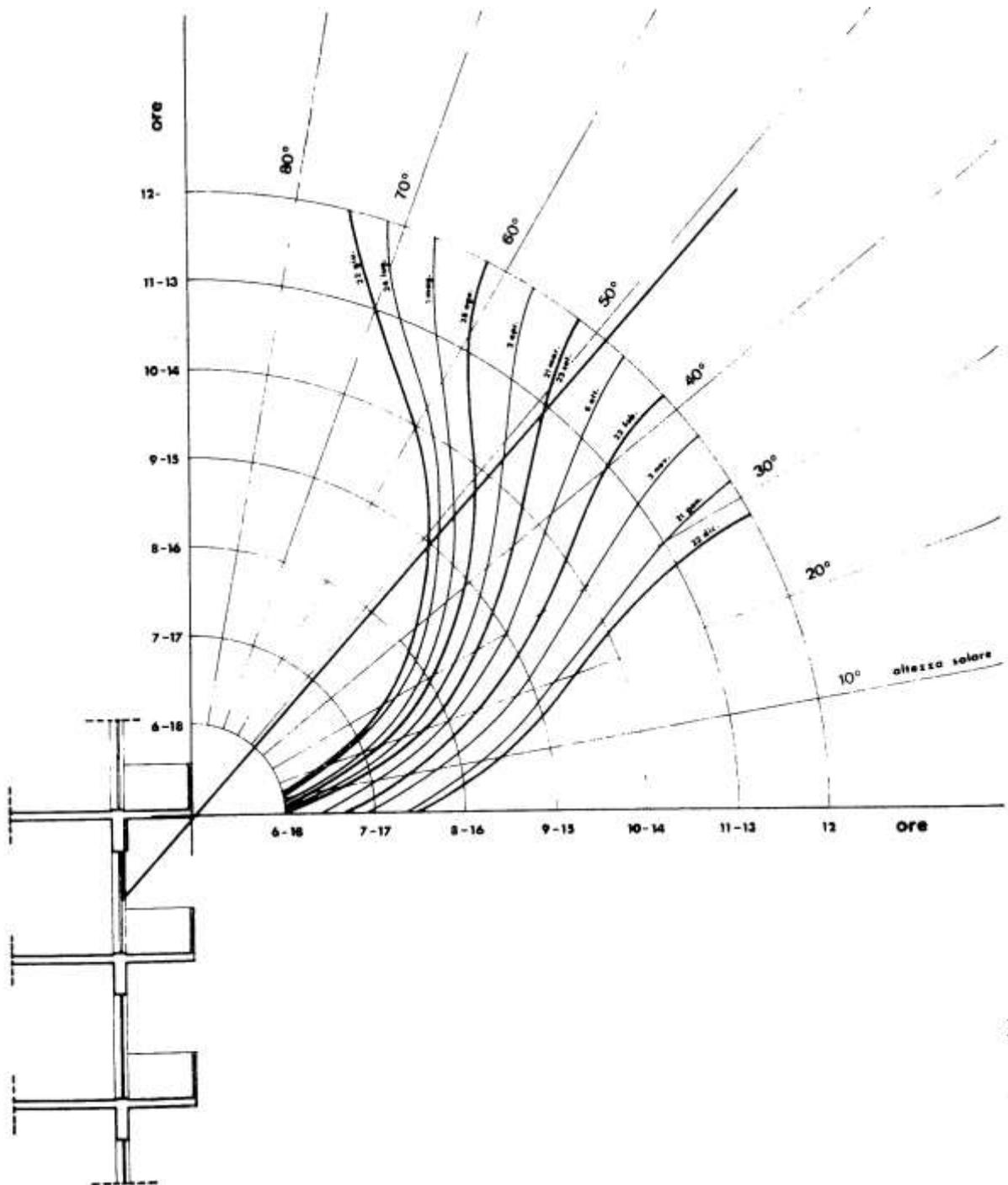


Figura 38: Determinazione della traccia dell'ombra proiettata dal balcone sul piano verticale.

### Calcolo della radiazione globale sulle facciate

I diagrammi eliodiadromici possono essere completati anche da altre curve che consentono di calcolare la radiazione media sulle facciate. Ciò risulta utile per progettare ripari o protezioni delle facciate per le ore più soleggiate.

Nelle figure 71 e 72 sono date le curve delle radiazioni incidenti, espresse in kcal/m<sup>220</sup>.

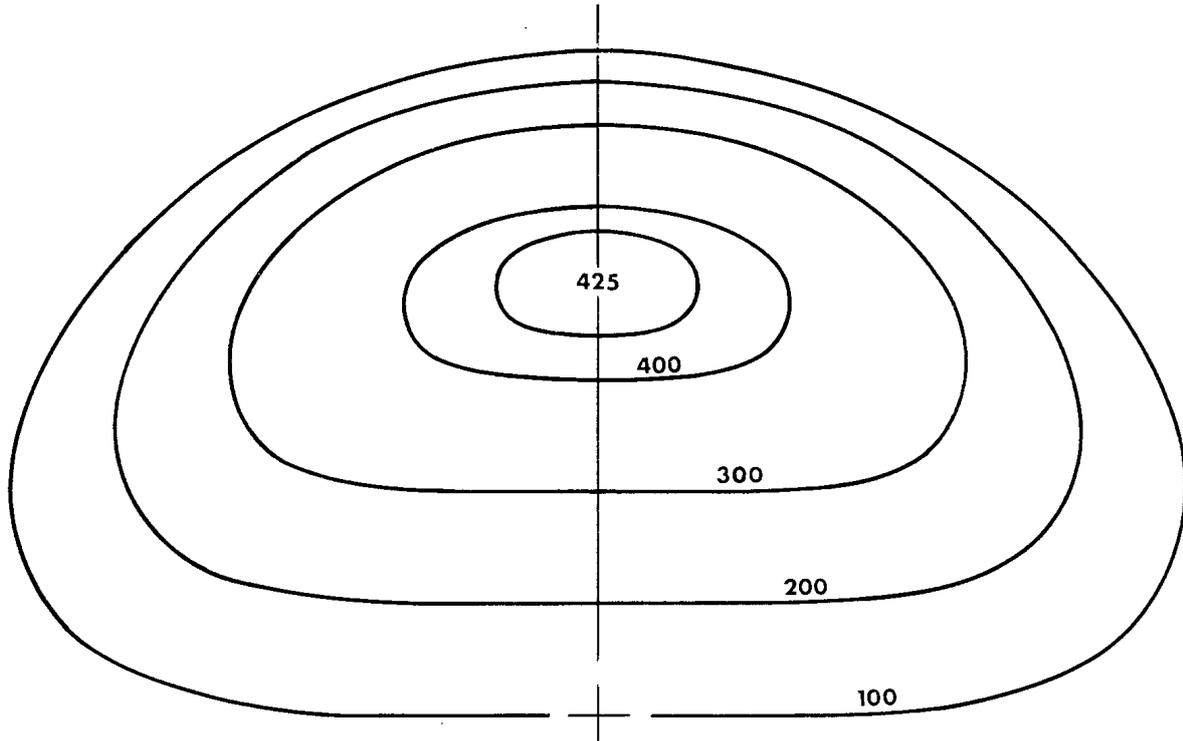


Figura 39: Radiazione solare in dicembre – gennaio – febbraio in kcal/m<sup>2</sup>

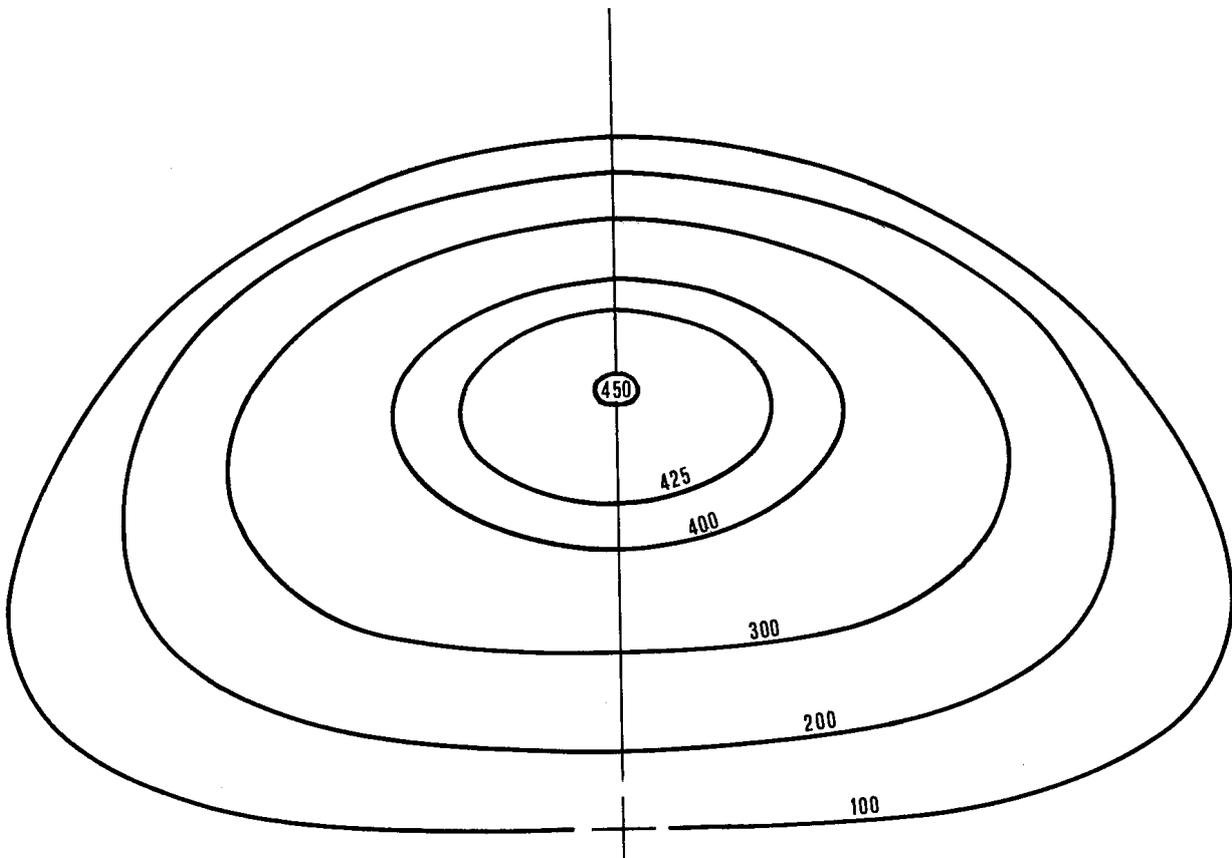


Figura 40: Radiazione solare in primavera-autunno: Marzo – aprile – maggio – settembre – ottobre – novembre

<sup>20</sup> Basta moltiplicare per 4.186 per avere il valore della radiazione in kJ/m<sup>2</sup>.

Nella figura 73 viene riportato un esempio di applicazione per il calcolo della radiazione per le ore 15 del 22 giugno.

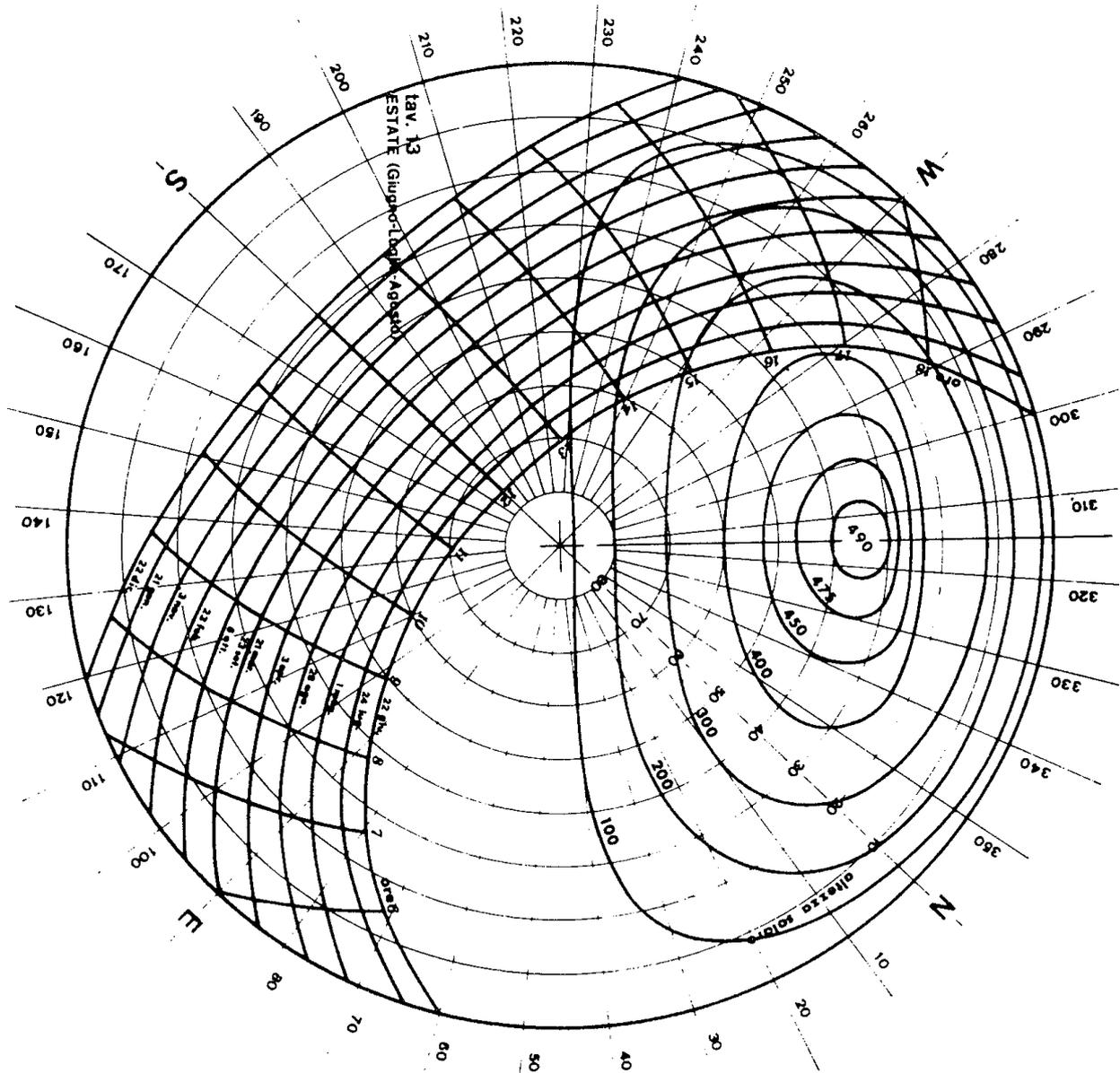


Figura 41: Determinazione dell'energia solare incidente su una facciata esposta a NW, azimut 315°

La procedura da seguire è la seguente:

- si sovrappone il diagramma dei percorsi solari al grafico delle curve di uguale radiazione solare per la stagione desiderata;
- si fa coincidere l'asse del grafico eliodiadiromico con l'orientazione della facciata, in questo caso supposta a 315°;
- in corrispondenza del mese e dell'ora considerati si legge l'energia solare incidente: nel caso dell'esempio considerato si hanno 300 kcal/m<sup>2</sup> pari a 1256 kJ/m<sup>2</sup>.

Un esempio di utilizzo di queste curve potrebbe essere quello di determinare l'area di superficie vetrata capace di garantire un flusso solare massimo o minimo (a seconda delle applicazioni desiderate).

Oppure si possono usare i diagrammi eliodiadiromici per dimensionare i balconi in modo da garantire una certa ombra sulla facciata.

### 3. IL CLIMA E LA PROGETTAZIONE

Si è più volte detto che il Clima esterno influenza le condizioni climatiche interne dell'edificio. Questa correlazione fra clima esterno e micro clima interno deve essere gestita dalla Progettazione degli edifici nel modo più opportuno in modo da massimizzare gli effetti (condizioni di comfort termo igrometrico) scegliendo forme e materiali più opportuni.

Si è più volte detto che il clima condiziona l'evoluzione termica di un edificio e pertanto è necessario conoscerne le caratteristiche che lo determinano. Una classificazione già indicata nel paragrafo *Regioni Climatiche* è la seguente:

- **Caldo umido:** caratterizzate da surriscaldamenti dell'atmosfera con temperatura media superiore a 20°C e con umidità relativa<sup>21</sup> intorno all'80%.
- **Caldo secco:** caratterizzate da surriscaldamenti dell'atmosfera con temperatura media superiore a 25°C e con umidità relativa bassa.
- **Clima temperato:** caratterizzato da dispersioni termiche notevoli in inverno e insufficienti in estate e con temperatura media variabile con la stagione fra -15÷25 °C e con umidità che raramente raggiungono il valore medio dell'80%.

---

<sup>21</sup> L'*Umidità relativa*, indicata con  $\phi$ , è il rapporto fra la pressione del vapore d'acqua nelle condizioni attuali rispetto alla pressione massima di saturazione cioè alla pressione di passaggio di stato (condensazione) alla temperatura dell'aria. Se  $\phi=1$  allora il vapore d'acqua contenuto nell'aria è anche nella quantità massima possibile per la temperatura e pressione data.

· **Clima freddo:** caratterizzato da temperature che variano in inverno fra  $-15 \div (-40)$  °C e con umidità relativa invernale solitamente elevata.

In figura seguente si ha una classificazione del clima a scala terrestre con le indicazioni delle quattro zone climatiche sopra indicate.

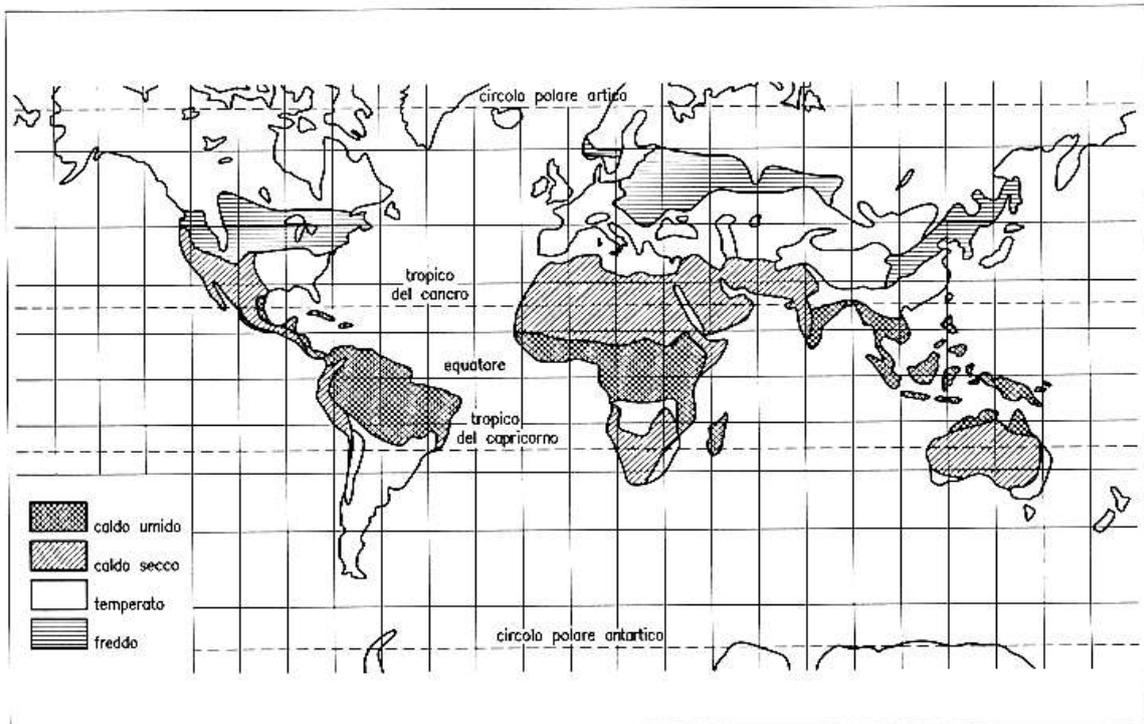


Figura 42: Classificazione delle zone climatiche sulla Terra.

Nel caso del clima per l'Europa si ha una classificazione più fine: *clima alpino*, *clima oceanico*, *clima mediterraneo*, *clima continentale*, *clima umido*, *clima freddo* ,... come rappresentato in figura.

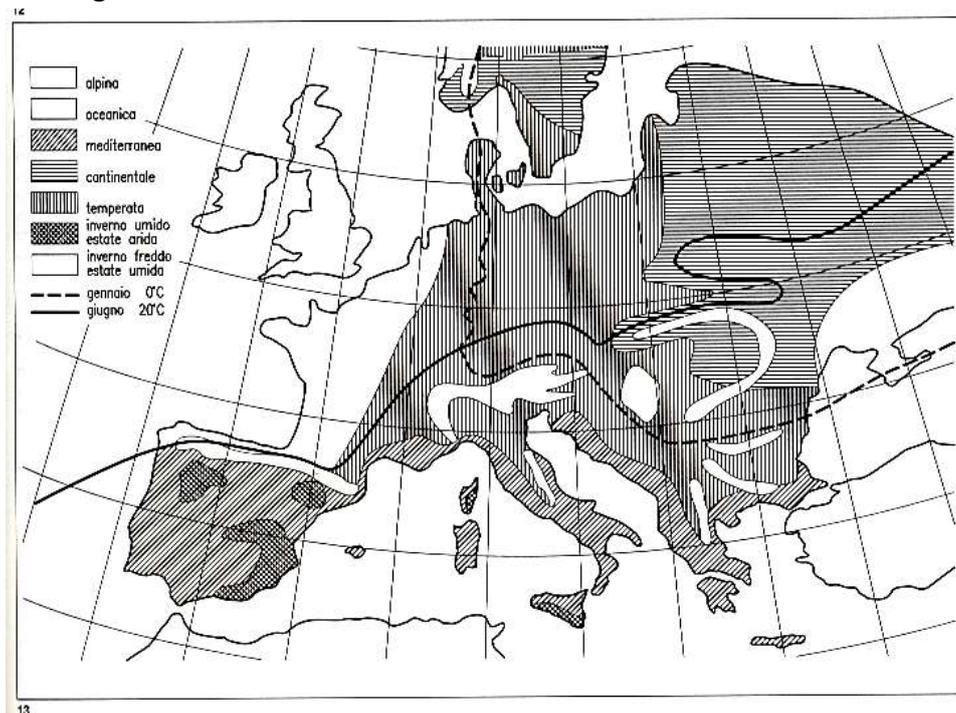


Figura 43: Regioni climatiche europee.

Si osserviamo le linee a temperatura media di 0°C separa in inverno le regioni carpatico – danubiane - balcaniche dall'Europa occidentale che risulta influenzata dalla presenza dell'Oceano Atlantico.

In estate la linea di temperatura a 20°C in estate separa le zone sub-alpine (prevalentemente mediterranee) dalle zone nordeuropee con clima ad inverno rigido.

Per l'Italia in particolare si ha la situazione riportata nella figura.

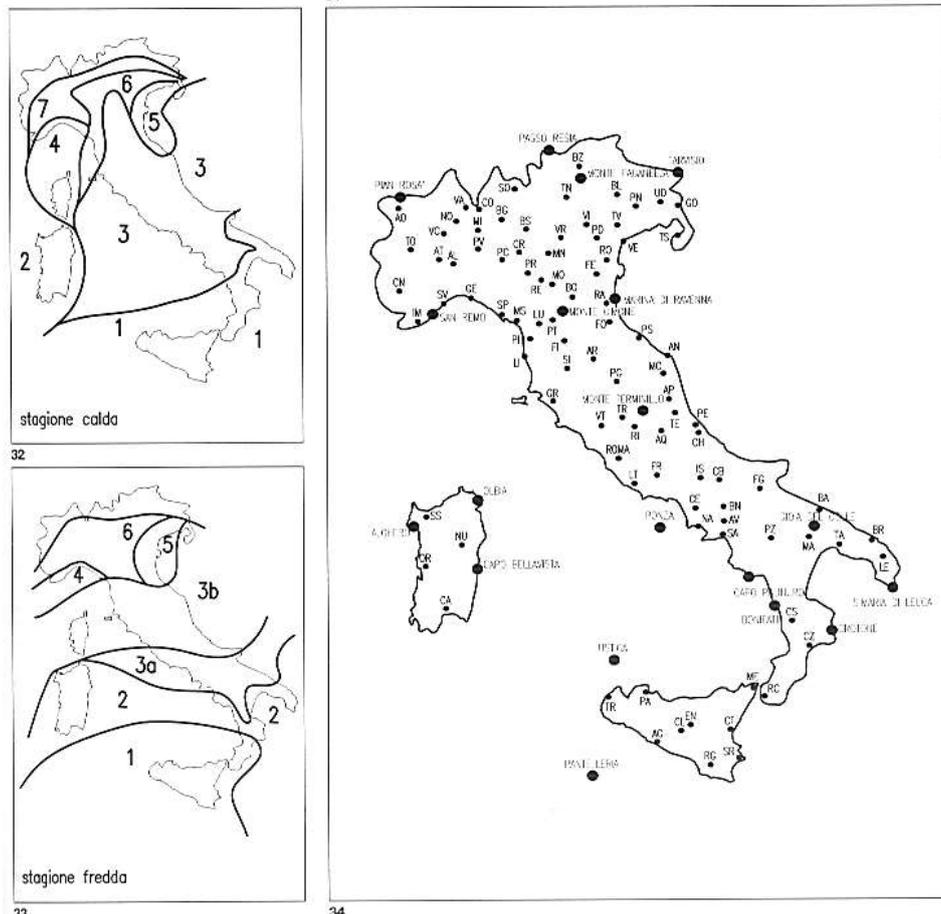


Figura 44: Località per le quali si hanno stazioni climatiche in Italia.

### 3.1 IL CLIMA RISPETTO ALLE SCALE GEOGRAFICHE

Una ulteriore classificazione viene effettuata sul clima in funzione dell'estensione del territorio al quale è riferito. In particolare si ha la situazione espressa nella seguente tabella.

Clima	Distribuzione orizzontale (m)	Distribuzione verticale	Esempio	Scala temporale meteorologica (s)
Microclima	$10^{-2} \div 10^2$	$10^{-2} \div 10^1$	Serra	$10^{-1} \div 10^1$
Clima locale	$10^2 \div 10^4$	$10^{-1} \div 10^3$	Fascia di inversione termica	$10^4 \div 10^5$
Mesoclima	$10^3 \div 2 \times 10^5$	$10^0 \div 6 \times 10^3$	Clima di bacino	$10^4 \div 10^5$
Macroclima	$2 \times 10^5 \div 5 \times 10^7$	$10^0 \div 10^5$	Regione dei monsoni	$10^5 \div 10^6$

La climatologia dell'ambiente costruito si occupa, in base a questa classificazione, del microclima all'interno degli ambienti. Nel caso di studi approfonditi del microclima esterno (a scala di 100 m) questo risulta condizionato dalla morfologia del terreno, dalla sua composizione geologica, dall'esposizione ai raggi solari e al vento, dall'andamento delle ombre portate, dalla presenza di specchi d'acqua e/o di macchie di vegetazione. Ancora più in particolare il microclima esterno coinvolge gli strati d'aria vicini al suolo e quindi la distribuzione verticale di temperatura, umidità e pressione assume primaria importanza rispetto a quella orizzontale che è, invece, oggetto del clima locale. La progettazione architettonica, per quanto riguarda la climatologia e quindi le condizioni di benessere e di consumi energetici, è interessata dalle scale climatiche del microclima e del clima locale.

E' compito del progettista definire il microclima esterno prima di effettuare la progettazione di un edificio in modo da conoscere con esattezza tutti i *fattori climatici* che lo definiscono. E' opportuno osservare, inoltre, che il microclima esterno può in qualche modo essere cambiato o condizionato dall'uomo mentre nessuna alterazione può essere fatta a scala geografica maggiore. Si ricordi, ad esempio, la modificazione del microclima effettuata in Patagonia (Argentina del sud) per consentire la vita degli abitanti plagiati da condizioni locali particolarmente ventose: mediante impiantazioni di alberi d'alto fusto delimitanti zone esterne di qualche decina di metri di lato si è fatto in modo che le abitazioni costruite all'interno delle aree interne fossero protette dalla strato limite e quindi meno soggette al vento.

## 3.2 FATTORI CLIMATICI

Sono definiti *fattori climatici* quei fenomeni naturali quale il soleggiamento, la nuvolosità, il vento, le precipitazioni o la radiazione solare che determinano le caratteristiche climatiche di una data località.

### 3.2.1 RADIAZIONE SOLARE

Si è già parlato della radiazione solare in generale nei capitoli precedenti e ad essi si rimanda per una trattazione più approfondita. Qui si vuole considerare la radiazione solare per l'Italia così come rilevata di recente dall'ENEA nel 1995 mediante tecniche avanzate che fanno uso di riprese da satellite. In particolare sono state utilizzate le riprese del satellite Meteosat ricevute dal centro europeo di Darmstadt.

Le immagini sono poi convertite in mappe digitalizzate nelle quali l'irraggiamento solare è dato in forma grafica a colori, come indicato nelle figure seguenti. Nella tabella seguente si hanno gli irraggiamenti solari mensili nei comuni della provincia di Siracusa ed analoghe tabelle si hanno per tutti i comuni d'Italia.

Nelle figure seguenti si hanno le mappe di irraggiamento medio mensile per i mesi da gennaio e febbraio in Italia su superfici orizzontali, espresse in MJ/m<sup>2</sup>/giorno.

Questi dati possono essere utilizzati per i calcoli dell'irraggiamento solare per superfici comunque inclinate ed orientate, come indicato in precedenza.

Dati ancora maggiori si possono desumere dai due manuali della Comunità Scientifica Europea: *Atlante Europeo della Radiazione Solare*.

### RADIAZIONE GIORNALIERA MEDIA MENSILE SULL' ITALIA NEL 1995 (MJ/m<sup>2</sup>giorno)

latitud	longitud	altit	prov	Comune	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
38 05	13 17	310	PA	Monreale	7.8	12.1	14.8	18.9	22.6	23.8	24.1	21.2	17.0	13.3	8.2	7.5
38 07	13 22	14	PA	Palermo	7.8	12.1	14.8	18.9	22.6	23.8	24.1	21.1	16.9	13.3	8.2	7.5
38 03	13 07	175	PA	Partinico	7.9	12.0	14.9	19.0	22.6	23.7	24.2	21.2	17.0	13.3	8.3	7.6
38 00	13 17	720	PA	Piana degli Albanesi	7.8	12.0	14.8	18.9	22.6	23.8	24.1	21.2	16.9	13.2	8.3	7.5
37 43	13 26	966	PA	Prizzi	7.9	12.1	14.9	18.9	22.8	23.9	24.1	21.2	16.9	13.2	8.4	7.5
37 58	13 11	467	PA	San Giuseppe Jato	7.9	12.0	14.9	18.9	22.6	23.8	24.2	21.2	17.0	13.3	8.3	7.6
37 59	13 42	77	PA	Termini Imerese	7.7	12.0	14.6	18.7	22.6	23.9	24.0	21.0	16.8	13.2	8.2	7.4
38 09	13 05	33	PA	Terrasini	7.9	12.0	14.9	19.0	22.6	23.7	24.2	21.2	17.0	13.3	8.3	7.6
38 05	13 27	47	PA	Villabate	7.7	12.1	14.8	18.8	22.6	23.8	24.1	21.1	16.9	13.2	8.2	7.5
37 02	14 30	199	RG	Acate	8.7	12.4	15.4	18.9	23.0	24.2	24.1	21.4	16.8	13.4	9.3	7.8
37 02	14 42	668	RG	Chiaromonte Gulfi	8.8	12.4	15.3	18.9	22.9	24.2	24.1	21.4	16.7	13.4	9.3	7.8
36 57	14 36	209	RG	Comiso	8.8	12.5	15.4	19.0	23.0	24.2	24.1	21.4	16.8	13.4	9.4	7.9
36 47	14 55	170	RG	Ispica	8.9	12.6	15.6	19.1	23.1	24.3	24.2	21.5	16.7	13.5	9.7	8.0
36 52	14 46	296	RG	Modica	8.9	12.5	15.5	19.0	23.0	24.3	24.2	21.5	16.8	13.5	9.6	8.0
36 44	14 51	20	RG	Pozzallo	8.9	12.6	15.6	19.1	23.1	24.3	24.2	21.6	16.8	13.5	9.8	8.1
36 56	14 44	502	RG	Ragusa	8.8	12.5	15.4	19.0	23.0	24.3	24.1	21.4	16.8	13.5	9.5	7.9
36 50	14 31	87	RG	Santa Croce Camerina	8.9	12.6	15.6	19.1	23.1	24.3	24.2	21.5	16.9	13.5	9.6	8.0
36 48	14 42	106	RG	Scicli	8.9	12.6	15.6	19.1	23.1	24.3	24.2	21.5	16.8	13.5	9.6	8.0
36 57	14 32	168	RG	Vittoria	8.8	12.5	15.4	19.0	23.1	24.2	24.1	21.4	16.8	13.4	9.4	7.9
37 14	15 13	15	SR	Augusta	8.7	12.4	15.2	18.6	22.7	24.2	24.1	21.2	16.3	13.5	9.3	7.9
36 55	15 08	40	SR	Avola	8.9	12.5	15.5	18.9	23.0	24.3	24.2	21.5	16.5	13.5	9.6	8.0
37 02	15 04	362	SR	Canicattini Bagni	8.8	12.4	15.3	18.8	22.9	24.2	24.1	21.4	16.5	13.5	9.5	7.9
37 17	15 01	200	SR	Carlentini	8.7	12.3	15.1	18.6	22.7	24.2	24.0	21.1	16.4	13.4	9.1	7.8
37 05	15 09	111	SR	Floridia	8.8	12.4	15.3	18.8	22.8	24.2	24.1	21.4	16.5	13.5	9.4	7.9
37 14	14 53	281	SR	Francofonte	8.7	12.3	15.1	18.7	22.7	24.2	24.0	21.1	16.5	13.4	9.1	7.7
37 17	15 00	53	SR	Lentini	8.6	12.3	15.1	18.6	22.7	24.2	24.0	21.1	16.4	13.4	9.1	7.8
37 11	15 08	310	SR	Melilli	8.7	12.4	15.2	18.7	22.7	24.2	24.0	21.3	16.4	13.4	9.3	7.9
36 54	15 04	152	SR	Noto	8.9	12.5	15.5	19.0	23.0	24.3	24.2	21.5	16.6	13.5	9.6	8.0
36 43	15 05	65	SR	Pachino	8.9	12.6	15.6	19.1	23.1	24.3	24.2	21.6	16.7	13.5	9.9	8.1
37 04	14 54	670	SR	Palazzolo Acreide	8.8	12.4	15.3	18.8	22.8	24.2	24.1	21.3	16.6	13.4	9.3	7.9
37 10	15 11	30	SR	Priolo Gargallo	8.8	12.4	15.2	18.7	22.7	24.2	24.1	21.3	16.4	13.5	9.3	7.9
36 49	14 57	154	SR	Rosolini	8.9	12.6	15.5	19.0	23.0	24.3	24.2	21.5	16.7	13.5	9.7	8.0
37 04	15 18	17	SR	Siracusa	8.8	12.5	15.4	18.8	22.8	24.3	24.1	21.4	16.4	13.5	9.5	8.0
37 10	15 02	438	SR	Sortino	8.7	12.3	15.2	18.7	22.7	24.2	24.0	21.2	16.5	13.4	9.2	7.8
37 59	12 58	258	TP	Alcamo	8.0	12.0	15.0	19.0	22.6	23.7	24.2	21.3	17.0	13.3	8.4	7.7
37 55	12 52	338	TP	Calatafimi	8.1	12.0	15.1	19.1	22.7	23.7	24.3	21.4	17.0	13.3	8.6	7.8

Tabella per l'irraggiamento solare nei comuni della provincia di Siracusa.

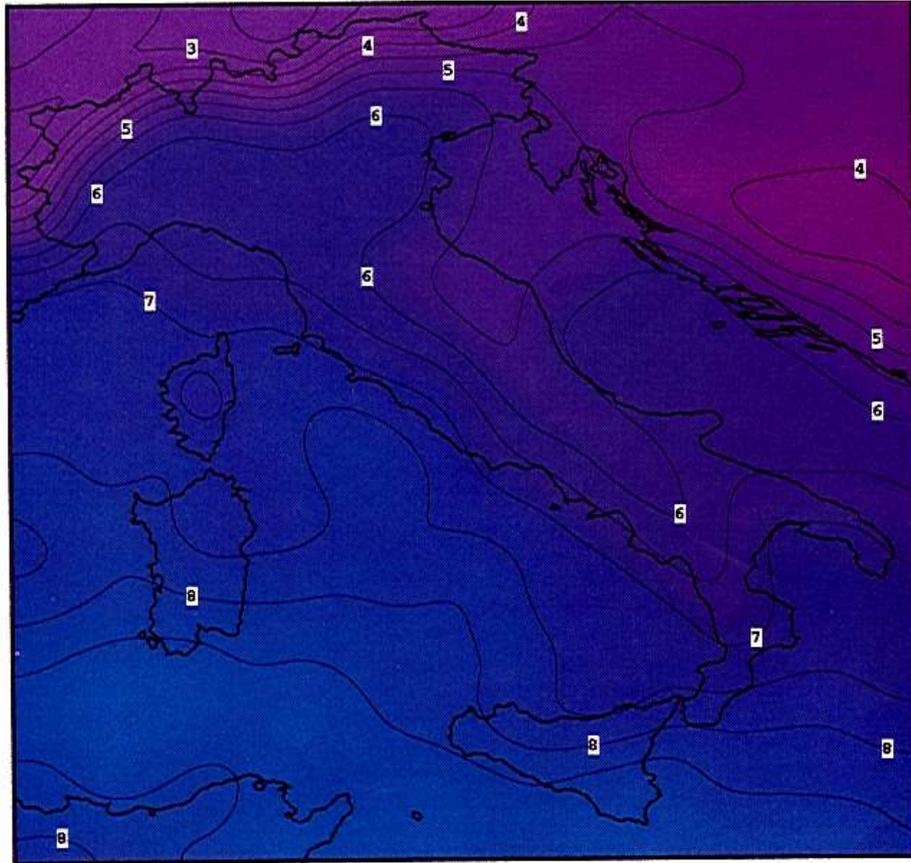


Figura 45: Irradiazione giornaliera media mensile (MJ/m<sup>2</sup>/giorno) a gennaio

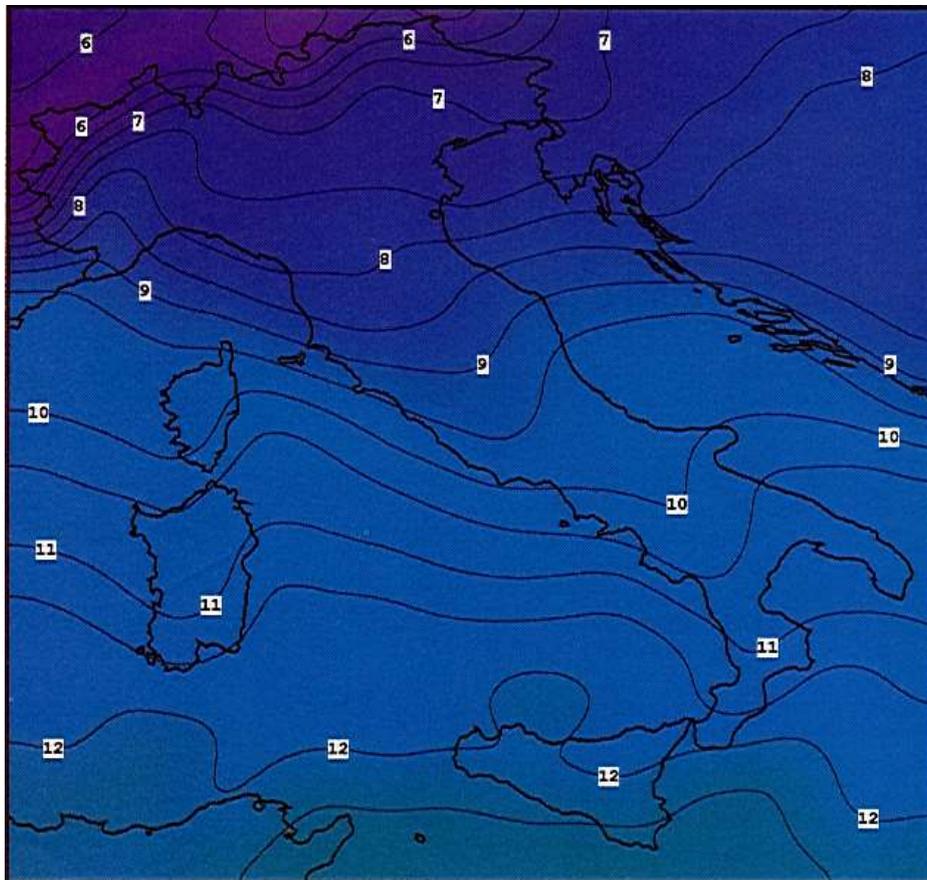


Figura 46b: Irradiazione giornaliera media mensile (MJ/m<sup>2</sup>/giorno) a febbraio

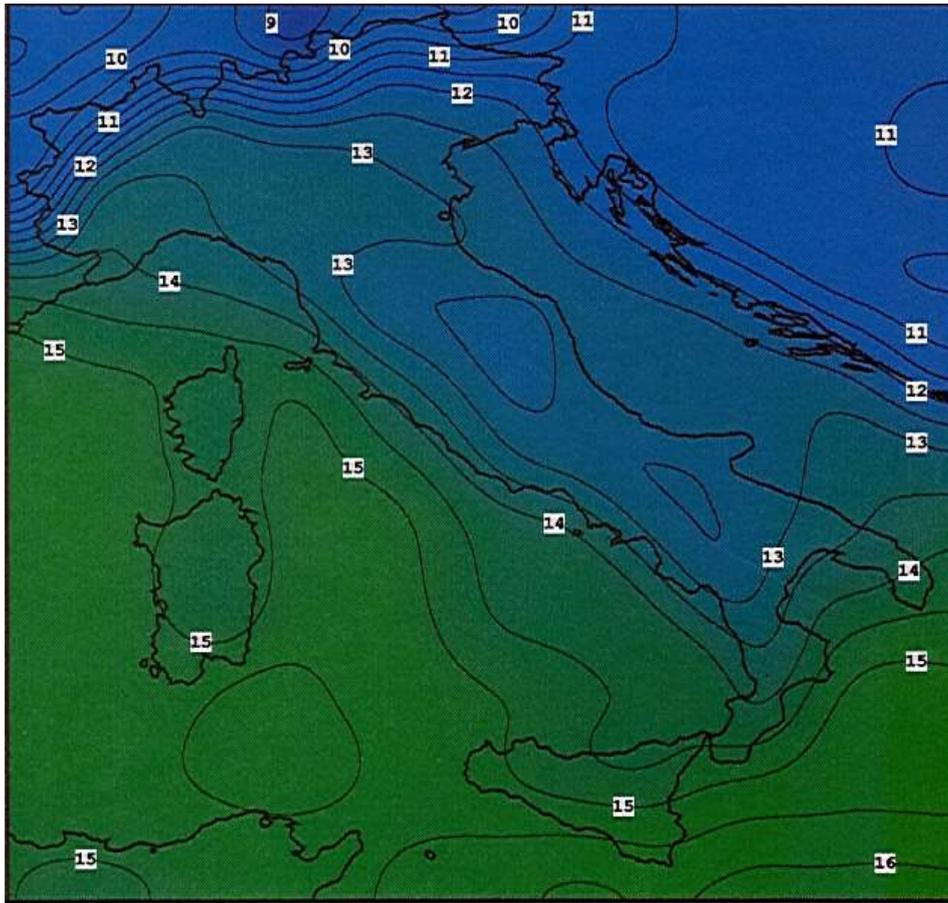


Figura 47: Irradiazione giornaliera media mensile ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{giorno}$ ) a marzo

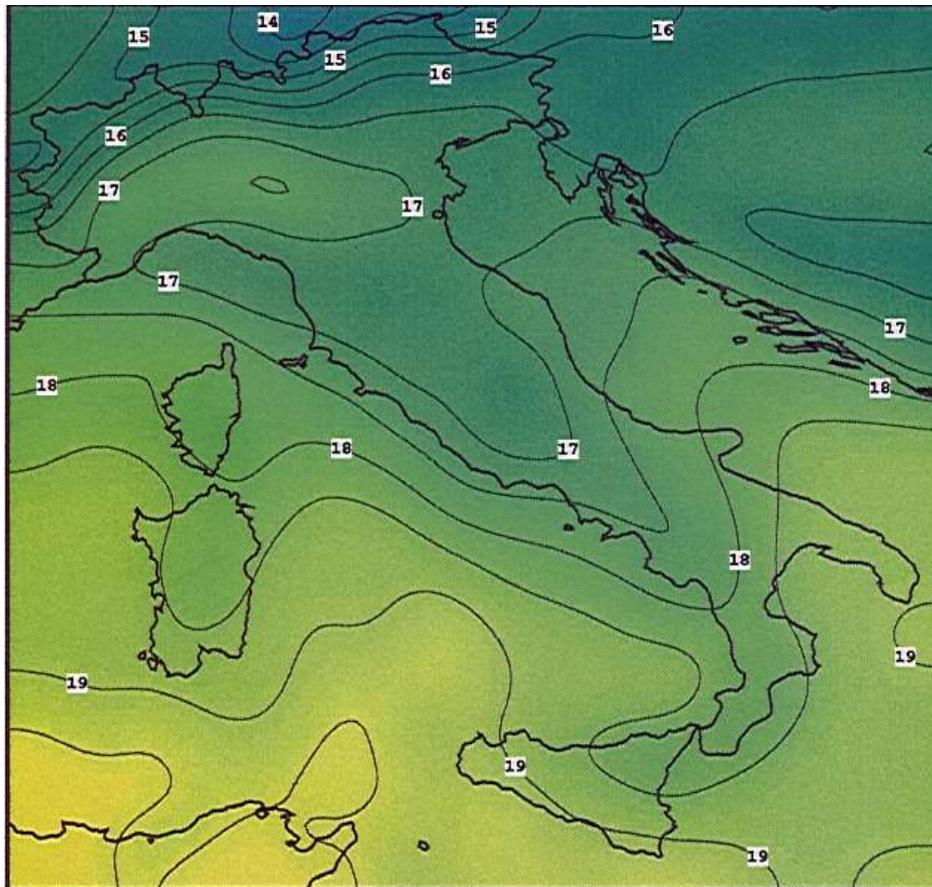


Figura 48: Irradiazione giornaliera media mensile ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{giorno}$ ) ad aprile

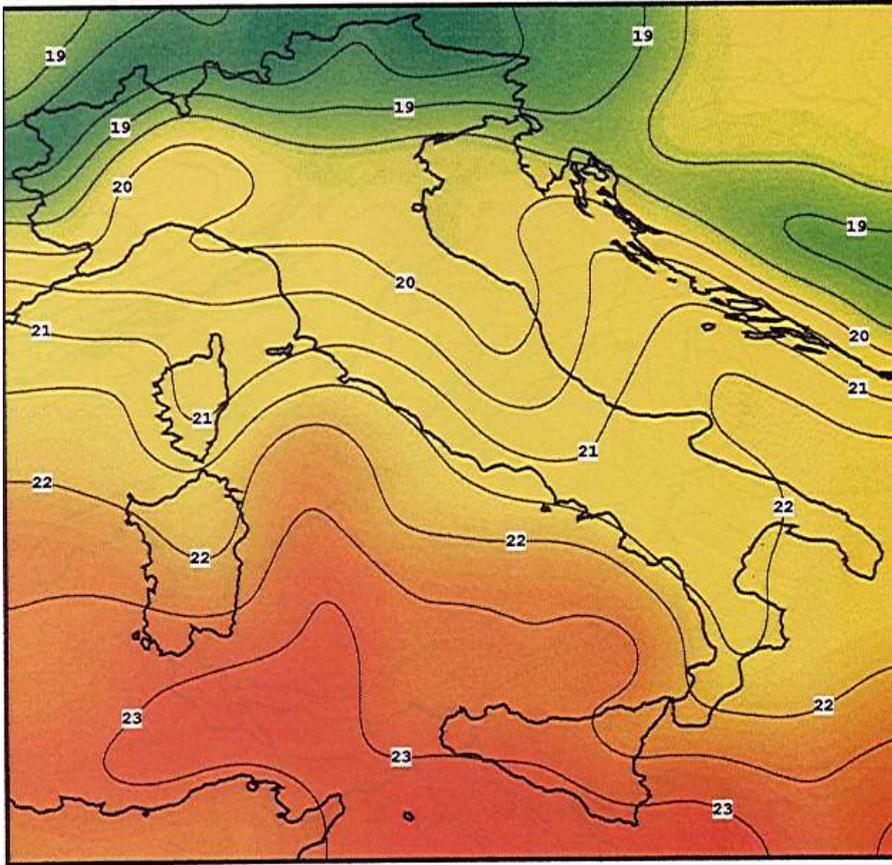


Figura 49: Irradiazione giornaliera media mensile ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{giorno}$ ) a maggio

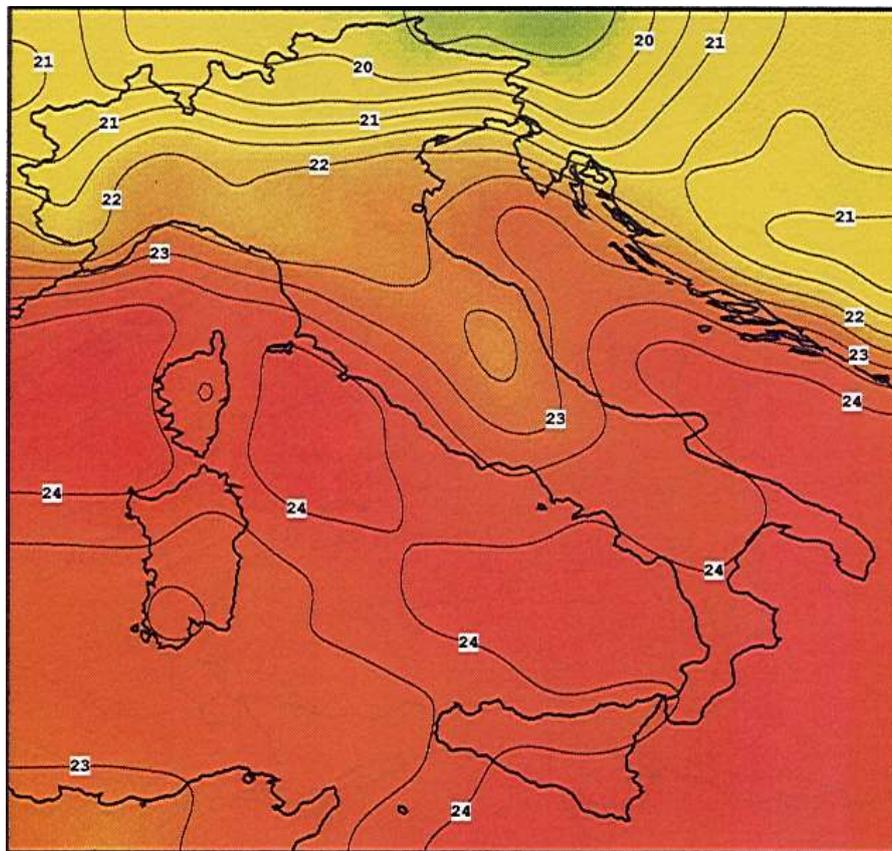


Figura 50: Irradiazione giornaliera media mensile ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{giorno}$ ) a giugno

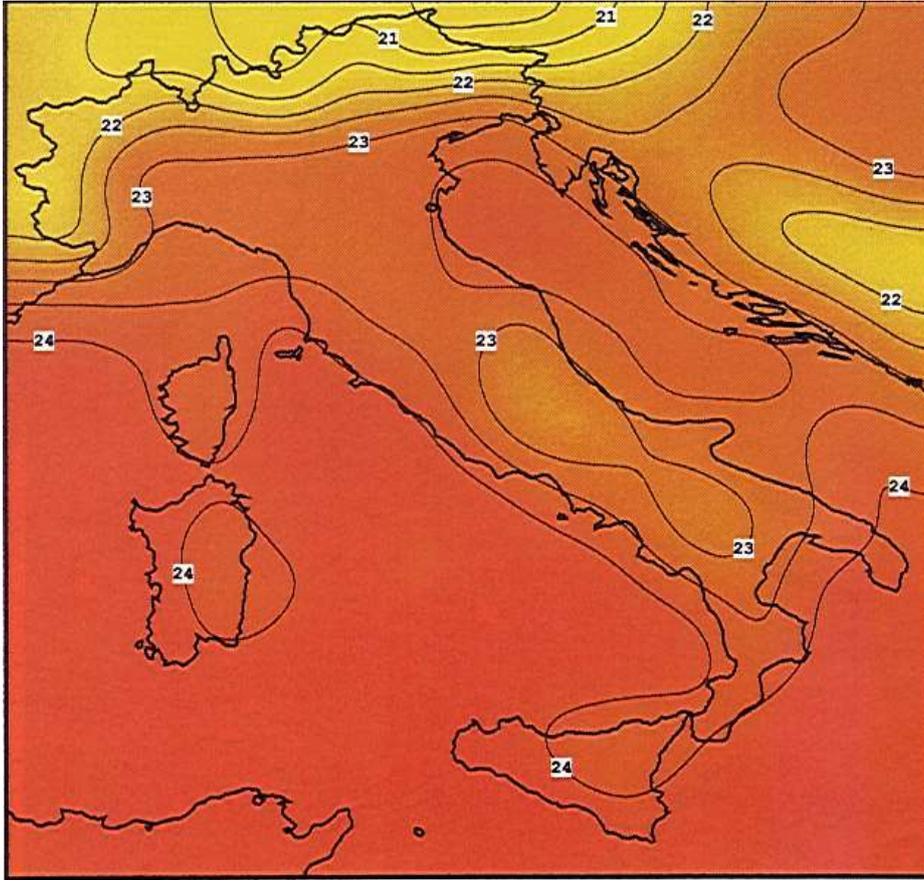


Figura 51: Irradiazione giornaliera media mensile ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{giorno}$ ) a luglio

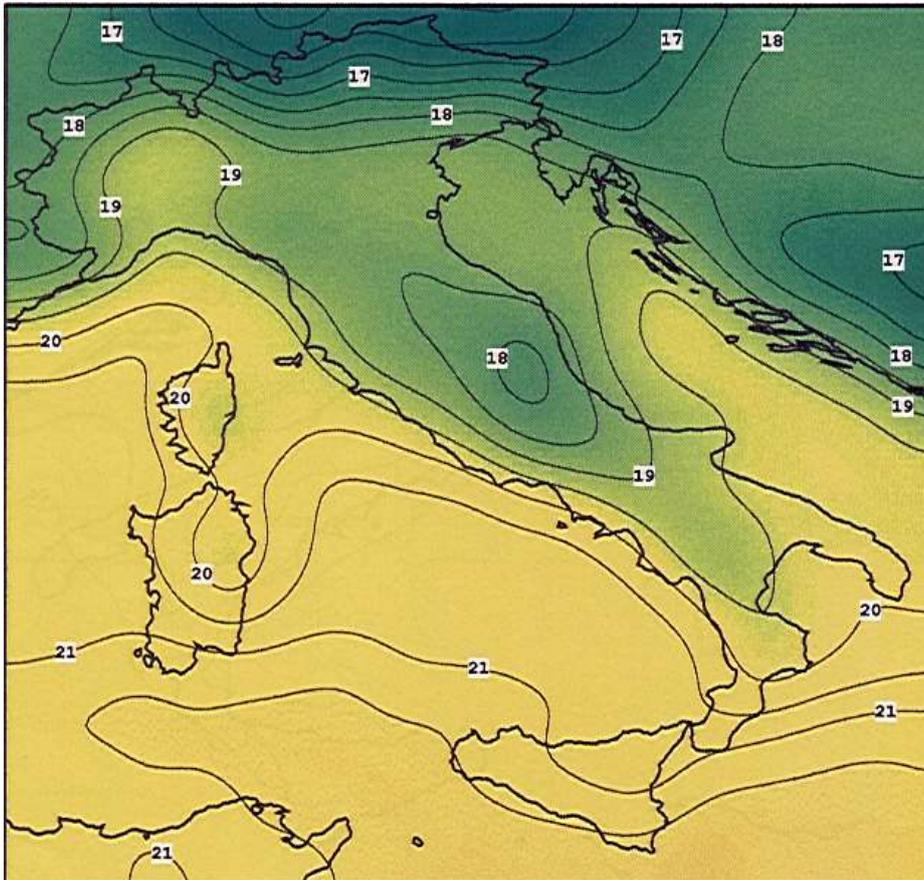
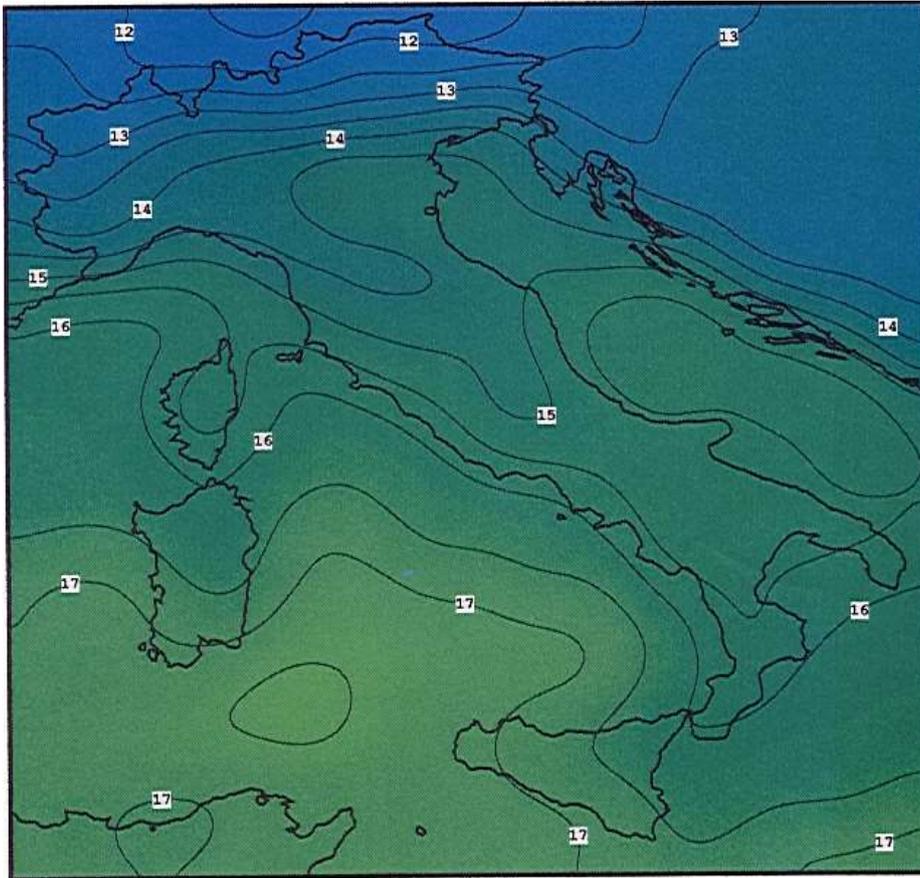


Figura 52: Irradiazione giornaliera media mensile ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{giorno}$ ) ad agosto



Radiazione giornaliera media mensile ( $\text{MJ}/\text{m}^2$  giorno)

Figura 53i: Irradiazione giornaliera media mensile ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{giorno}$ ) a settembre

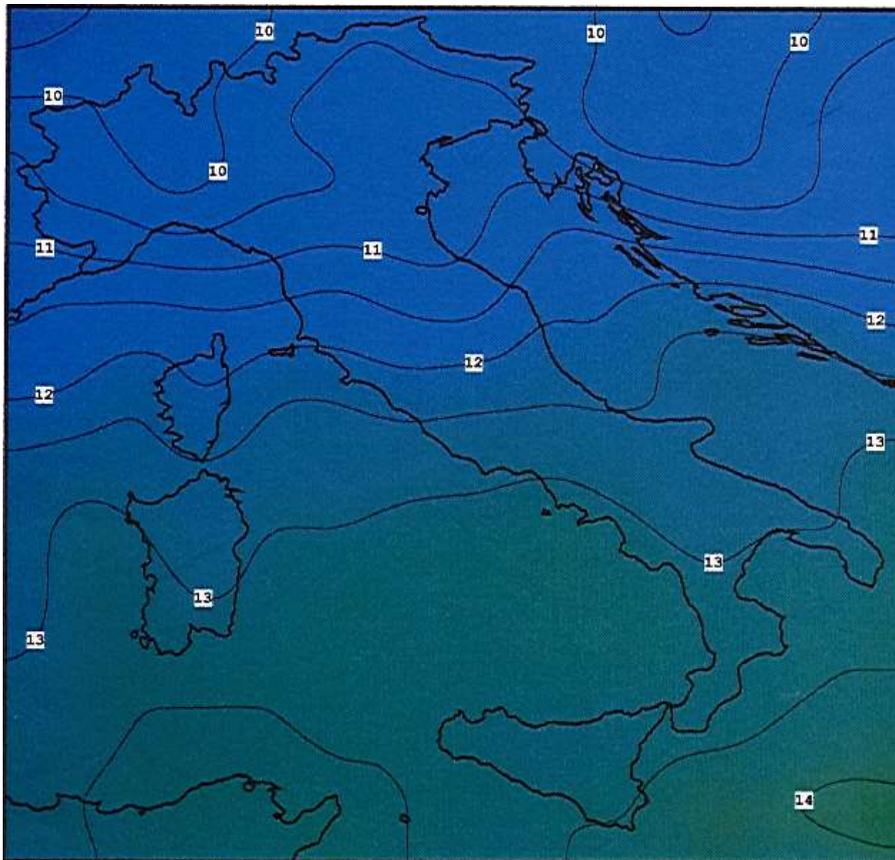


Figura 54: Irradiazione giornaliera media mensile ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{giorno}$ ) ad ottobre

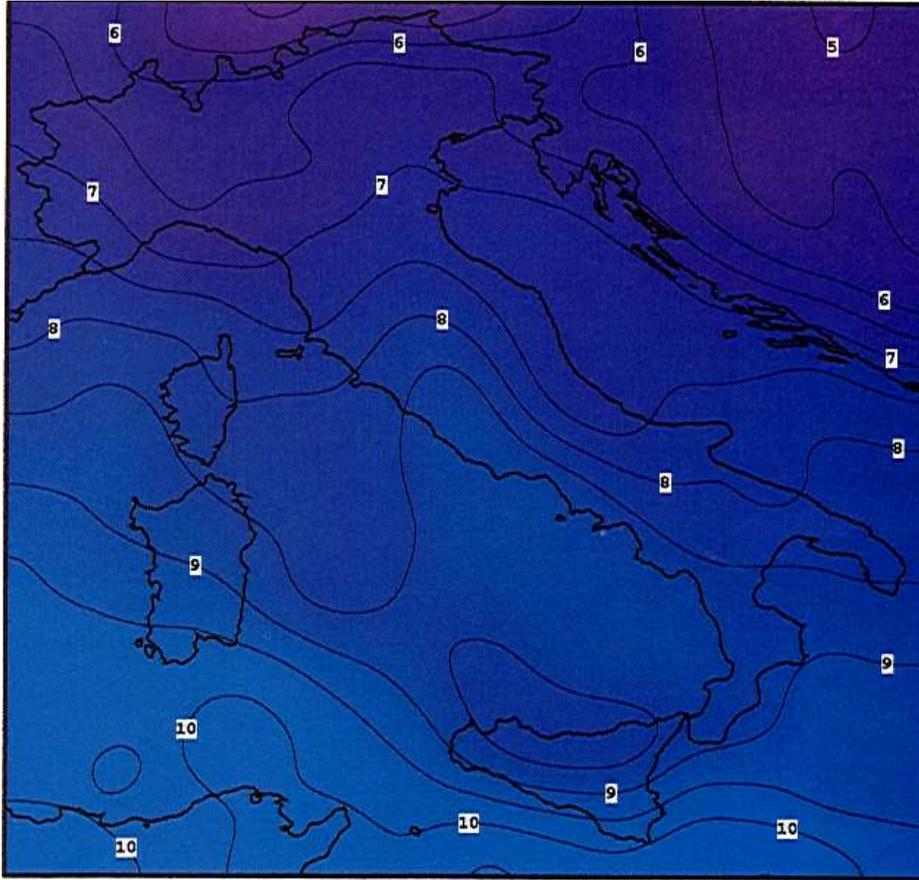


Figura 55: Irradiazione giornaliera media mensile ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{giorno}$ ) a novembre

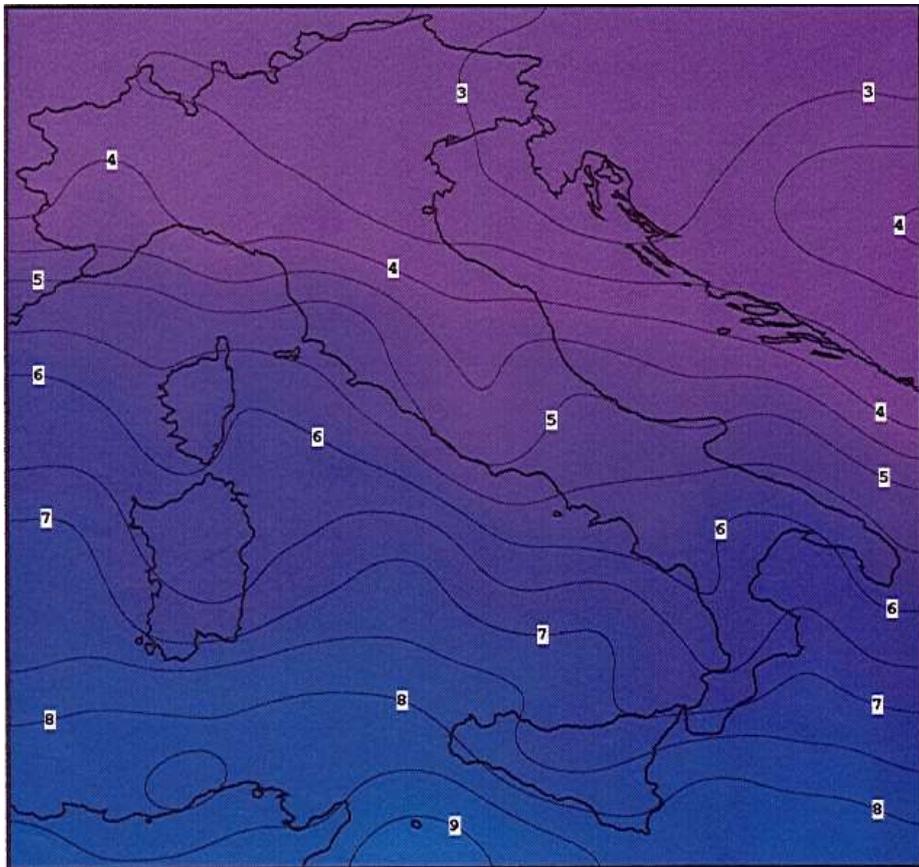


Figura 56: Irradiazione giornaliera media mensile ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{giorno}$ ) a dicembre

### 3.2.2 ANALISI STATISTICA DELLA RADIAZIONE SOLARE

Si vuole qui fornire un esempio di studio sulla radiazione solare effettuato presso la Facoltà di Ingegneria di Catania con dati storici forniti dall'Osservatorio Astrofisico dell'Università. I dati sperimentali di irraggiamento solare globale su superficie orizzontale sono stati raccolti nell'anno 1967. Essi costituiscono un complesso di oltre 18.200 elementi, sui quali è stato condotto uno studio sistematico delle principali proprietà statistiche ed applicato in seguito un modello di simulazione fondato sul metodo della matrice di Markoff atto a generare, mediante elaboratore elettronico, sequenze temporali casuali, caratterizzate da una statistica congruente con quella dell'anno storico.

L'indagine qui presentata consiste in una classificazione condotta non direttamente sui dati energetici di insolazione quanto sulle trasparenze del cielo, definite dal rapporto tra l'irraggiamento storico e l'irraggiamento extra-atmosferico, e classificate in 25 classi di passo 0,04. Il motivo di questa scelta è da ricercarsi nella possibilità di un successivo confronto tra la statistica dei dati storici e quella dei dati simulati a mezzo della matrice di Markoff, in coerenza con le metodologie seguite da altri ricercatori. Oggetto dello studio è, dunque, l'analisi della curva di distribuzione della frequenza percentuale delle trasparenze dei dati storici, ovvero della funzione di densità di probabilità. L'indagine è stata poi estesa alla distribuzione puntuale e cumulativa delle frequenze di soglia, cioè alla classificazione della probabilità del verificarsi di una data classe di irraggiamento e della corrispondente probabilità di irraggiamenti superiori o uguali a quella stessa classe. Si è, infine, ricostruito l'anno storico nelle sue varie determinazioni temporali con passo rispettivamente giornaliero, settimanale, quindicinale e mensile.

#### Procedure operative

I calcoli sono stati condotti tramite elaboratore elettronico che ha tracciato anche i diagrammi relativi. Nel calcolo dello scarto quadratico medio si è utilizzata la formula riferita alla popolazione estesa, ritenendo il complesso dei dati sufficiente per giustificare l'uso. I dati o le sequenze di dati mancanti sono stati sostituiti inizialmente da valori nulli e ripristinati in un secondo momento con valori generati col metodo *Montecarlo*<sup>22</sup> onde assicurare una realistica ricostruzione della situazione sperimentale.

I dati registrati, disponibili sotto forma di tracciati continui sulle strisce eliofanografiche, sono stati letti senza l'ausilio di mezzi digitali e memorizzati nel calcolatore con un passo temporale di 15'.

#### Analisi dei risultati: Curva PDF della frequenza di insolazione

Dai risultati ottenuti e dai diagrammi riportati, la funzione densità di probabilità (ovvero la frequenza percentuale) dei dati di insolazione mensili risulta del tipo bimodale centrata attorno ai valori  $0,25 \div 0,35$  e  $0,70 \div 0,80$ . Dal diagramma consuntivo delle frequenze annuali discende un utile confronto con le distribuzioni ottenute in altre località rispettivamente del centro e del nord Italia. Il valore medio delle frequenze oscilla attorno ai valori  $0,56 \div 0,60$  leggermente più alti di quelli della media nazionale, come risulta particolarmente dai mesi della stagione estiva, ma non eccezionali se confrontati con quelli di altre località dell'isola.

---

<sup>22</sup> Il metodo *Montecarlo* è nato durante lo sviluppo del progetto Manhattan a Chicago durante l'ultimo conflitto mondiale. Esso è un metodo statistico che associa alla densità di probabilità uniforme di numeri casuali le *storie di vita* che si intendono simulare, determinando *a posteriori* le frequenze dei casi favorevoli. Questo metodo richiede notevoli risorse di calcolo poiché per fornire risultati accettabili deve elaborare migliaia di casi in modo che, per la *Legge del Caso*, la frequenza di calcolo *a posteriori* tenda alla *probabilità matematica* definita, invece, *a priori*.

### Analisi delle frequenze

Con questa indagine si è inteso studiare la distribuzione dei valori dell'irraggiamento appartenenti all'intervallo  $0 \div 1000 \text{ W/m}^2$ , e suddiviso in passi da  $50 \text{ W/m}^2$ , nonché la distribuzione cumulativa di particolare interesse applicativo nel campo dei dispositivi di misura e conversione dell'energia solare. Di ogni stagione è riportato il grafico delle frequenze puntuali e cumulative.

È immediato notare come l'area coperta dal diagramma si sposta verso le soglie più alte al progredire dei mesi verso le stagioni calde, mentre la curva delle distribuzioni annuali (fig. 81) approssima ottimamente una gaussiana.

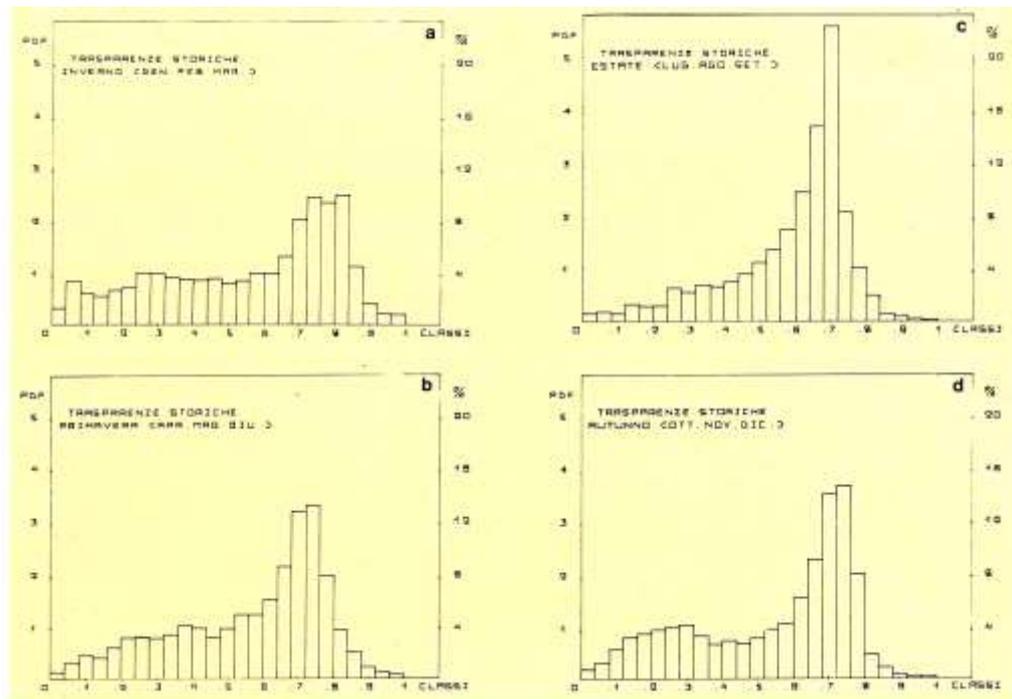


Figura 57: Trasparenze storiche nella varie stagioni a Catania

La generazione delle sequenze simulate: Metodi di previsione stocastica delle sequenze di insolazione. I metodi per la previsione teorica della radiazione solare globale vengono classificati come *deterministici* e *probabilistici*. I primi sono costruiti da sequenze di valori medi desunti da analisi statistica dell'insolazione in lunghi periodi (generalmente un ventennio).

L'anno solare così costruito viene detto "*anno di riferimento*" (*Reference Year*) per quella località o territorio e determinato con diversi passi temporali (mensili, settimanali, giornalieri, orari). Per quanto, però, di grande affidabilità e significatività dal punto di vista statistico, le sequenze di insolazione restano definite una volta per tutte e fissate in forma rigidamente deterministica senza alcuna informazione sulla casualità del fenomeno attinometrico che ne costituisce, invece, un aspetto caratteristico.

Il recupero della aleatorietà del dato di insolazione viene realizzato con l'adozione di metodi probabilistici, tipicamente il metodo Monte Carlo, previa conoscenza dei due parametri statistici fondamentali del periodo da simulare: la media  $m$  e lo scarto quadratico medio  $s$  utilizzati nella relazione  $I = m + x s$ , dove  $x$  è una variabile casuale normale compresa, di solito, nell'intervallo  $-0,2 \div +0,2$ .

Le sequenze così generate riproducono le fluttuazioni statistiche che si potrebbero osservare sperimentalmente, potendosi con uguale probabilità verificare periodi di alto come di basso soleggiamento.

Il limite tuttavia insito in questo metodo risiede nella mancanza di correlazione tra un dato ed i precedenti, quando l'osservazione sperimentale dichiara invece la forte dipendenza delle condizioni del cielo, in un certo istante, dalle vicende meteorologiche precedenti.

Per superare questo limite e per esprimere il grado di correlazione tra dati successivi di insolazione è stato studiato il modello *ARMA* ( $m, n$ ) (*Auto Regressive Moving Average*) che consente di predire la trasparenza del cielo in un istante  $t$  tramite una combinazione lineare di  $m$  precedenti valori di  $T$  e degli  $n$  precedenti valori della variabile *random*  $V$ , secondo una relazione del tipo:

$$T_i = \sum_{i=1}^n a_i T_{t-i} + \sum_{j=1}^m b_j V_{t-j} + V_t$$

dove  $a_i$  e  $b_j$  sono costanti definite in funzione del coefficiente di correlazione, mentre il numero dei termini  $m$  ed  $n$  viene scelto in base ad altre grandezze statistiche.

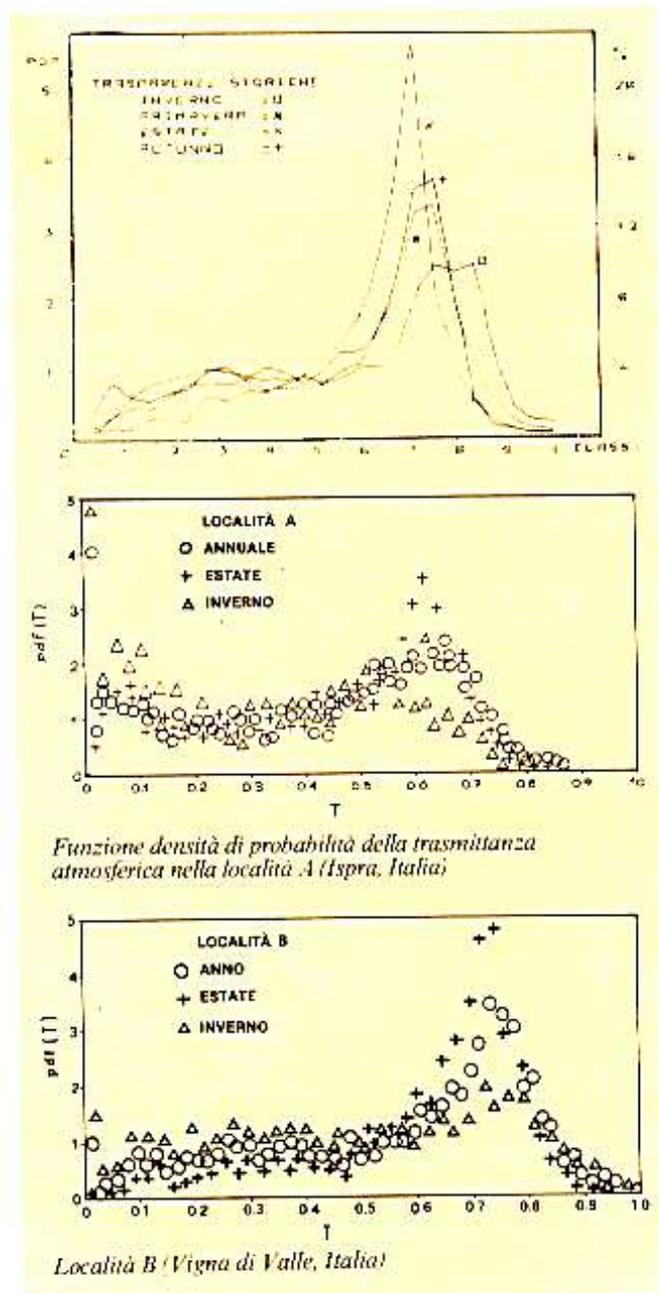


Figura 58: trasparenze in varie località

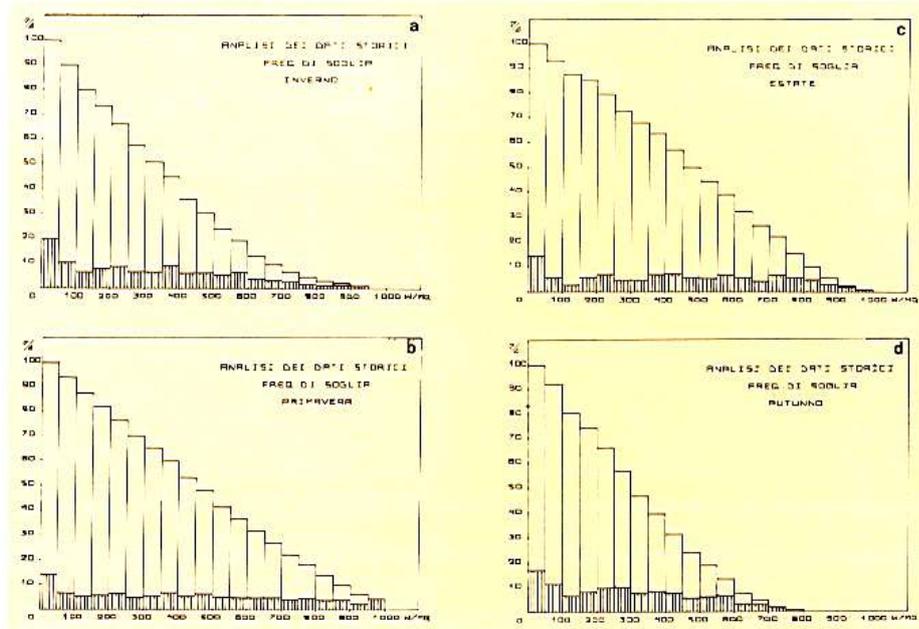


Figura 59: Analisi delle frequenze di soglia nelle varie stagioni a Catania

Il metodo, ottimo per la previsione di distribuzioni normali, non ha, tuttavia, dato risultati soddisfacenti in quanto quella delle trasparenze sperimentali non è una distribuzione *normale*<sup>23</sup> ma, come già visto, *bimodale*.

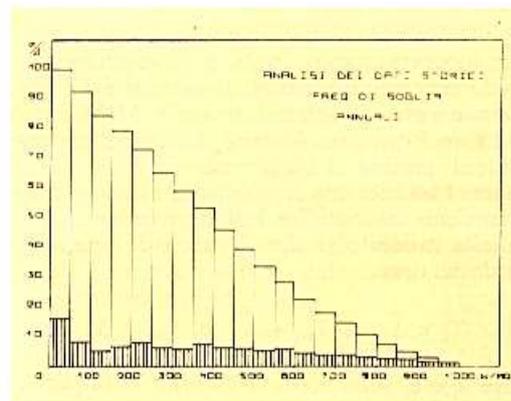


Figura 60: Frequenze di soglia storiche a Catania

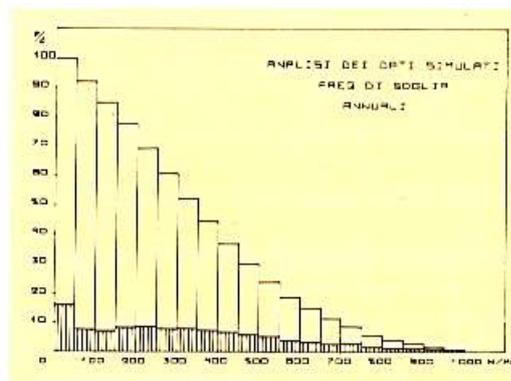


Figura 61: Frequenze di soglia simulate a Catania

È stato quindi elaborato il metodo della matrice autoregressiva o matrice di Markoff col quale ci si limita a correlare un dato con quello immediatamente precedente, mediante un

<sup>23</sup> Una distribuzione dicesi *normale* quando segue la distribuzione gaussiana e quindi con un solo massimo (*modo*).

procedimento che fa dipendere la variabile *random*  $V_t$  dalla trasparenza  $T_{t-1}$ . Il risultato è la costruzione di una matrice quadrata sulla base dei dati sperimentali di insolazione e tale che i suoi elementi  $p_{ij}$  esprimono la probabilità di transizione della trasparenza del cielo dallo stato  $i$  allo stato  $j$ . Si è infine tentato di generalizzare questo modello in modo da includere, nella determinazione della trasparenza del cielo in un certo istante,  $n$  stati precedenti: il risultato è stato il metodo TTT (*Transmittance, Transition, Tensor*) che definisce una matrice tridimensionale il cui tensore  $p_{ijk}$  esprime la probabilità che ha il cielo di passare allo stato  $k$ , essendo al presente allo stato  $j$  e, nell'istante precedente, allo stato  $i$ . È stato dimostrato che una tale generalizzazione non apporta essenziali miglioramenti al modello di *Markoff*, che resta pertanto il più semplice e rappresentativo modello di previsione stocastica applicato alle condizioni attinometriche.

La statistica insita nella matrice di *Markoff* consente, pertanto, di generare un numero qualsivoglia di anni casuali e di riprodurre ancora il grado di correlazione tra diverse sequenze di insolazione. Di particolare rilievo risulta poi questa proprietà, essendo fondamentale la conoscenza del succedersi delle sequenze di basso ed alto soleggiamento, per esempio nelle applicazioni connesse con l'accumulo dell'energia solare a breve e medio termine ed in generale con tutti i processi caratterizzati da un funzionamento "a soglia". Descriviamo qui il metodo seguito per la compilazione della matrice di *Markoff*, sulla base dei dati raccolti di soleggiamento nel territorio di Catania, per la generazione di un anno medio (risultato dalla media statistica di 10 anni di simulazioni) nonché lo studio delle principali proprietà statistiche quali la funzione densità di probabilità, frequenza cumulativa, valori medi e deviazioni standard della trasparenza del cielo dell'anno così ricostruito.

### Descrizione dell' algoritmo per la generazione della matrice di *Markoff*

L'algoritmo utilizzato, di tipo iterativo, consente di generare una matrice quadrata che precedenti studi hanno dimostrato opportuno definire di dimensioni 25 x 25 e che consiste nel sommare una unità a quell'elemento di matrice  $a_{ij}$  i cui pedici sono dati dalla classe di appartenenza di due trasparenze successive; ad ogni ciclo l'indice riga è posto uguale all'indice colonna precedente e tale procedura è ripetuta fino all'esaurimento dei valori disponibili.

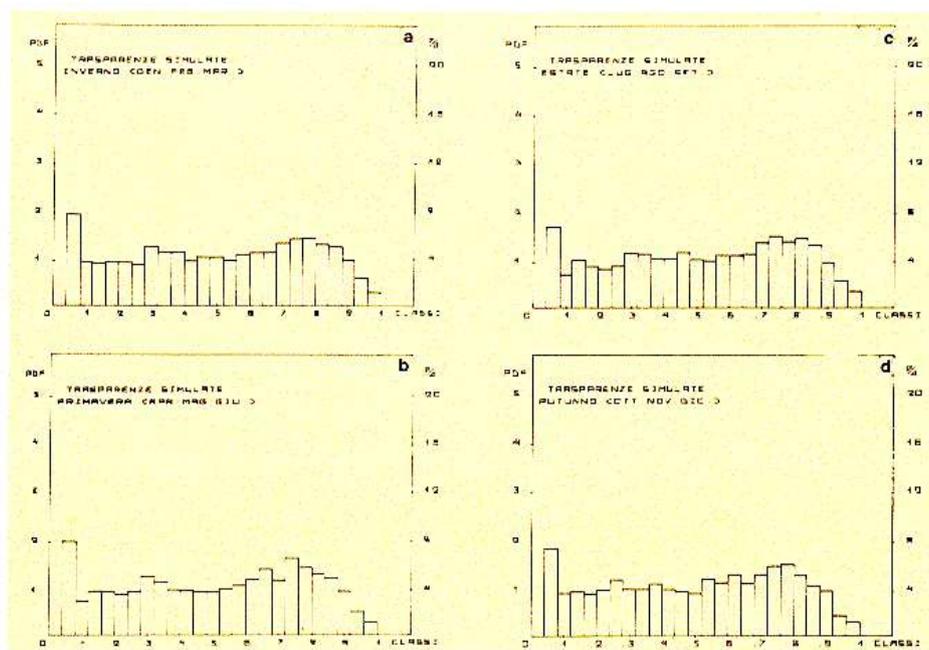


Figura 62: Analisi dei dati simulati - Frequenze di soglia nelle varie stagioni a Catania.

La matrice così ottenuta viene normalizzata e sottoposta alla verifica di *ergodicità* (o convergenza), che consiste nel verificare se, moltiplicando  $n$  volte la matrice per sé stessa, risulta:

$$|a_{ij}^m - a_{ij}^{m-1}| < \varepsilon$$

per qualunque coppia  $(i,j)$  e per  $\varepsilon$  comunque piccolo. Dopo tale verifica la matrice (*normalizzata*) è definita "*Matrice di Transizione Autoregressiva*" e può essere utilizzata per la generazione delle sequenze casuali. L'algoritmo utilizzato a questo scopo prevede l'estrazione di un numero *random*, che, moltiplicato per il passo di classificazione delle trasparenze, viene assunto come indice riga.

La trasparenza simulata viene assunta come l'indice colonna di quell'elemento della riga, prima individuata, tale che la somma degli elementi precedenti risulti non minore di un secondo numero *random* estratto. Ad ogni ciclo successivo verrà poi posto l'indice riga eguale all'indice colonna. La serie delle trasparenze simulate viene così a costituire una banca dati, i cui elementi, moltiplicati per l'irraggiamento extra-atmosferico, riproducono *l'anno casuale*, la cui statistica simula con ottima approssimazione l'anno storico originario.

### L'analisi statistica dell'anno casuale

Sull'anno casuale generato automaticamente sono state condotte le stesse indagini statistiche eseguite sui dati storici. Sono state in particolare studiate le curve di distribuzione delle trasparenze, classificate in 25 categorie di passo 0,04, e mostrate per tutte le stagioni dell'anno nelle figure 79, 80 e 81, nonché la curva di distribuzione complessiva dell'intero anno (fig. 82). Quest'ultima mostra un andamento quasi costante attorno ai valori medi e con larghi massimi attorno ai valori  $0,25 \div 0,35$  e  $0,7 \div 0,80$  che ne rappresentano i picchi modali.

La differenza tra l'andamento medio annuale dei dati storici e quello delle sequenze simulate è dovuta essenzialmente al fatto che trattasi di due situazioni non del tutto congruenti, risultando la prima dalla media di 10 anni e la seconda da un solo anno e particolarmente soleggiato. D'altra parte analoghe differenze sono visibili anche dal confronto di anni storici e simulati presso altre località da altri ricercatori, come risulta dalla figure 79 e 84.

### Considerazioni sui metodi statistici per l'analisi della radiazione.

Le considerazioni sopra esposte consentono di rimarcare una caratteristica importante della generazione markoffiana: anche se la statistica fondamentale si riferisce all'anno storico di base, gli anni simulati hanno variabilità statistica tale da avere, ad esempio, anni con insolazione particolarmente elevata o particolarmente bassa. Si ritiene, pertanto, che il metodo di simulazione fondato sulla tecnica delle catene di Markoff sembra essere oggi tra i più semplici ed affidabili strumenti di previsione applicati ai fenomeni atmosferici ed in particolare alla simulazione dell'irraggiamento solare, come d'altra parte dimostra la vasta letteratura oggi disponibile.

L'analisi qui condotta dimostra una larga congruenza tra la statistica dei dati simulati con quelli storici, tanto più se si osserva che i picchi e le singolarità dell'anno storico vengono attenuati verso i valori medi, consentendo così una rappresentazione più aderente alla situazione reale mediata su lungo periodo. Un vantaggio sostanziale del metodo della matrice di Markoff consiste infine nella possibilità di simulare un numero qualsivoglia di anni casuali, con variabilità statistica tale da avere per esempio periodi (o anni stessi) con insolazione particolarmente bassa o particolarmente elevata.

Quest'ultima considerazione risulta infine di notevole utilità per la progettazione di impianti solari, con particolare riferimento al problema del dimensionamento degli accumulatori di calore o della sorgente integrativa ausiliaria e comunque in tutte le applicazioni di processo caratterizzate da una soglia inferiore di funzionamento.

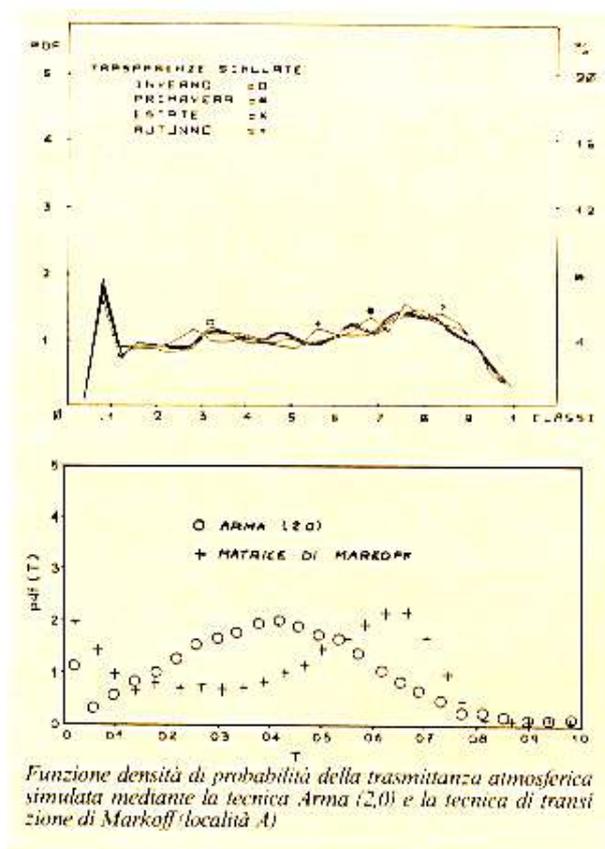


Figura 63: Funzioni di densità di probabilità della trasmittanza

### 3.2.3 NUVOLOSITÀ

La nuvolosità influisce notevolmente sul clima poiché modifica il rapporto tra la radiazione diretta e la radiazione diffusa per effetto dell'assorbimento e della diffusione delle molecole d'acqua costituenti le nubi. Durante le giornate nuvolose la radiazione globale ricevuta su una superficie comunque inclinata è quasi esclusivamente diffusa e pari al 5 ÷ 20 % di quella diretta. Pertanto l'irraggiamento totale si riduce notevolmente. Anche la *limpidità atmosferica* influisce sulle condizioni di soleggiamento. Questa è data dall'assenza di polveri o altri fattori inquinanti che assorbono la radiazione solare o che la modificano (ad esempio per scattering e per diffusione). Questo fattore è comunque legato molto alle condizioni locali, cioè alla presenza di ciminiere industriali, cave, vulcani, .... Nella Sicilia, ad esempio, la presenza di polveri vulcaniche o di sabbia sahariana riduce spesso la limpidezza atmosferica e quindi l'irraggiamento solare.

### 3.2.4 TEMPERATURA DELL'ARIA

La temperatura di un sito geografico dipende sia dall'irraggiamento atmosferico che dalle possibilità di scambi termici tra la terra e l'atmosfera. Infatti il bilancio globale di questo scambio dipende dalla dispersività dell'atmosfera, dalle correnti d'aria e dalla presenza di masse termiche. E' infatti osservabile da tutti come certe zone risultino più calde di altre, pur essendo vicini e apparentemente simili; in effetti esse differiscono per il versante, per la presenza di valli o di monti, per la geologia dei terreni, per la presenza di acqua in bacini o fiumi, ....

Le stagioni meteorologiche non dipendono solamente dalla lunghezza dei giorni ma risultano sfasate di uno-due mesi rispetto ai periodi di massima durata.

Ad esempio le condizioni di maggior caldo si hanno in Italia in agosto e non in giugno-luglio che pure hanno maggiore insolazione. Allo stesso modo le temperature minori non si verificano in corrispondenza del solstizio di inverno (21 dicembre) a gennaio-febbraio. A scala temporale più ridotta questo sfasamento avviene anche fra l'irraggiamento orario giornaliero e la temperatura oraria giornaliera: il massimo si ha dopo le 14 e il minimo si ha durante la notte o poco prima dell'alba.

### 3.2.5 MOVIMENTI D'ARIA

Se si osserva la distribuzione della radiazione solare netta (vedi figura 38) appare evidente che si ha un deficit della radiazione solare nelle zone di elevata latitudine ( $>70^\circ$ ) e un eccesso alle basse latitudini ( $<30^\circ$ ).

Ciò, tuttavia, non comporta un surriscaldamento delle zone intertropicali poiché si ha un riequilibrio termico operato dalle correnti d'aria (che trasportano circa i 4/5 dell'energia) e delle correnti marine (che trasportano l'altro 1/5 di energia restante). In pratica i flussi di aria e di acqua costituiscono un vero e proprio sistema di redistribuzione dell'energia, riscaldando le zone fredde e raffreddando quelle calde.

Del resto è sotto gli occhi di tutti l'azione calmieratrice del clima che la presenza del mare opera nelle zone costiere. Il clima mediterraneo si estende fin dove l'azione del mare mediterraneo si fa sentire.

Gli spostamenti di masse d'aria avvengono per effetto di differenze di temperatura fra zone diverse della Terra e per differenza di pressione (vedi figure 39, 40, 41, 42).

Nella maggior parte dei paesi dell'Unione Europea la velocità media del vento è di  $3\div 4$  m/s nelle zone costiere e  $2\div 3$  m/s nell'entroterra.

In Italia le direzioni di provenienza del vento risultano assai variabili e strettamente legati a fattori locali, quali l'orografia del terreno e la presenza di bacini d'acqua. Inoltre l'altimetria dei luoghi influenza notevolmente il regime dei venti a parità di latitudine.

### 3.2.6 UMIDITÀ DELL'ARIA

Questo fattore dipende dai meccanismi di evaporazione e traspirazione dovuti alla radiazione solare e ai gradienti termici dell'atmosfera. L'umidità influenza fortemente le condizioni di benessere termico: l'aria fredda e umida appare molto più fredda dell'aria a bassa umidità alla stessa temperatura.

Una percentuale di umidità ritenuta accettabile (vedi nel prosieguo le condizioni di comfort termico) deve essere compresa fra  $35\div 70$  %.

A causa dell'assorbimento della radiazione solare da parte del vapore acqueo (come già detto in precedenza) le zone più umide sono anche meno soleggiate e quindi più fredde.

L'umidità è spesso legata alle condizioni locali e quindi al microclima del sito geografico. A parità di latitudine e radiazione solare alcune zone sono più umide di altre e addirittura in alcuni si ha la formazione di nebbia e in altre no.

La presenza di precipitazioni e di nebbie condizionano notevolmente la progettazione degli edifici e deve essere presa in giusta considerazione dal progettista.



Nella figura 85 si ha la rappresentazione dello *strato limite dinamico*<sup>24</sup> ossia dello strato di fluido nel quale si ha variazione di velocità (cioè presenza di *gradiente*).

L'altezza di questa zona può variare da qualche metro a decine e anche centinaia di metri. E' per questa ragione che nelle terrazze di palazzi alti si sente molto più vento che nei piani bassi. Per lo stesso motivo occorre prevedere dei fattori correttivi per adeguare il calcolo dei carichi termici dei piani alti alla situazione di maggior ventosità e quindi di maggiori coefficienti convettivi esterni.

### 3.3.2 EFFETTI DI CORPI D'ACQUA

Le influenze che masse d'acqua possono esercitare sul microclima dipendono fortemente dalle dimensioni e dalla posizione di queste rispetto al vento. Sono più incisive i corpi d'acqua a monte del sito dove si riscontra, in genere un clima più mite e favorevole. La massa d'acqua esercita un'azione di moderazione sulle variazioni di temperatura a causa del maggior calore specifico rispetto a quello del terreno: ne deriva che l'acqua è più calda d'inverno e più fredda d'estate e pertanto le zone poste nelle vicinanze subiscono un effetto calmieratore sulle variazioni termiche locali, avendosi temperature minime più alte in inverno e temperature massime più basse in estate.

Se le masse d'acqua sono notevoli (mare o lago) si ha anche la formazione di brezze: durante il giorno, quando la terra è più calda, si ha un venticello verso la riva che di notte inverte di direzione essendo l'acqua più calda della terra.

### 3.3.3 EFFETTI DELLA VEGETAZIONE

La presenza della vegetazione induce, di norma, un aumento di umidità relativa ed una diminuzione di temperatura dovuta sia all'effetto dell'ombreggiamento che alla evapotraspirazione delle foglie che assorbono gran parte del calore incidente.

Questi effetti non sono da attribuire ad un singolo albero (a meno che non si viva al di sotto delle chiome) ma ad ampie zone di verde. L'effetto sulla temperatura e sull'umidità si risente in una zona tanto più vasta<sup>25</sup> quanto più è ampia la superficie arborea, anche in funzione degli ostacoli presenti (edifici, direzione delle strade, ostacoli di vario genere). Anche la copertura del terreno influenza le condizioni microclimatiche. Si è osservato, infatti, che un terreno erboso fa diminuire la temperatura contrariamente ad un terreno con copertura artificiale. Si tenga presente per quanto detto nel paragrafo 3.2.2, la natura del terreno influenza molto la radiazione riflessa (onde corte) da quest'ultimo. Infatti la radiazione su una superficie inclinata è data dalla relazione:

$$I_T = I_b R_b + I_d R_d + I_t R_t = I_b R_b + I_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + I_t \rho_t \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

e pertanto il fattore di riflessione del terreno  $\rho$  determina un contributo che può essere non trascurabile. Nella tabella seguente si riportano i fattori di riflessione per alcune tipologie di terreno.

<sup>24</sup> Lo *strato limite dinamico* rappresenta l'altezza a partire dalla parete entro la quale il fluido risente della presenza della parete e quindi la velocità varia da 0 al 99% della velocità massima non disturbata.

<sup>25</sup> Ricerche effettuate da Oke dimostrano un 66% del raffrescamento teoricamente possibile ricoprendo di verde la superficie urbana per un terzo della sua estensione e ciò solo ai processi di evapotraspirazione. Sono stati misurati riduzioni di 5.5 °C in una notte estiva e 1÷2 °C di giorno in vicinanze di zone di verde urbano.

Tipo di superficie	Fattore di riflessione
Terreno nudo, asciutto	0.10÷0.15
Terreno nudo, bagnato	0.08÷0.10
Sabbia asciutta	0.18÷0.30
Sabbia bagnata	0.10÷0.19
Terra nera, asciutta	0.13÷0.15
Terra nera, bagnata	0.06÷0.08
Roccia	0.11÷0.16
Erba secca	0.28÷0.35
Campi verdi	0.04÷0.16
Foglie verdi	0.20÷0.34
Foresta scura	0.04÷0.07
Deserto	0.22÷0.30
Laterizio (in funzione del colore)	0.22÷0.50
Asfalto	0.12÷0.15
Aree urbane	0.08÷0.12

Per contro le radiazioni termiche emesse dal terreno riscaldato (onde lunghe) dipendono dalle componenti radianti del terreno e devono essere considerate nel calcolo della temperatura media radiante e della temperatura operante (vedi capitolo sul comfort termico).

Ad esempio, con una temperatura dell'aria esterna di 37 °C l'asfalto può fare innalzare la temperatura per effetto dell'irraggiamento proprio di 5 °C; la temperatura superficiale di questo varia dai 47°C ai 62 °C (con aria esterna a 47°C) e con punte massime di ben 72 °C.

### 3.3.4 EFFETTI DELL'EDIFICATO URBANO

Un agglomerato urbano influenza il microclima esterno<sup>26</sup> in quanto modifica tutti i fattori microclimatici prima accennati: radiazione solare, il regime dei venti, la temperatura dell'aria esterna e l'umidità relativa.

Lo studio dell'evoluzione climatica urbana può oggi essere effettuato mediante sofisticati e complessi modelli di calcolo che simulano l'evoluzione di tutti i fenomeni igro – termo - fluidodinamici interessati dall'area urbana.

La temperatura è mediamente più elevata, anche in considerazione della presenza di asfalto nella pavimentazione stradale, e l'umidità relativa più bassa rispetto alle zone rurali circostanti.

Nella figura 85 è visibile l'azione esercitata dall'area urbana sullo strato limite generato dalle correnti d'aria. Gli edifici creano turbolenza ed effetti di canalizzazione del vento che, a sua volta, influenza la temperatura dell'aria fino ad annullare gli effetti dell'*isola di calore* tipica degli agglomerati urbani.

La velocità limite per la quale questa rottura avviene può essere calcolata da una semplice relazione che è funzione del numero di abitanti della città:

$$V_{critica} = -11.6 + 3.4 \text{Log } P$$

<sup>26</sup> La scienza che si occupa di questo fenomeno è detta *Climatologia urbana* che esula dal contesto di questo corso.

Inoltre la differenza di temperatura fra la città (calda) e la campagna circostante (fresca) genera una brezza detta *brezza di campagna*.

### 3.3.5 INFLUENZA DEL RAPPORTO DI FORMA E DEL RAPPORTO SUPERFICIE-VOLUME

L'evoluzione dell'Architettura è stata profondamente dettata dal rapporto intimo edificio-ambiente. La scelta dell'involucro esterno dell'edificio deve sempre più rispondere ad esigenze funzionali (energetiche, illuminotecniche, acustiche, ...) oltre che estetiche.

Le disposizioni di legge sul consumo energetico negli edifici (Nuovo DM 26/06/2015) hanno legato il fattore di forma  $S/V$  ai parametri prestazionali ( $H'_T$ ,  $EP_H$ ,  $EP_C$ ,  $\eta_H$ ,  $\eta_g$ , ...) funzioni, a loro volta, delle condizioni climatiche esterne. Il rapporto edificio-ambiente influisce fin dall'inizio nella progettazione dell'edificio: un clima esterno mite favorisce l'apertura degli spazi interni verso l'esterno (le antiche corti, i patii, ... sono segni in questa direzione) mentre un clima ostile induce alla chiusura dell'involucro esterno, verso una forma più protettiva dell'ambiente interno.

In pratica si instaura, anche inconsciamente, un rapporto di *causa-effetto* che condiziona l'interazione delle forze fisiche con la forma architettonica: una conoscenza delle forze fisiche contribuisce a meglio modellare la forma e viceversa una buona modellizzazione architettonica consente un migliore controllo delle forze fisiche. Esiste (o meglio, dovrebbe esistere) una simbiosi fra ambiente ed edificio così come succede fra mondo vivente e la natura: gli organismi edilizi dovrebbero evolvere con l'ambiente alla ricerca della migliore forma possibile, così come le specie vivente si evolvono ricercando il migliore adattamento con la natura.

La forma ottimale per un edificio non può mai essere determinata se non si fissano tutte le variabili in gioco sia del microclima esterno che delle caratteristiche termofisiche delle pareti. Per ciascuna zona climatica si può pensare di determinare un rapporto di forma ottimale che riducano al massimo il bilancio energetico dell'edificio. Uno studio del genere è stato affrontato da Victor Olgyay che è pervenuto ai risultati illustrati nella figura seguente. In essa si hanno i rapporti ottimali per le quattro zone climatiche: fredda, temperata, caldo secco e caldo umida.

Le considerazioni che si possono fare sono qui riassunte (vedi figura 86 e 87):

- Nelle zone fredde è meglio avere piante di forma più regolare quadrata che allungata: il rapporto ottimale è di circa 1:1.1.
- Nelle regioni temperate si possono avere edifici allungati e in genere di forma più libera: il rapporto ottimale è 1:1.6 e quindi di forma rettangolare allungata lungo l'asse est-ovest.
- Nelle regioni con caldo secco si potrebbe pensare di avere una pianta allungata in inverno ma le condizioni estive consigliano una forma più compatta con rapporti di forma ottimali pari a 1:1.3.
- Nelle regioni caldo umide è opportuno avere un edificio di forma allungata, sempre lungo l'asse est-ovest, con rapporti di forma ottimali pari a 1:1.7. Si possono avere *pilotis* per favorire la ventilazione. L'uso di piante libere è possibile ma occorre prevedere ripari ombreggianti e schermanti.

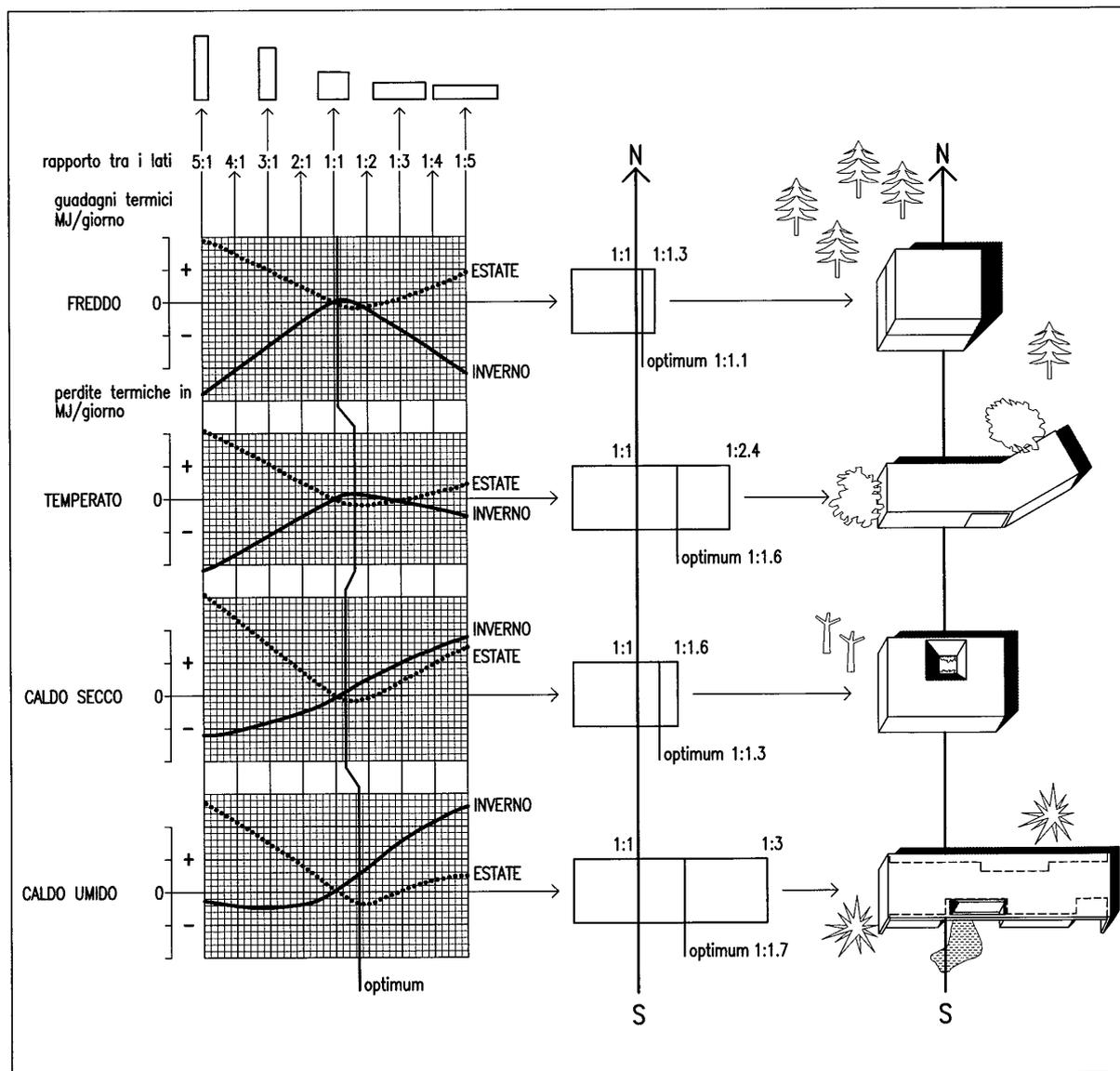
Inoltre occorre tener presente alcune regole pratiche che così possiamo sintetizzare:

- E' sempre opportuno orientare l'asse principale lungo la direttrice est-ovest per avere una maggiore efficienza energetica.
- La pianta a base quadrata non sempre risulta vantaggiosa e conviene avere un allungamento lungo la direttrice est-ovest.

Il rapporto superficie-volume è fondamentale nelle regioni fredde<sup>27</sup> al fine di ridurre le perdite di calore verso l'esterno. E in questo senso la L. 10/91 ne limita i valori massimi in funzione delle zone climatiche e della destinazione d'uso.

Un rapporto basso comporta un edificio *chiusi* e quindi poco comunicante con l'esterno mentre, al contrario, un rapporto più elevato consente un maggior movimento delle forme e pertanto anche una maggiore penetrazione e comunicazione con l'ambiente esterno.

Molta importanza riveste la superficie vetrata nelle pareti esterne. Un uso smodato di questa (e con vetri di elevata trasmittanza) può portare contraccolpi notevoli sul rapporto di forma S/V poiché le perdite di calore tendono a crescere notevolmente<sup>28</sup> e pertanto per compensare questo effetto occorre agire sull'isolamento delle pareti, sul rapporto S/V e quindi sull'architettura dell'edificio stesso.



45

<sup>27</sup> Vedasi l'igloo degli esquimesi che ha il miglior rapporto superficie-volume per ridurre al massimo le perdite di calore verso l'esterno.

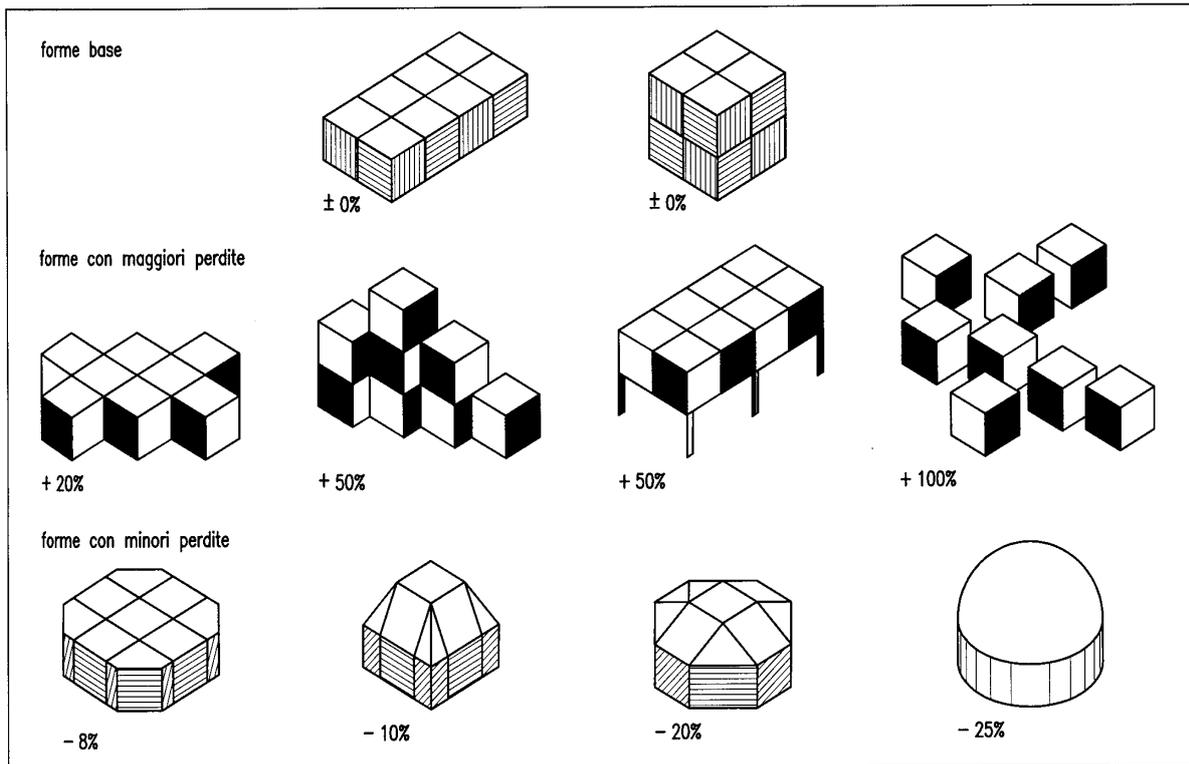
<sup>28</sup> Se consideriamo una parete isolata avente una trasmittanza  $K=0.35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ed una parete vetrata con  $K=7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  si vede che  $1 \text{ m}^2$  di vetrata equivale a  $20 \text{ m}^2$  di parete isolata. L'uso di vetri doppi porta la trasmittanza del vetro a valori variabili, a seconda dello spessore delle lastre vetrate e dell'intercapedine d'aria, fra  $3.5 \div 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  e quindi  $1 \text{ m}^2$  di vetrata equivale a  $10 \div 15 \text{ m}^2$  di parete esterna. Si intuisce quindi il peso grandissimo che le vetrate hanno ai fini della riduzione del bilancio energetico degli edifici.

Figura 65: Rapporti di forma ottimali per le quattro zone climatiche.

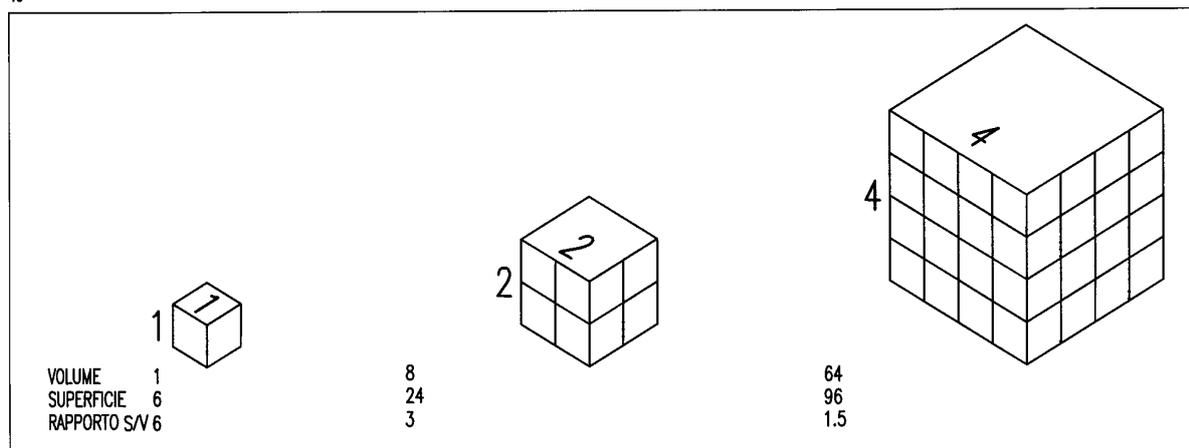
Va tenuto presente che l'effetto del *volume* degli edifici si riflette spesso sui carichi termici (sia estivi che invernali). L'ASHRAE pubblica sul suo **Fundamentals Handbook** alcuni dati sui carichi di edifici monofamiliari e multipiano.

Il risultato è che gli edifici monofamiliari hanno carichi termici molto più elevati rispetto a quelli multipiano, con percentuali variabili fra il 60 e il 90%.

Pertanto si può anche dire che un maggior volume, a parità di condizioni esterne, porta spesso ad avere più compattezza dell'edificio ed una migliore risposta alle sollecitazioni termiche esterne.



46



47

Figura 66: Influenza dei rapporti di superficie e volume sui disperdimenti termici

### 3.3.6 INFLUENZA DEL CLIMA SULLA DENSITÀ URBANA

Quanto detto per il singolo edificio vale anche, con le opportune considerazioni, per il tessuto urbano. Le condizioni climatiche esterne condizionano fortemente la struttura urbana delle città o degli agglomerati in genere.

**I climi freddi favoriscono spazi relativamente ampi per consentire una migliore cattura della radiazione solare mentre, al contrario, un clima caldo torrido favorisce la formazione di celle chiuse che portino ad una riduzione degli effetti del soleggiamento e quindi ad una maggiore ombreggiatura.**



*Figura 67: Effetti del clima caldo torrido sulla densità urbana*

In figura 88 si ha un esempio di città algerina che riassume il concetto sopra espresso: le strade sono strette e spezzate o curve e gli edifici sono addossati per favorire la formazione dell'ombra.

In genere nelle *zone fredde* il tessuto urbano è favorevole ad insediamenti isolati e riparati, nelle *zone temperate* si favorisce un insediamento aperto che si fonde con l'ambiente esterno, in *zone caldo secche* si hanno tessuti densi e chiusi per meglio difendersi dall'irraggiamento solare e nelle *zone caldo umide* si hanno edifici allungati per favorire la ventilazione e quindi il tessuto urbano diviene piuttosto articolato.

## 3.4 CARATTERIZZAZIONE CLIMATICA DEL TERRITORIO

L'influenza del clima sull'Uomo e su tutte le attività umane è indiscussa. Da Aristotele a Montesquieu e T. di Lampedusa, molti studiosi di tutti i tempi hanno convenuto che il clima ha effetti determinanti sugli aspetti fisici e psichici degli individui; ha relazione con l'eredità razziale e

lo sviluppo culturale e dappertutto ha condizionato la civiltà umana. Non per niente la civiltà si è sviluppata originariamente nelle zone a clima temperato (bacino del Mediterraneo), vedansi gli egizi, i greci, i romani e le civiltà europee in genere. Questa dipendenza della vita dal clima è vera anche a livello animale e vegetale. Le principali differenziazioni di piante e animali sono dovute essenzialmente al contesto climatico di appartenenza<sup>29</sup>.

E' sotto gli occhi di tutti che la previsione delle condizioni climatiche e meteorologiche risultano vitali per numerose attività umane: la pesca, l'agricoltura, la navigazione, l'aviazione, ....

Anche l'Architettura, per che riguarda in particolare la risposta termica dell'edificio ovvero il comportamento energetico degli stessi, è legata fortemente alle condizioni climatiche. Pertanto per eseguire una corretta previsione del clima occorre **caratterizzarlo**. Ciò si attua, come già detto, individuando le grandezze fisiche di interesse capaci di descriverne compiutamente l'evoluzione temporale e la dipendenza spaziale. In pratica si utilizzano le seguenti variabili: velocità del vento, umidità relativa, temperatura esterna, radiazione solare. Vediamo adesso l'influenza di ciascuna di queste variabili sulla caratterizzazione del clima.

### 3.4.1 VELOCITÀ DEL VENTO

Questa variabile ha interesse sia in ambito strutturale (resistenza della struttura all'azione del vento) che in ambito energetico. Da essa dipendono, infatti:

- le infiltrazioni d'aria negli edifici; queste comportano sempre (sia in estate che in inverno) un aggravio al *carico termico* in quanto richiedono trattamenti termo-igrometrici dell'aria aggiuntivi.
- i coefficienti convettivi sulle pareti esterne: essi dipendono dalla velocità del vento  $V$  secondo relazioni (in parte già indicate nel paragrafo 2.3.9 (Metodi di calcolo del coefficiente di convezione termica) del tipo:

- pareti scabre:  $h_e = 10.75 + 1.2V$  con  $V$  in [m/s] ed  $h$  in [W/(m<sup>2</sup>K)];

- pareti vetrate:  $h_e = 8.21 + 0.08V - 0.0024V^2$  con  $V$  in [m/s] ed  $h$  in [W/(m<sup>2</sup>K)].

Il regime di vento modifica fortemente il comportamento termico degli edifici. Ad esempio in figura 87 possiamo vedere la formazione degli strati limiti di velocità in una zona edificata. Si osservi come procedendo da sinistra verso destra (cioè dalle zone periferiche rurali verso il centro città) si abbiano gradi di protezione dal vento crescenti. L'azione di schermatura degli edifici (vedi dopo) si amplifica man mano che il vento si addentra nella città. La presenza di un edificio alto in una zona edificata con edifici bassi provoca una turbativa del microclima fino ad una distanza pari all'altezza dell'edificio, vedi figura. La distribuzione degli edifici può creare effetti di turbolenza o di accelerazione (effetto *Venturi*). Ad esempio, in figura successiva sono visibili sia gli effetti dei pilotis che quello di accelerazione provocato dal restringimento della sezione di passaggio dell'aria per effetto di edifici posti in restringimento della sede stradale.

Nella stessa figura si può osservare l'effetto di canalizzazione dell'aria provocato dalla formazione degli allineamenti stradali degli edifici. Questo effetto esalta la velocità dell'aria rispetto al movimento che si avrebbe in zone libere.

Nella figura seguente si mostra come la presenza di edifici (abitazioni in centri urbani) modifica il microclima per effetto di riflessioni ridotte, alti assorbimenti e bassa vaporizzazione per la presenza di poca umidità rispetto alle zone rurali. Inoltre sempre in figura 92 si ha l'evidenziazione della formazione della cosiddetta *isola di calore* caratteristica delle grandi città e

<sup>29</sup> Si veda, a tal proposito, il testo di Olgyay: *Design with climate*.

che in pratica risulta dovuta alla scarsa capacità di disperdere il calore prodotto per radiazione e convezione negli strati alti dell'atmosfera, per mancanza di correnti d'aria. Anche la stratificazione termica nelle vallate può essere spiegata come l'azione di inversione termica prodotta dall'aria fredda che stagna in alto rispetto a quella calda che ristagna in basso.

Nella figura seguente si evidenziano i regimi di vento che si hanno nelle masse continentali (a Nord e a Sud), nella vallate e in vicinanza del mare.

Nelle figure successive si possono osservare gli effetti provocati dal vento sugli edifici: la zona frontale è sottoposta ad una sovrappressione mentre quella sottovento ad una depressione.

Gli edifici ad L causano formazioni di larghe zone d'ombra e di turbolenza nelle zone di depressione.

Inoltre la disposizione degli edifici in schiere può essere utilizzata per creare zone di depressione più ridotte. L'azione di schermatura degli edifici viene illustrata nella figura 95 dove si hanno sequenze di effetti provocati da edifici bassi verso edifici alti e viceversa.

#### **Azioni per la riduzione degli effetti di convezione termica indotti dal vento.**

Poiché il vento produce una migliore convezione termica nelle pareti esterne degli edifici si ha anche un maggiore disperdimento termico, nella stagione invernale. Per ridurre questi effetti indesiderati si possono adottare alcune azioni precauzionali.

- Limitare al massimo l'altezza degli edifici: gli edifici più bassi si comportano meglio di quelli alti anche per effetto della minore velocità del vento per effetto dello strato limite.
- Creare, ove possibile, barriere artificiali (edifici per deposito, magazzini, parcheggi, edifici industriali, ...) attorno all'edificio da schermare.
- Schermare gli edifici con barriere (anche arboree) per ridurre gli effetti del vento.
- Limitare le forme con tagli acuti: queste facilitano la vorticosità e quindi lo scambio convettivo esterno. Usare, quindi, forme arrotondate e senza spigoli vivi per ridurre i disperdimenti termici.

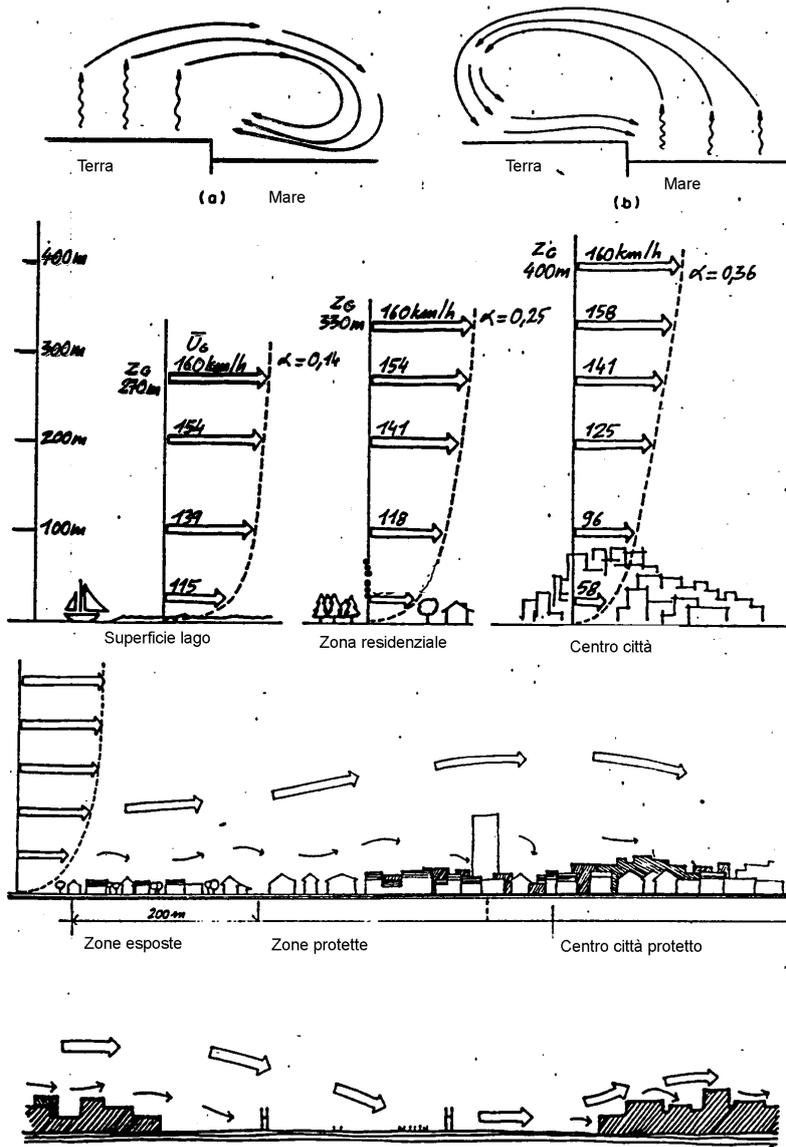


Figura 68: Profili di velocità in zone urbane. Effetti provocati dagli edifici.

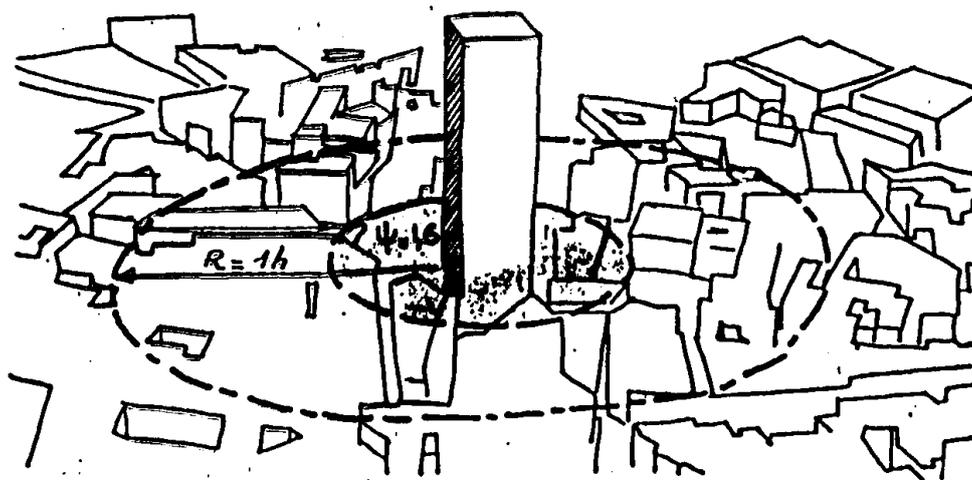


Figura 69: Effetti sul microclima provocati da edifici alti rispetto al tessuto urbano circostante

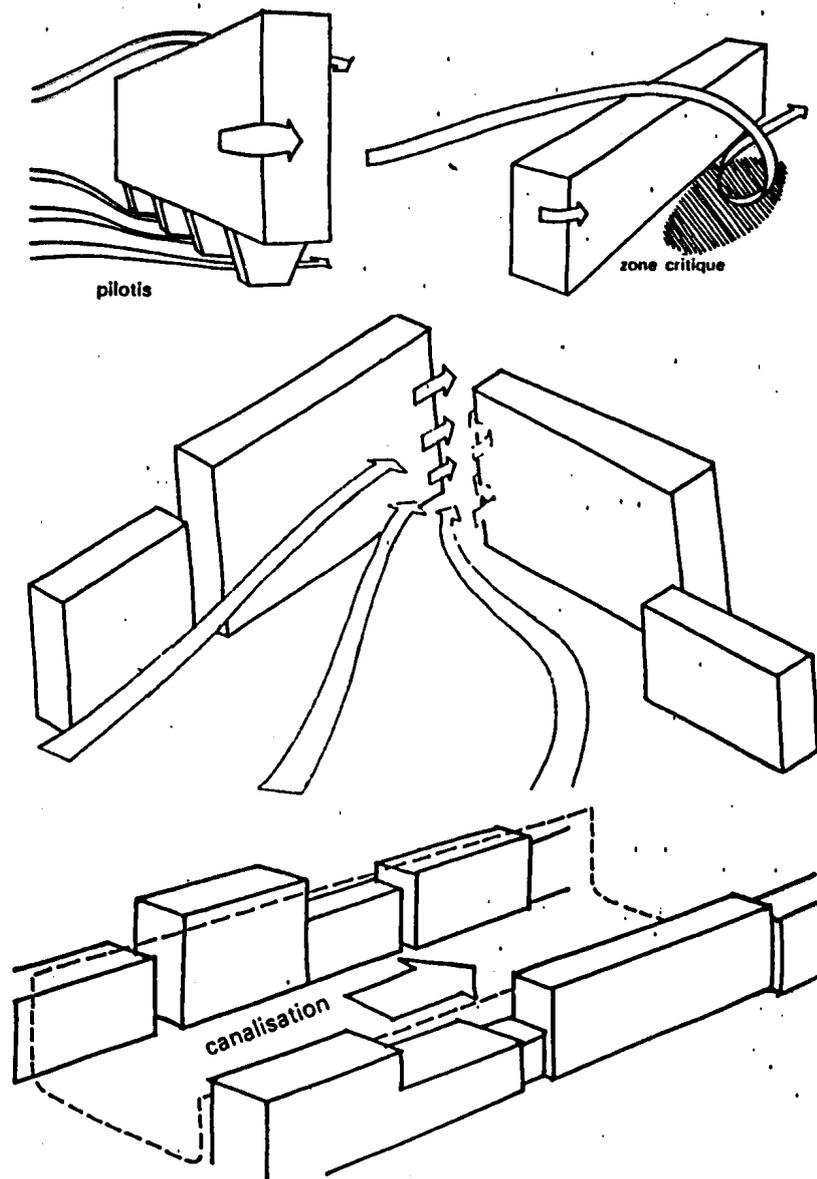
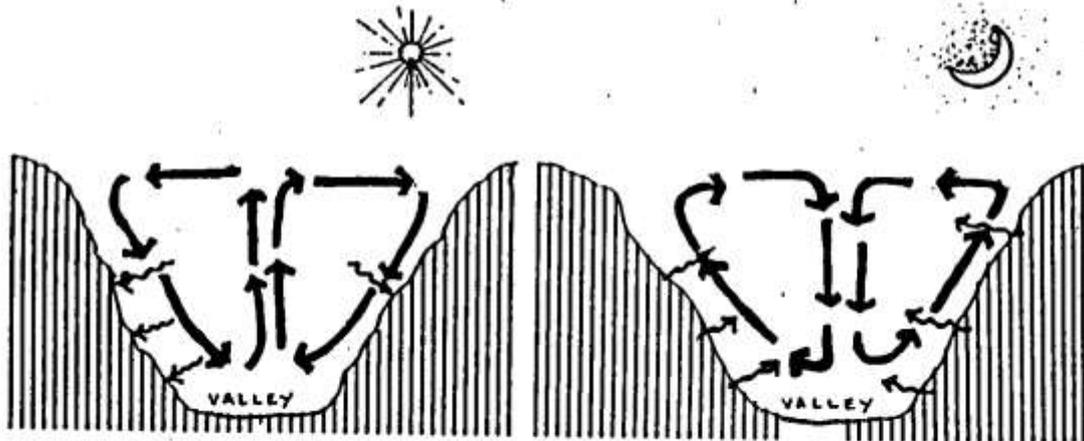
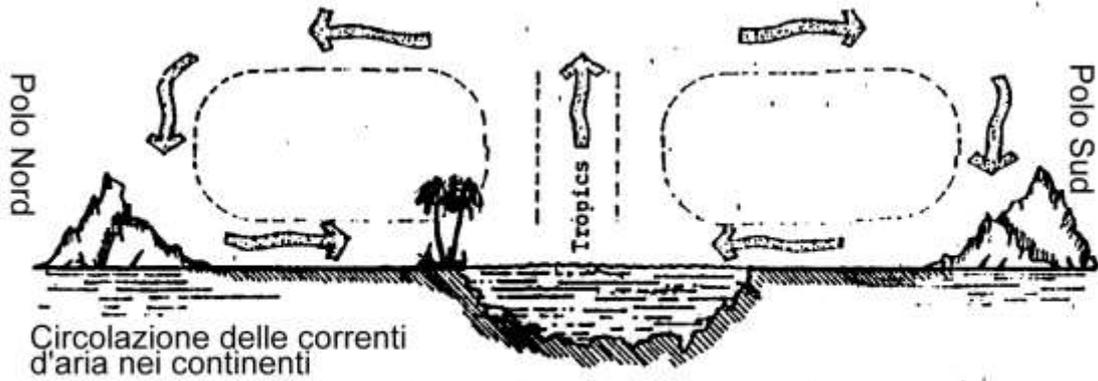


Figura 70: Effetti Venturi e di canalizzazione provocati dagli edifici

Le balconate agiscono come le alette e quindi facilitano lo scambio termico convettivo, pertanto in zone ventose è bene limitare le superfici aggettanti.

Un tessuto urbano compatto e denso agisce come trappola per il vento e quindi favorisce la schermatura degli edifici. Per contro rimane il problema di smaltire l'inquinamento atmosferico che, al contrario, il vento porta via diluendolo negli strati alti dell'atmosfera.



Nelle vallate i flussi d'aria sono katabatici (verso il basso) di giorno e anabatici di notte (verso l'alto) nelle zone laterali a contatto con le pareti. Naturalmente ogni variazione di flusso laterale modifica il modello indicato.  
 Per effetto del diverso calore specifico della terra e del mare si ha un diverso accumulo di energia che condiziona il regime delle brezze che vanno dal mare alla terra di giorno e dalla terra al mare di notte.

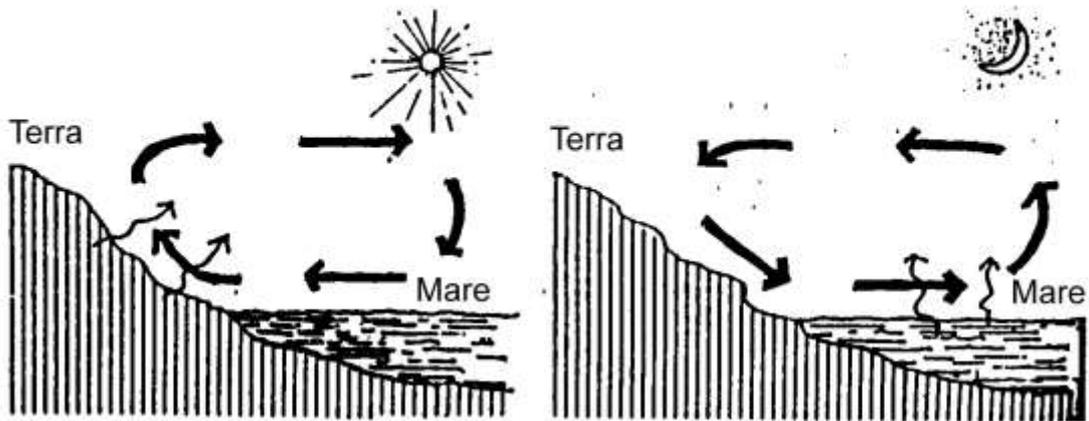
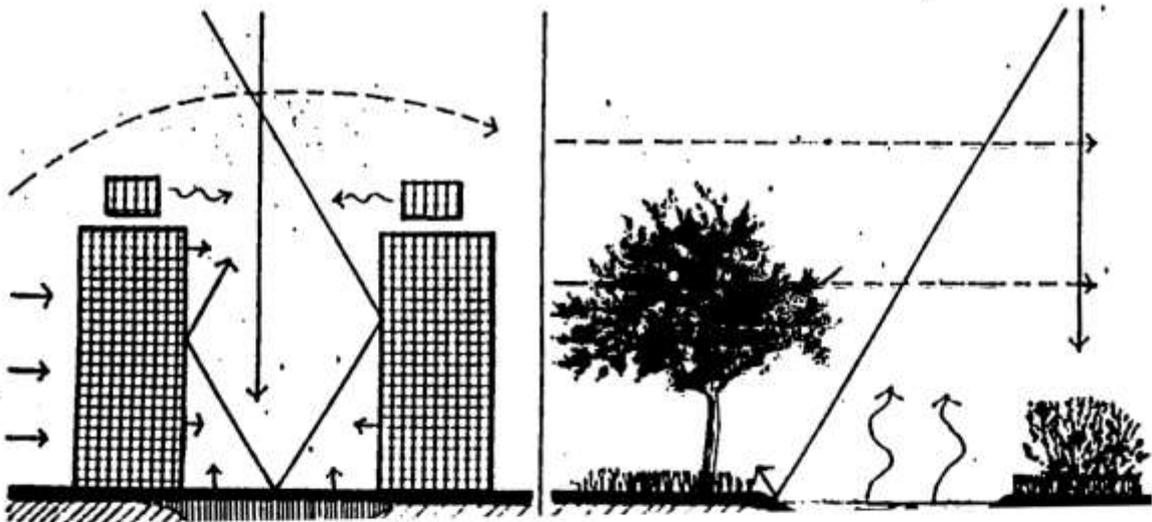
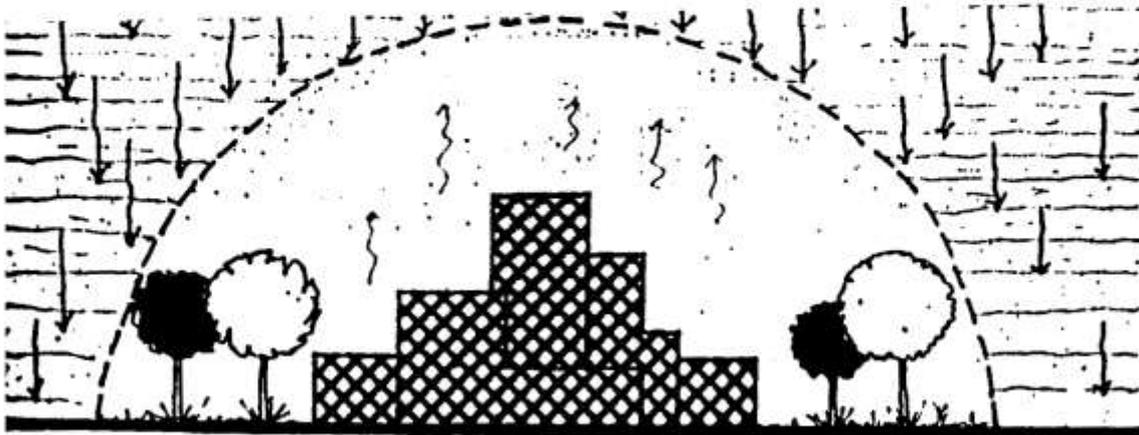


Figura 71: Circolazione dell'aria nei continenti. Brezze marine



Il modello di circolazione dell'aria dipende dalle differenze fra aree urbane e rurali. Nelle aree urbane si ha, solitamente: riflessioni multiple, alti assorbimenti delle superfici, basse umidità relative e quindi basso assorbimento di calore latente per la vaporizzazione, aria stagnante, particelle nell'aria che causano ritenzione termica. Nelle aree rurali si ha un'elevata possibilità di riflessioni, umidità che assorbono calore latente per la vaporizzazione, raffreddamento prodotto dalla vegetazione, aria pulita. Inoltre nelle città l'effetto di schermatura non omogeneo provoca l'instaurarsi di profili di velocità complessi.

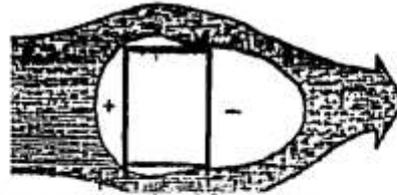
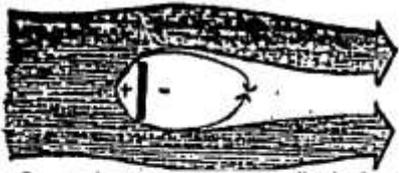


Nella figura sopra si evidenzia l'isola di calore che si forma nelle città per effetto della mancanza di ventilazione e dell'inversione termica.

In basso si ha l'effetto di stagnazione provocato dalla vallata circondata da monti: l'aria sovrastante impedisce a quella sottostante di muoversi.



Figura 72: Effetti degli edifici- Isole di Calore e Pozzi termici.



Quando una corrente d'aria in moto incontra un ostacolo si forma una regione di alta pressione nella zona di impatto ed una zona di bassa pressione nella zona posteriore (in direzione del vento).  
 Nelle figura sopra e sotto si hanno le indicazioni delle zone di sovra e sottopressione in vari casi. Si osservi il notevole effetto di turbolenza provocato da edifici a forma di L. File di edifici disposte linearmente portano alla formazione di zone di depressione multiple. File di edifici inclinate portano ad avere zone di turbolenza nelle zone mascherate.

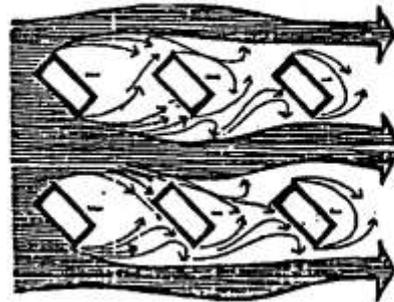
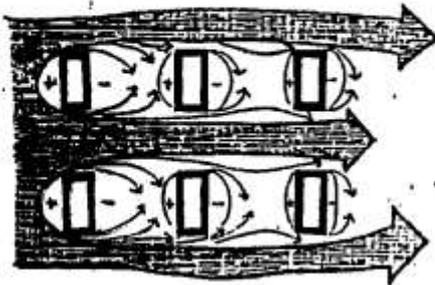
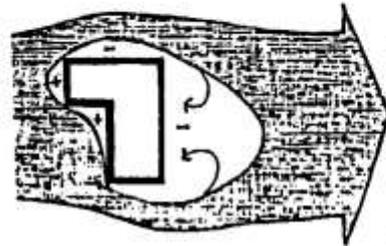
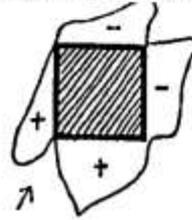
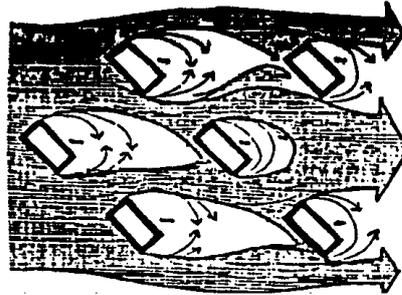
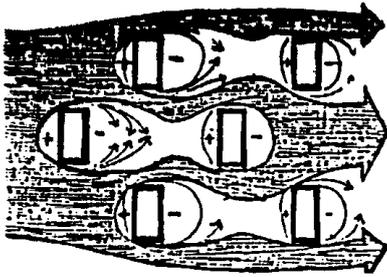
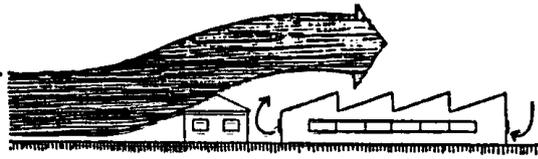
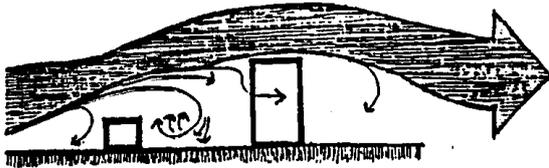


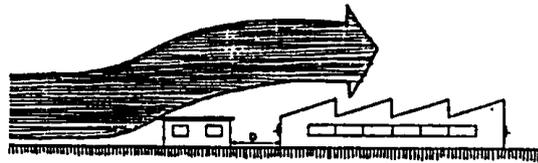
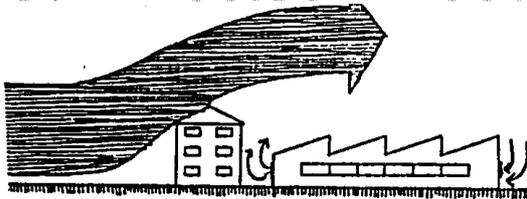
Figura 73: Formazione delle zone di sovra e sotto pressione



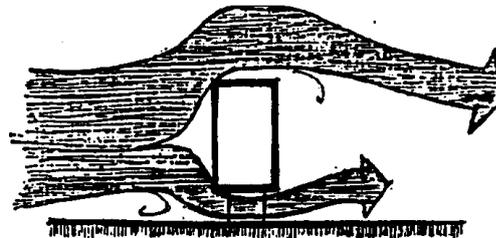
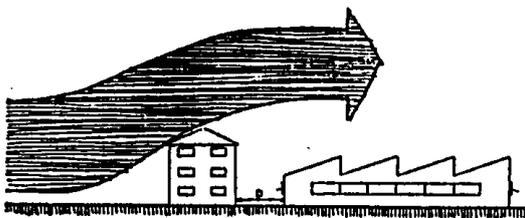
Edifici sfalsati riducono le aree di ombra e di bassa pressione



Un edificio basso prima di uno alto provoca turbolenza fra i due.  
Una costruzione bassa può prevenire gli incrementi di pressione.



Se la distanza fra due edifici è piccola, una costruzione alta può indurre un miglior movimento dell'aria del caso opposto a causa della maggiore intensità della pressione ridotta oltre la costruzione più elevata.  
Se l'ostacolo è basso si ha una migliore circolazione dell'aria incrementando la distanza fra gli edifici.



Se si ha una costruzione elevata e la distanza fra gli edifici è piccola un incremento della distanza provoca una riduzione iniziale del movimento dell'aria nell'edificio mascherato.  
Se si solleva una costruzione (piloti) si ha una riduzione della pressione positiva nella facciata frontale ed un flusso addizionale sotto l'edificio.

Figura 74: Effetti di schermatura provocati dagli edifici

### 3.4.2 UMIDITÀ RELATIVA

L'umidità relativa influenza sia il tipo di trattamento termo-igrometrico che la dimensione delle batterie<sup>30</sup> di scambio termico preposte allo scopo. Se la  $\varphi_e$  è bassa (clima desertico caldo-secco) occorre umidificare l'aria trattata da inviare negli ambienti e ciò risulta relativamente facile poiché è sufficiente spruzzare sull'aria stessa, in controcorrente, dell'acqua<sup>31</sup> in goccioline finemente suddivise.

Se l'umidità relativa è elevata (ad esempio nelle zone equatoriali e sub tropicali con clima caldo-umido) occorre deumidificare l'aria da immettere negli ambienti e questa operazione risulta più complessa e costosa dell'umidificazione perché richiede impianti particolari e la necessità di produrre il freddo<sup>32</sup>. In genere le portate d'aria sottoposte a trattamento sono relativamente modeste per impianti di condizionamento a *tutt'aria*<sup>33</sup> a *ricircolo*. Infatti in questi casi si ha che solo il 20÷15% della portata di ventilazione è presa dall'esterno e quindi risulta trattata *ex novo*.

### 3.4.3 RADIAZIONE SOLARE E TEMPERATURA ESTERNA

L'influenza della radiazione solare e della temperatura esterna può facilmente essere evidenziata osservando l'espressione del carico termico ambientale (cioè del bilancio energetico) che, per il solo calore sensibile, risulta dato da:

$$Q_{Fabb.Termico} = Q_{pareti.opache} + Q_{pareti.vetrare} - Q_{sorgenti.interne} - Q_{energia.solare}$$

$$Q_{fabb.termico} = \sum_{pareti} K_p S_p (T_i - T_e) + \sum_{vetrate} K_v S_v (T_i - T_e) - \sum_{sorgenti} Q_i - \sum_{vetrate} \tau I S_v$$

ove con K si indicano le trasmittanze, S le superfici. E si può ben osservare come la temperatura esterna,  $T_e$ , e l'irraggiamento solare,  $I$ , sono presenti nell'espressione del bilancio energetico.

<sup>30</sup> Il *Condizionamento* (sia estivo che invernale) richiede una centrale di trattamento dell'aria contenente al suo interno alcune *batterie di scambio termico* (costituite da superfici alettate di varie dimensioni) che provvedono a riscaldare o a raffreddare l'aria che l'attraversa. Si vedano a tal proposito i testi specifici di Impianti termici nell'edilizia.

<sup>31</sup> L'Architettura Araba è un esempio mirabile di edificio-impianto naturale per l'umidificazione dell'aria. Gli arabi usano con grande maestria l'acqua delle fontane, dei zampilli, delle cascatelle, ..., per umidificare l'aria ambiente.

<sup>32</sup> In *Igrometria* si dimostra che per deumidificare occorre raffreddare l'aria al di sotto del suo *punto di rugiada* nelle condizioni di pressione atmosferica in cui si trova. Ciò richiede una batteria di scambio termico nella quale si fa passare all'interno acqua fredda (a temperatura di 5÷12 °C) prodotta con un impianto frigorifero e all'esterno l'aria da deumidificare. L'umidità che viene eliminata si raccoglie mediante vaschette poste al di sotto della batteria di scambio e da queste eliminata negli scarichi idrici.

<sup>33</sup> Si vedano i testi specializzati di Impianti termici nell'edilizia. Gli impianti sono a *tutt'aria* quando operano sull'aria come fluido di scambio primario. Gli impianti sono a *ricircolo* se, dopo avere espulso l'aria di ricambio fisiologico (circa 25 m<sup>3</sup> a persona), utilizza la portata d'aria restante (già trattata e alle condizioni ambientali) integrata con aria esterna fresca pari alla portata espulsa. Quest'operazione comporta una complicazione nella rete di distribuzione ma un risparmio sensibile di energia nel condizionamento ambientale.

## Radiazione solare

La radiazione solare è stata ampiamente discussa nei capitoli 4.4.3 e seguenti. Essa dipende dalla latitudine del luogo, dal giorno dell'anno, dall'ora, dall'esposizione e dall'inclinazione della superficie.

Anche le condizioni geo-orografiche del luogo influenzano la radiazione incidente (vedi relazione [56]) tramite i fattori di riflessione del terreno e la trasparenza atmosferica (ad esempio si ha forte influenza per zone nebbiose, industriali, ventose, ...). La caratterizzazione della radiazione solare viene effettuata tramite procedimenti deterministici (*Reference Year*) o stocastici (*ARMA o metodi markoffiani* già visti nel paragrafo 4.2.2.): tutti questi metodi cercano di determinare una correlazione tra il sito e i rapporti fra radiazione diretta, diffusa e diffratta rispetto alla radiazione orizzontale extra-atmosferica (vedi paragrafo 4.4.3) nei vari mesi, giorni e ore di interesse.

## Temperatura esterna

La temperatura esterna è una delle forzanti del sistema-edificio assieme alla radiazione solare. La sua conoscenza è fondamentale per lo studio e l'analisi del comportamento energetico degli edifici. Essa viene spesso fornita come *valore medio mensile* (vedasi Manuale del CNR sul Clima in Italia) e i dati orario possono essere ricostruiti disponendo di dati sufficienti.

In figura 96 si hanno i valori medi mensili in Sicilia per i siti riportati dal CNR. La caratterizzazione climatica sulla base della temperatura esterna può essere fatta con due metodi di rilevante importanza:

- il metodo dei *Gradi-Giorno* che si descrivono brevemente nel prosieguo.
- il *BIN Method* che si rimanda ai testi specializzati (Vedi ASHRAE Fundamentals).

### 3.4.4 METODO DEI GRADI-GIORNO

Il fabbisogno energetico annuale di un edificio può essere valutato in modo sintetico con la relazione seguente:

$$Q_{\text{energ.annuo}} = C_g \cdot V \cdot \sum_m N_m \cdot (T_i - T_e)_m \quad [64]$$

$[\text{kJ/mese}] \quad \left[ \frac{\text{kJ/day}}{\text{m}^3 \cdot \text{C}} \right] \quad [\text{m}^3] \quad \left[ \frac{\text{giorni}}{\text{mese}} \right] \quad [^\circ\text{C}]$

Si può osservare che i fattori  $C_g$  e  $V$  dipendono dall'edificio<sup>34</sup> mentre  $N_m$  e  $(T_i - T_e)_m$  dipendono dal clima essendo il primo il numero di giorni di riscaldamento (o raffreddamento, con analogo ragionamento) previsti<sup>35</sup> e il secondo la differenza di temperatura media nel mese.

Si definiscono *Gradi-Giorno* (mensili o annuali, a seconda dei casi) l'espressione:

$$GG = \sum_m GG_m = \sum_m N_m (T_i - T_e)_m \quad [65]$$

(Gradi-Giorno)<sub>a</sub> (Gradi-Giorno)<sub>mensili</sub>

In pratica i GG rappresentano il prodotto del tempo per la differenza di temperatura fra interno ed esterno (in inverno o viceversa d'estate) durante il periodo nel quale risulta necessario

<sup>34</sup>  $C_g$  è il coefficiente volumi di scambio termico ed esprime l'energia dispersa in un giorno per unità di volume e per un salto termico di 1 °C dall'edificio. Esso, pertanto, è fortemente dipendente dalla caratterizzazione dispersiva delle pareti esterne (cioè dalle loro trasmittanze termiche, superfici e salti termici).  $V$  è il volume riscaldato dell'edificio in m<sup>3</sup>.

<sup>35</sup> Per il periodo di riscaldamento la L. 10/91 e il suo Regolamento di applicazione DPR 412/93 fissano il numero di giorni di riscaldamento per le sei zone climatiche (dalla A alla F) di ciascun Comune in Italia e pertanto questa grandezza non è libera, come può esserlo, invece, per il condizionamento.

il riscaldamento ambientale. Tale periodo resta fissato dall'essere la temperatura esterna inferiore a 15 °C.

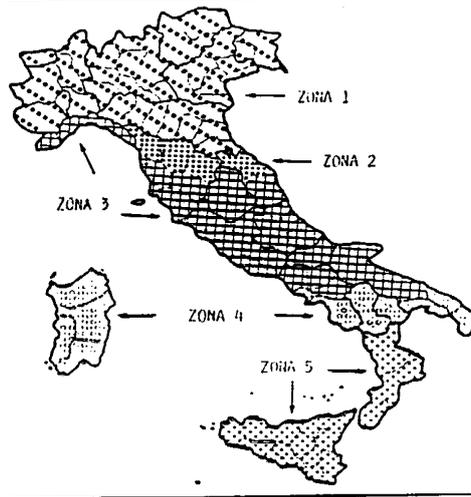
In pratica si suppone che se la temperatura esterna è superiore a 15°C gli apporti gratuiti (solari ed interni per affollamento o per altri tipi di sorgenti) siano sufficienti a mantenere a 20°C l'ambiente.

Se si volesse tenere conto degli apporti gratuiti nelle (64) e (65) occorre fissare la temperatura interna ad un valore inferiore a 20°C (come di norma si fa): nei climi freddi si pone pari a 19°C mentre nelle zone più temperate si pone pari a 17°C ÷ 18°C.

In base al DPR 412/94 le zone climatiche sono individuate dal valore dei GG secondo la seguente tabella riepilogativa.

<b>Zona</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
GG	< 600	600÷900	901÷1400	1401÷2100	2101÷3000	>3000

A causa dell'inerzia termica degli edifici (e quindi alla capacità di accumulare e poi rilasciare energia) i GG dipendono dalla struttura di questi: gli edifici leggeri hanno GG maggiori mentre quelli pesanti hanno GG minori.



STAZIONE	QUOTA	TEMPERATURE MEDIE MENSILI												GG TM-12	DUR TR-19	GG TM-17	DUR TR-17
		GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC				
MESSINA	54	11.2	10.9	12.8	15.2	18.7	23.2	26.4	26.3	24.0	20.1	16.8	13.1	530	68	672	173
CESARO'	1100	4.0	4.3	7.0	10.0	14.5	20.1	23.2	22.6	19.1	14.1	10.2	5.8	2200	182	2002	245
FLORESTA	1250	2.0	2.2	4.9	8.5	12.0	17.7	20.0	20.2	17.2	12.7	8.5	4.1	2752	209	2465	269
MILAZZO	2	11.8	11.4	13.8	15.9	19.4	23.4	25.9	25.9	23.6	20.5	17.1	14.5	319	42	539	163
RAGUSA	300	9.4	9.6	12.2	15.8	19.8	25.4	28.6	28.7	25.2	19.2	15.9	11.2	846	95	845	173
S. AGATA MILIT.	27	10.8	11.1	13.1	13.5	18.6	22.6	24.9	25.4	22.6	20.0	18.5	12.9	485	60	742	178
STROMBOLI	5	12.7	12.2	12.8	15.4	18.6	22.6	25.2	25.7	24.0	20.5	16.9	13.2	0	0	578	170
TAORMINA	205	10.4	12.0	12.7	13.9	18.6	22.7	25.4	26.7	23.4	19.5	16.7	13.2	422	53	704	176
TINDARI	280	8.6	8.6	10.3	13.5	16.9	21.5	24.0	23.8	21.3	18.0	15.0	11.8	1055	112	1058	204
CATANIA	75	10.5	10.8	12.8	15.3	19.0	23.6	26.3	26.4	23.9	20.1	16.4	12.4	622	77	723	174
ACIREALE	194	9.2	9.1	11.1	13.7	17.0	21.7	24.2	24.0	21.6	18.0	14.8	11.0	997	110	1018	203
CASA CANTONIERA	1682	-1.0	.1	1.6	5.1	9.3	13.9	16.8	15.7	13.2	8.8	4.8	1.2	3781	253	3496	366
LINGUAGLOSSA	550	5.4	5.6	7.9	11.4	15.7	21.0	23.5	23.3	20.2	15.5	11.5	7.2	1834	161	1695	231
MINEDO	510	8.1	8.2	10.6	14.3	18.4	24.4	27.3	26.9	23.4	18.8	14.4	9.8	1160	118	1109	191
NICOLOSI	696	5.8	6.7	8.0	12.6	16.6	21.4	24.1	23.3	19.7	16.1	12.0	7.8	1618	147	1517	224
OSSERV. ETNA	2590	-7.5	-5.6	-2.9	-1.8	.2	5.9	8.8	7.8	6.0	3.0	-9	-6.8	6776	366	6042	366
RIPOSTO	8	10.4	10.4	12.2	14.8	18.5	21.8	24.8	25.2	22.7	19.2	15.9	12.3	706	86	786	181
S. ALFIO LA BRUNA	560	6.9	7.0	8.3	12.2	16.0	20.8	22.8	22.6	19.2	15.4	12.3	9.0	1559	148	1486	234
VIAGRANDE	405	7.9	8.1	10.6	14.1	18.3	23.3	26.0	25.5	22.0	17.7	14.0	10.0	1171	119	1136	200
SIACUSA	23	10.9	10.9	13.2	15.6	19.0	23.3	26.3	26.6	24.3	20.4	16.9	13.0	531	67	659	168
AUGUSTA	7	11.9	11.9	12.6	14.9	18.8	23.0	25.7	27.1	24.1	20.4	16.6	13.1	334	47	641	173
LENTINI	200	9.3	9.9	12.6	15.7	19.4	25.6	27.6	27.9	24.5	20.0	15.3	11.5	796	90	836	178
RAGUSA	515	9.6	10.0	12.6	15.9	20.2	25.4	28.3	28.7	25.2	20.9	16.1	12.0	745	86	785	167
COZZU SPADARO	46	11.3	11.0	13.0	15.2	18.2	22.7	25.7	25.9	24.4	20.9	17.4	13.0	524	68	657	172
VITTORIA	168	10.1	10.2	12.9	15.3	19.0	23.8	25.9	25.4	22.9	19.5	15.7	11.9	700	83	782	179
ENNA	950	4.7	5.2	7.2	10.8	15.1	21.0	24.1	23.6	20.3	14.5	9.8	6.5	2085	178	1804	236
NICUSIA	890	4.9	5.2	8.0	12.5	16.9	21.7	24.7	24.7	19.6	16.5	11.7	8.1	1742	151	1606	219
CALTANISSETTA	570	6.9	7.1	9.7	12.7	17.2	22.9	25.7	25.2	21.3	17.3	13.3	9.3	1413	137	1326	210
MAZZARINO	560	7.6	7.5	10.2	14.1	18.1	23.3	26.0	26.7	22.6	18.1	13.9	9.2	1269	124	1202	197
AGRIGENTO	313	9.6	9.6	12.1	15.0	18.7	23.8	26.3	25.8	23.3	19.6	15.6	11.6	825	94	862	181
BIVONA	503	7.7	7.4	10.0	14.4	18.0	24.3	27.4	26.9	22.8	18.1	13.4	9.8	1272	120	1193	195
LICATA	142	9.3	9.9	12.4	14.8	18.2	22.3	24.9	24.9	22.6	19.9	15.8	12.3	733	83	833	182
PANTELLERIA	254	10.0	10.3	11.7	13.5	15.8	20.0	23.5	24.2	21.8	15.6	15.0	11.5	851	102	940	204
SCIACCA	45	11.0	11.5	13.4	15.9	19.0	23.2	25.6	25.9	24.0	20.7	17.2	13.4	440	57	607	163
TRAPANI	2	10.9	10.8	13.0	15.2	18.5	22.8	25.5	25.4	24.3	21.1	17.4	13.3	526	66	664	169
CALATAFIMI	350	8.6	7.8	11.0	15.0	18.0	23.2	25.4	25.6	22.1	18.2	13.4	10.2	1142	118	1295	190
MARSALA	12	10.3	10.5	12.6	15.1	18.0	22.3	24.2	24.4	22.8	19.0	16.1	12.6	644	78	754	181
MAZZARA	8	10.6	11.9	13.8	16.3	18.9	23.7	26.0	26.5	24.6	20.3	18.2	13.5	424	54	569	153
PALERMO	71	10.3	10.4	13.0	16.2	18.7	23.0	25.3	25.1	23.2	19.9	16.8	12.6	640	77	695	166
CEFALU'	30	11.5	11.5	13.8	16.4	20.1	24.5	27.3	26.0	26.2	21.0	17.2	13.8	363	49	552	156
CIMINNA	500	7.6	8.6	10.8	13.4	16.8	21.8	24.1	24.1	21.5	17.4	13.5	9.6	1208	124	1193	212
CORLEONE	594	7.3	7.4	10.2	12.9	17.3	21.9	24.6	24.0	21.8	17.8	13.4	9.5	1341	133	1269	207
LERCARA	658	5.7	6.3	9.5	11.8	15.8	20.0	22.6	22.9	19.9	16.0	11.7	8.1	1685	157	1556	229
PETRALIA SOTTANA	930	4.4	4.8	8.1	11.1	15.3	20.9	23.5	23.0	19.9	15.7	10.9	6.5	1972	168	1799	232
S. GIUS. IATO	450	7.3	7.2	10.6	14.9	18.8	24.3	27.1	27.2	23.3	18.3	13.4	9.6	1247	121	1183	194
USTICA	250	11.0	14.4	15.5	14.9	17.9	21.0	24.2	25.3	23.7	20.2	15.8	11.3	336	43	562	184

Figura 75: Temperature medie mensili in alcune località della Sicilia

## 4. ARCHITETTURA BIOCLIMATICA: STATO DELL'ARTE<sup>36</sup>

Negli anni 'sessanta – settanta si è spesso utilizzato la locuzione di **Architettura Bioclimatica** per indicare quell'Architettura particolarmente sensibile ai problemi climatici e che aveva lo scopo di progettare edifici energeticamente congruenti, a basso consumo energetico fino ad arrivare agli **edifici passivi** cioè edifici del tutto autonomi e privi di impianti meccanici perché in grado di utilizzare al meglio la radiazione solare per il riscaldamento. Oggi l'attributo **Bioclimatica** è meno sentito perché l'Architettura è una e deve avere sempre come scopo ultimo la corretta progettazione degli edifici al fine di ridurre i consumi energetici come indicato dalle leggi, decreti e norme vigenti.

Problema energetico della progettazione: Evoluzione storica dei consumi energetici nazionali nel settore del riscaldamento di ambienti in rapporto agli altri settori. Il consumo energetico globale di energia primaria ha raggiunto nel nostro paese il valore di 150 Mtep/anno, la produzione nazionale copre soltanto 25 Mtep, pari al 17%, mentre per le restanti 125 è necessario ricorrere a energia importata. Il petrolio che rappresenta il 68% sul totale delle fonti primarie impiegate proviene quasi completamente dall'estero, le importazioni raggiungono infatti il 99%.

---

<sup>36</sup> Questo capitolo è tratto quasi interamente (le poche modifiche riguardano solamente gli adattamenti temporali ai giorni nostri e i richiami teorici e ad altre parte del Corso) dall'intervento di Sergio Los (che reca lo stesso titolo) nel *Primo Seminario di Progettazione Bioclimatica* tenuto a Catania nel febbraio 1981. La chiarezza espositiva e l'organizzazione delle idee lo rendono sempre attuale.

Se consideriamo che i prezzi del petrolio sono passati dal 2 \$/barile) del 1973, nel periodo che precede la guerra del Kippur, agli oltre 200 40 \$/barile, oggi, anche se togliamo le quote di aumento imputabili all'inflazione questi incrementi appaiono insostenibili per la nostra economia.

Tutto ciò porta ad avere esborsi valutari notevoli, con pesanti aggravii per la nostra bilancia dei pagamenti. Nel 1979 gli investimenti nel settore edilizio nonostante la crisi che ne interessa alcune parti, hanno superato il valore di 10 miliardi di Euro, dei quali circa 3.3 G€ per la costruzione di nuove abitazioni e 2.5 G€ per la riqualificazione di edifici esistenti.

E' possibile stimare il contenuto energetico complessivo di questa attività; il suo valore, che dovrebbe corrispondere a circa 10 Mtep, rappresenta una frazione sensibile del nostro bilancio energetico. Se aggiungiamo a questi anche i consumi per la climatizzazione degli edifici, che nel 1979 ha comportato spese per l'approvvigionamento di combustibili di £ miliardi di euro che raggiungono per l'utente finale del servizio il valore di 4 miliardi di euro, otteniamo il consumo complessivo di energia nel settore edilizio che ammonta a 50 Mtep. Questo valore rappresenta un terzo dei consumi energetici totali del nostro paese. Se confrontiamo la situazione italiana con quella degli altri paesi europei troviamo che i consumi energetici pro capite sono stati nel 1979 di 2.5 tep/anno per il nostro paese contro le 4.5 della Germania, le 4 dell'Inghilterra, le 3.6 della Francia e le 3.8 della media CEE. Questi valori tendono continuamente a crescere oggi.

Appare evidente da queste sintetiche informazioni che il settore edilizio è molto importante nell'ambito di una politica per il risparmio energetico e che eventuali riduzioni nei consumi in tale settore influenzano in modo rilevante il bilancio energetico globale. Il divario nei consumi tra il nostro paese e gli altri paesi europei si spiega, oltre che con il diverso grado di sviluppo tecnologico, anche con il clima differente che richiede per la climatizzazione differenti quantità di energia. Nei paesi del nord l'energia impiegata per il riscaldamento dell'ambiente supera la metà del consumo complessivo, in Italia invece oscilla intorno al 25 %.

Dopo avere identificato la quantità di energia impiegata per riscaldare gli edifici, ne consideriamo la qualità. Dal punto di vista degli usi finali l'energia usata nella climatizzazione dell'ambiente è calore a bassa temperatura, anche se molto spesso gli impianti consumano energia pregiata<sup>37</sup>, cioè calore ad alta temperatura che si potrebbe utilizzare anche per produrre energia meccanica o elettrica, che degradano riducendo la temperatura ai fini del riscaldamento. Quando si parla di risparmio di energia e di ricerche per la sua conservazione si dice in modo metaforico qualcosa che la scienza deve esprimere più rigorosamente. L'energia non può che essere conservata, quindi non possiamo non risparmiare energia. Ciò che invece deve essere conservato poiché spesso si spreca, è il lavoro potenziale, la disponibilità dell'energia a trasformarsi in lavoro, cioè l'*exergia*.

In periodi di energia a basso costo abbiamo usato sistemi ad alto grado di potenzialità termodinamica anche per rispondere a richieste relative a un grado più basso: l'energia della pianura che brucia petrolio, molto distinguibile dall'ambiente circostante (il livello di distinzione

---

<sup>37</sup> Il modo più corretto per indicare questo concetto è di riferirsi alla grandezza termodinamica *exergia* che rappresenta la massima energia utilizzabile di una quantità di calore. E' facile persuadersi che, supponendo di utilizzare la macchina di Carnot (ideale e con rendimento massimo) si avrebbe, per una trasformazione di calore dalla temperatura  $T_1$  alla temperatura ambiente  $T_2$ , l'*exergia* pari a :  $E = Q \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right)$ . Il termine in parentesi viene detto *fattore di Carnot*. Questa relazione ci fa vedere che se si brucia del gasolio a circa 1500 K con temperatura ambiente di 300 K si ha un'*exergia* pari a  $E=0.8 Q$  (cioè si avrebbe una energia meccanica pari all'80% dell'energia termica utilizzata). Se si usa il gasolio per riscaldare l'acqua di riscaldamento a 90 °C=363 K si ha un'*exergia* pari a  $E=0.173 Q$  con un rendimento di trasformazione pari al 17.3 %, enormemente inferiore al caso precedente. Ciò giustifica l'affermazione che l'uso del gasolio o del gas naturale per il riscaldamento degli edifici è concettualmente e termodinamicamente assurdo perché sotto-utilizza l'*exergia* che in realtà sarebbe disponibile dal combustibile primario.

tra sistema e ambiente circostante equivale al grado di allontanamento dallo stato di equilibrio e al livello d'informazione termodinamica), per riscaldare stanze nelle quali l'aria doveva essere poco distinguibile dall'ambiente esterno.

## 4.1 IL FUNZIONAMENTO ENERGETICO DEGLI EDIFICI

Per caratterizzare il complesso delle case esistenti in relazione alle tipologie distinguiamo le abitazioni e i fabbricati. Mentre la gran parte delle abitazioni si trova in edifici plurifamiliari, cioè il 69.2% con una incidenza del 75 % al nord e del 67 % al sud, il numero di edifici risulta suddiviso in due terzi di case con uno o due alloggi, e un terzo di case con molti appartamenti. L'edificio medio si articola su 4 ÷ 5 piani con 12 ÷ 14 appartamenti, aumenta al crescere della dimensione demografica dei centri abitati; l'incremento a livello di fabbricato viene compensato da una superficie minore a livello di appartamento. Il combustibile usato negli impianti di riscaldamento, che si trovano nella quasi totalità degli edifici, specialmente nelle aree più fredde, è prevalentemente il gasolio (32 %), seguito da legna/carbone (25 %), gas di città (19 %) e kerosene (10 %).

Mantenere stabile la temperatura nell'ambiente interno agli edifici nonostante le oscillazioni di quello esterno implica produrre una differenza di temperatura tra interno ed esterno che richiede una quantità di energia proporzionale alle caratteristiche fisiche e tecnologiche dell'involucro edilizio. Ma l'involucro non è omogeneo quindi le dispersioni saranno diverse per i diversi componenti. Indicando per le due tipologie quali sono queste perdite di energia termica è anche possibile farci una idea degli errori commessi correntemente dai progettisti, ma anche degli interventi correttivi possibili. Per le due tipologie che ricorrono più frequentemente nella edilizia del nostro paese si indicano le dispersioni caratteristiche per i vari componenti.

Nel caso del condominio la maggior parte dell'energia viene dissipata attraverso le murature (40 %) e le finestre (47%); in queste ultime parte dell'energia (30%) si perde per conduzione e parte (17 %) per infiltrazioni. Il tetto disperde il 7 % e il pavimento il 6%. Per la casa mono e bifamiliare invece le murature si riducono a dissipare il 25 % e le finestre il 33 % di cui 20% per conduzione e 13 % per infiltrazioni; tetto e pavimento naturalmente costituiscono in questo caso la maggior parte dell'involucro edilizio e disperdono quindi molto di più, rispettivamente 22 % e 20 %. L'energia *facile* aveva indotto molti progettisti a sottovalutare anche nel nostro paese i vincoli che un razionale controllo energetico della progettazione comporta.

Gli esiti più evidenti di questo atteggiamento si possono riconoscere nella organizzazione dello spazio che in molti edifici riduce talmente la compattezza dell'involucro da renderlo molto dissipativo, nella esposizione della struttura portante che comporta vari tipi di ponti termici, nelle eccessive vetrate implicanti surriscaldamento estivo e rilevanti dispersioni invernali, porticati al piano terra e quasi totale mancanza di isolamento nelle varie parti dell'involucro che provocano un insostenibile flusso energetico dissipativo tra interno ed esterno. Un rapido sguardo alle nostre città, specialmente dove il tessuto urbano è più recente, consentirà di confermare tutte queste sintetiche indicazioni. Qualcosa si deve aggiungere sul contenuto energetico degli edifici che dovrebbe orientare la produzione dei componenti e il loro assemblaggio in funzione di un minore consumo di energia.

Una interessante ricerca del CNR (*PFE Progetto Finalizzato Energetica*) pone le basi per queste analisi identificando materiali, componenti e sistemi tipologici in rapporto al valore energetico della loro produzione. Se consideriamo, oltre che componenti ed edifici, anche il tessuto urbano nel quale sono inseriti, si trovano altri errori di localizzazione e orientamento che inducono ulteriori incrementi nel consumo di energia.

La mancanza di coscienza energetica suggeriva localizzazioni di edifici in aree climaticamente difficili, dove uno spostamento anche minimo avrebbe consentito un uso più razionale delle energie ambientali disponibili. La cultura urbanistica inoltre propone, nei casi in cui l'orientamento diventi un problema di progettazione, l'asse eliotermico che dispone l'asse maggiore dell'edificio nella direzione nord-sud. Così orientato l'edificio non può captare la radiazione invernale tangente alle due facciate poiché viene quasi completamente riflessa verso l'esterno; ma non può neanche difendersi dal sole estivo poiché nelle facciate orientale e occidentale esso batte quasi perpendicolarmente, richiedendo una schermatura totale che ostacola anche la vista verso l'esterno. L'esistenza di molti piani urbanistici operanti nelle nostre città rende assai difficile l'applicazione di tecnologie bioclimatiche per il risparmio di energia negli edifici.

## 4.2 LE RISPOSTE AL PROBLEMA RIFERITA AL CONTESTO INTERNAZIONALE.

Dalle osservazioni fin qui svolte si può dedurre che nel settore edilizio l'energia non viene impiegata nel modo più razionale e che appare ragionevole attendersi, da opportune politiche di razionalizzazione dei consumi energetici e adeguati interventi operativi, forti risparmi di energia. Le stime più recenti indicano il valore di questi risparmi che nel breve termine dovrebbero oscillare intorno al 15 % mentre per la fine del secolo dovrebbero raggiungere il 40 %<sup>38</sup>. Ciò significa che, anche considerando le ipotesi più limitative di costo, per le fonti energetiche, costante e pari all'attuale, e di crescita nulla del fabbisogno nel settore, possiamo realizzare a breve termine risparmi di circa 1.400 miliardi di lire all'anno, che corrispondono a 7 Mtep/anno, e di oltre 4.000 miliardi corrispondenti a 20 Mtep/anno, imputabili sia ai risparmi energetici realizzati nel riscaldamento degli edifici e negli usi domestici, sia a quelli ottenuti attraverso una efficiente ristrutturazione energetica del processo produttivo edilizio.

Alla crisi dell'energia si è risposto in vari modi con la normativa, la produzione e la ricerca. Le risposte sono orientate in due direzioni: la prima che persegue la conservazione dell'energia, la seconda tendente a sostituire con energia rinnovabile quella del petrolio. Il risparmio di energia attraverso la conservazione caratterizza l'ambito normativo della legge 373/76 prima e successivi aggiornamenti dopo per il contenimento dei consumi, la produzione, la fabbricazione e la commercializzazione di materiali e componenti per la coibentazione degli edifici, la ricerca e la elaborazione di programmi come il Sottoprogetto RERE (Risparmio di Energia nel riscaldamento degli edifici) del CNR (*Progetto Finalizzato Energetica*).

L'utilizzazione di fonti rinnovabili, alternative al petrolio e quindi impiegate per ridurre il consumo, non trova finora interventi normativi anche se è in corso di approvazione una legge specifica (L. 9/91 e L. 10/91) è stata sviluppata invece dalla produzione che ha realizzato collettori e impianti per l'uso dell'energia solare, ed ha motivato ricerche particolari nel Sottoprogetto SPES (*Sottoprogetto per l'Energia Solare*) sempre del CNR-PFE.

La integrazione di queste due direzioni, limitata per il momento all'ambito della ricerca, conduce alla identificazione dei sistemi passivi o bioclimatici che costituiscono il tema fondamentale di questo volume.

---

<sup>38</sup> Queste previsioni fatte nel 1981 non sono state affatto rispettate sia per la caduta di interesse che la comunità scientifica ha avuto nei tre lustri seguenti sia per la riduzione, invero inattesa e insperata, del costo dell'energia da 39 \$/barile (fine anni settanta) a 18 \$/barile (giorni nostri). Neppure le leggi 373/76 e 10/91 hanno intaccato l'abuso energetico fatto in Italia e nel mondo.

Avremo perciò modo di spiegare diffusamente cosa sono questi sistemi, donde provengono, perché si sono sviluppati tanto, quali sono i pregi e i difetti della loro applicazione, come si possono promuovere e quando, che prospettive ci sono di usare queste tecnologie per risolvere nel nostro paese i problemi energetici del settore edilizio.

### 4.3 L'ARCHITETTURA DELL'EVOLUZIONE

L'evoluzione procede verso una maggiore complessità degli organismi e questa implica una progressiva differenziazione e indipendenza delle condizioni ambientali. I sistemi cellulari possono operare solo entro una ristretta gamma di condizioni esterne, mentre l'organismo complessivo è in grado di sopravvivere in ambienti notevolmente differenti. Gli animali omeotermi sono in condizioni di vantaggio sugli eterotermi, in quanto il loro metabolismo, quindi le loro prestazioni energetiche, non sono influenzati, entro certi limiti, dalla temperatura ambiente. La costanza della temperatura corporea, che rappresenta un vantaggio delle specie più evolute, ha due prezzi: la necessità di una maggiore alimentazione e il ricorso a dispositivi termoregolatori assai complessi, perciò vulnerabili.

Questi processi di termoregolazione, che modulando termogenesi e termodispersione assicurano la stabilità strutturale e funzionale dell'organismo, costituiscono sistemi omeostatici mediante i quali l'organismo si mantiene in uno stato di equilibrio nonostante le continue modificazioni dell'ambiente circostante. L'evoluzione biologica ha sviluppato risposte omeostatiche che consentono all'organismo di mantenersi nella condizione più favorevole possibile. Queste possono variare da una corrispondenza passiva all'ambiente esterno a diverse forme di omeostasi: risposte di tipo regolativo fisiologiche o comportamentali, risposte di acclimatazione o di migrazione verso località più convenienti; in casi estremi gli organismi possono cadere in dormienza o divenire biologicamente inattivi fino a quando non ritornano condizioni più favorevoli.

I processi biologici avvengono in maniera ottimale entro un ristretto intervallo di condizioni ambientali; questo tende a ridursi con un progressivo aumento di complessità dell'organismo e delle sue prestazioni. Dunque il sottoinsieme di stati dell'ambiente che l'organismo considera accettabili è assai limitato rispetto all'insieme di tutti gli stati possibili. E' questo rapporto tra condizioni naturali e condizioni favorevoli che rende queste ultime molto improbabili, e che spinge l'organismo a fare qualcosa per conseguirle. Sono molti di più gli stati dell'ambiente che possono risultare inadeguati di quelli che sono adeguati. Il disordine, del quale molto spesso si parla in termini assoluti, va riferito a qualcuno o a qualcosa rispetto al quale viene identificato come tale. Il concetto di ordine rimanda perciò a quello di rispondenza, di adattamento. Le cose incredibili che si sono dette sul concetto di entropia e le controversie sull'ordine e sul disordine derivano dalla rimozione del sistema di riferimento. E' il carattere teleonomico del vivente, il suo essere progetto che impone delle priorità, dei valori, rispetto ai quali diviene improbabile uno stato favorevole al progetto di fronte all'insieme di tutti gli altri stati non favorevoli possibili. Questo ordine è strutturalmente raro, quindi richiede un intervento per essere conservato.

Lo stesso principio enunciato da **Ashby**, secondo il quale soltanto la complessità del sistema di regolazione può tenere sotto controllo la complessità delle perturbazioni ambientali, deve essere riferito a un progetto. La differenza tra comportamento dell'uomo, determinato dal perseguimento di un obiettivo specifico, e comportamento che segue tutte le oscillazioni dell'ambiente è definita dalla complessità dell'obiettivo o del progetto.

Lo scarto tra obiettivo e ambiente rappresenta la complessità che deve essere controbilanciata dalla complessità dell'organismo portatore del progetto.

E' chiaro che sopravvivere andando sulla luna presenta uno scarto con l'ambiente diverso dal sopravvivere raccogliendo semplicemente ciò che da quello proviene, ma anche un diverso grado di autonomia da tale ambiente. Quanto più un obiettivo è specifico e differenziato tanto più alto è il numero degli stati che occorre controllare dell'ambiente circostante, e tanto maggiore è la complessità richiesta per farlo.

Il progetto dell'animale eterotermo presenta una complessità con una differenza minore, rispetto alla complessità dell'ambiente, di quella relativa alla complessità del progetto costituito da un animale omeotermo. La differenza di complessità nel caso dell'uomo è ancora maggiore, maggiore quindi la complessità richiesta al sistema regolatore. Procedendo su questo ragionamento, è interessante rilevare che esistono vari livelli di compatibilità tra uomo e ambiente termico: a ognuno di essi corrisponde una diversa differenza di complessità risultante da un diverso progetto.

Identifichiamo il livello di sopravvivenza rispetto al quale l'intervallo entro cui contenere la variabilità di parametri ambientali caratteristici risulta piuttosto ampio. Il divario tra le due complessità è dunque minimo. Se consideriamo l'intervallo relativo al benessere che sarà certamente interno a quello relativo alla sopravvivenza, il divario aumenta; sappiamo inoltre che l'ambiente termico influenza lo svolgimento delle varie attività, e in rapporto a queste rileviamo un intervallo ulteriormente ridotto, non necessariamente contenuto in quello del benessere, ma sicuramente interno a quello della sopravvivenza, al quale corrisponde una differenza maggiore tra le due complessità. L'intervallo si restringe ulteriormente per le persone affette da qualche infermità, rispetto alle quali occorre controllare più accuratamente le perturbazioni climatiche. Ci sono infine fattori psicologici, economici e sociali che stabiliscono il valore attribuito alla qualità ambientale, identificando l'intervallo più definito e lo scarto massimo tra le due complessità.

L'antropologia che studia le strutture e i processi dell'evoluzione culturale identifica nella protezione dal freddo, dal caldo e da tutte le altre perturbazioni provenienti dall'ambiente, uno dei bisogni primari. A questo naturalmente sono state date le risposte più articolate, mediante lo sviluppo di tecnologie assai diversificate in rapporto alla varietà delle condizioni contestuali e alla cultura locale. Il bisogno di protezione infatti non è l'unico fattore a determinare la forma di quel complesso di dispositivi, che è stato predisposto per risolvere questo problema, e che è la casa. Il fattore climatico concorre assieme a una pluralità di altri fattori: tecnologici, simbolici, organizzativi, per determinare l'assetto dell'edificio. Il sistema di questi fattori, la loro diversa influenza sulla costruzione rappresenta la cultura locale. Ad essa è quindi integrato il problema della climatizzazione.

## **4.4 ADATTAMENTO DEI RAPPORTI UOMO-AMBIENTE**

Finora abbiamo parlato della complessità, necessaria a controllare la molteplicità delle perturbazioni ambientali caratteristica del sito, che deve essere posseduta dall'uomo in rapporto al suo progetto e al complesso degli obiettivi che lo definiscono. L'evoluzione biologica ha dotato l'uomo, che è organismo omeotermo, di processi e dispositivi per regolare la temperatura del corpo. Ma ciò non gli consentirebbe di realizzare il progetto di abitare il massimo numero di ambienti possibile. Per questo occorre dotare l'uomo di una complessità maggiore, e questo è avvenuto attraverso l'evoluzione culturale che ha sviluppato protesi, o strumenti tecnici, specifiche per la termoregolazione. Consideriamo ora uno schema, che ci consente di procedere nelle nostre argomentazioni, per rappresentare le interazioni tra uomo e ambiente climatico, mediate da un dispositivo complesso, sviluppato dall'evoluzione culturale al fine di aumentare nell'uomo la capacità di tenere sotto controllo l'ambiente.

Si comprende facilmente che questo dispositivo è il complesso dei mezzi costruiti dall'uomo per proteggersi: abiti, arredi, edifici, insediamenti. Prima dello sviluppo di organi esosomatici, il complesso dei mezzi di cui abbiamo parlato, l'uomo stava nell'ambiente come gli altri animali dotato soltanto dei dispositivi di termoregolazione biologici. La presenza di vegetazione, alberi ed erba, determina nel sito un clima specifico, unitamente ad altri fattori e processi, questo agisce sull'uomo che, a sua volta, reagisce mediante determinate risposte. Il clima locale è dunque modificato dalla presenza dell'uomo attraverso il contatto con il terreno, l'aria intorno e la radiazione riflessa. La differenza di temperatura tra corpo umano e ambiente naturale indica l'esistenza di un flusso dissipativo dal primo verso il secondo, la cui portata deve essere mantenuta stabile nonostante la presenza di perturbazioni. Il flusso dissipativo dipende dalle attività svolte dall'uomo e, attraverso il clima locale modificato, influenza il microclima del sito. Se le perturbazioni sono assai consistenti l'uomo deve ridurre al minimo le proprie attività oppure migrare in ambienti più adatti.

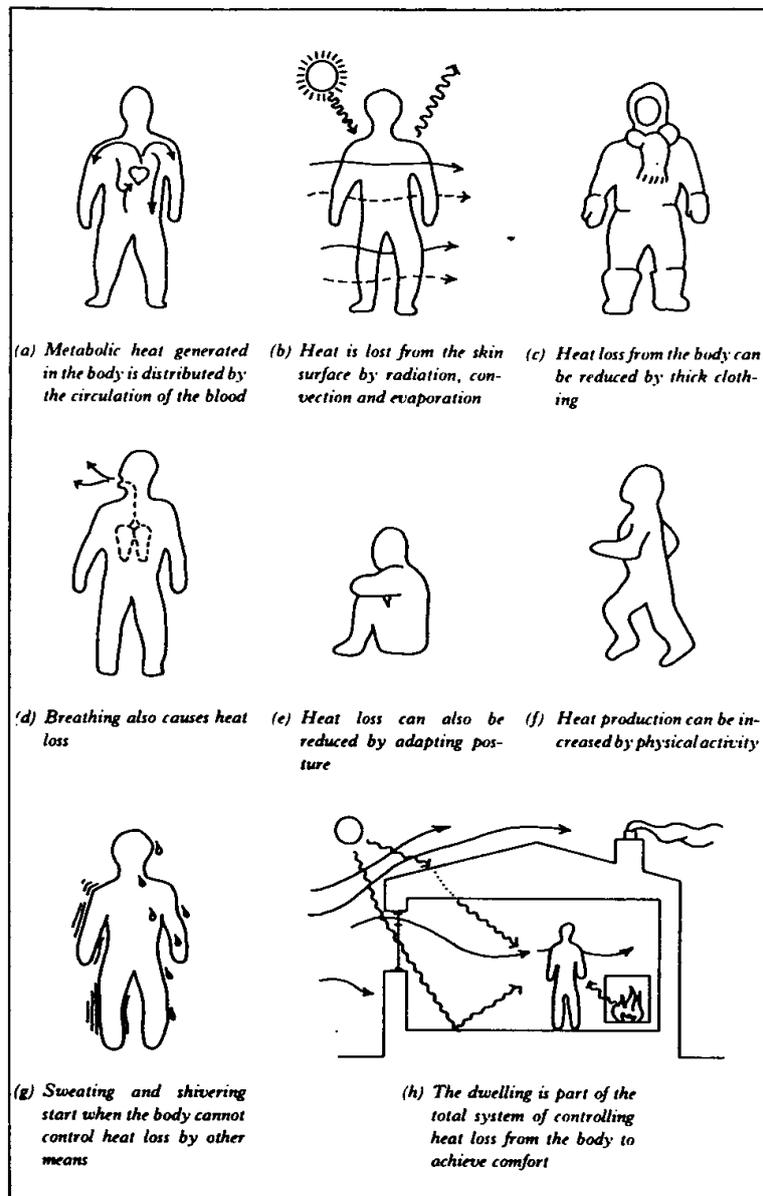


Figura 76: Rapporto fra uomo ed ambiente

Lo stadio successivo, che consente di aumentare il numero degli ambienti accessibili, è la protezione mediante abiti. Questa consente di conservare anche dove il freddo è intenso, il flusso dissipativo entro limiti accettabili. Supponiamo ora che l'uomo riesca a costruire un tetto; la sua

complessità aumenta, anche se poco, la capacità di mediare i disturbi dell'ambiente. Esso scherma la radiazione solare e le impedisce di essere irradiata dalla terra, così l'area coperta rimane più fresca di giorno e più calda di notte. Non è riparata dal vento ma è protetta da pioggia e neve. La ridotta complessità di questa dotazione, mentre è in grado di fronteggiare alcuni stati dell'ambiente circostante, è del tutto incapace di controllarne altri.

Chi abita questo tetto non sarà più informato, se non indirettamente, delle modificazioni di copertura del cielo, né delle precipitazioni; saprà invece tutto sul vento e sulle variazioni di temperatura, in quanto non vi è alcun dispositivo per intercettarne le informazioni.

Aggiungendo al tetto i tamponamenti opachi e trasparenti, ne aumentiamo la complessità e possiamo fronteggiare una quantità di stati dell'ambiente ancora maggiore.

Vento e oscillazioni di temperatura sono infatti attenuati; quindi le informazioni sulle condizioni dell'ambiente esterno capaci di raggiungere l'abitante si riducono ulteriormente. La possibilità di rendere modificabile nel tempo l'edificio, attraverso l'apertura-chiusura di porte e finestre, ne accresce la complessità consentendo altri adeguamenti al clima. L'installazione di un impianto per produrre calore, o meglio per dissiparlo e produrlo, alimentato mediante energia disponibile e regolato automaticamente oppure manualmente, fornisce all'edificio una complessità che gli consente di mantenere stabile la temperatura interna in situazioni ambientali molto differenti.

L'abitazione possiede in questo caso un grande numero di stati del sistema edificio per controbilanciare altrettanti stati in cui può trovarsi l'ambiente. Possiamo dire che la sua complessità, come regolatore, è adeguata rispetto a quella del contesto climatico, anche se questa complessità, come quella degli organismi omeotermi, costa in termini di energia e di vulnerabilità del sistema.

Indichiamo ora brevemente, usando la stessa parafrasi, il funzionamento di un complesso di edifici che costituiscono un sistema insediativo. Gli edifici interagiscono uno con l'altro e con il terreno coinvolgendo il vento, la temperatura, l'umidità e la radiazione solare, per determinare l'ambiente modificato del microclima urbano. Questo a sua volta influenza in maniera determinante il funzionamento dei vari edifici, e specificamente del loro interno ambiente modificato. In un diagramma si può rappresentare l'ipotesi di un impianto di teleriscaldamento e l'esistenza di un piano energetico per la città, che coordina i vari progetti pubblici e privati e i relativi programmi di intervento.

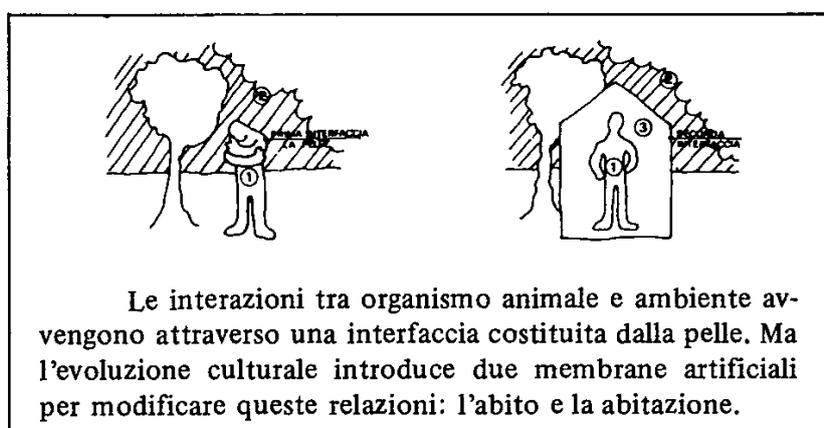


Figura 77: Contatto fra l'uomo e la natura

L'obiettivo della **progettazione bioclimatica** consiste nell'aumentare la complessità organizzativa del sistema mantenendone elevata l'affidabilità e con un consumo di energia ridotto al minimo. Ed è stato eseguito trasferendo all'involucro edilizio gran parte della complessità finora posseduta dall'impianto. Nei diagrammi presentati l'uomo veniva considerato come un sistema

formato da recettori ed effettori. Se la capacità di canale del recettore non è sufficiente, la sua complessità è bassa, l'ambiente viene rappresentato in modo assai grossolano. La rappresentazione che ne deriva risulta indifferente a molte differenze presenti nel clima locale. Poiché l'effettore è comandato dal recettore, anche se possiede una complessità sufficiente non sarà in grado di dare risposte adeguate, in quanto esse non registrano certe differenze. Lo stesso accadrebbe se la complessità del recettore fosse sufficiente e non lo fosse invece quella dell'effettore, se mancassero cioè determinate possibilità di intervento, determinate tecniche. Come chi esperto nella vela e buon conoscitore della meteorologia disponesse di una barca che non consente determinate manovre. Prima di descrivere in termini di spazio e tempo quali caratteristiche l'edificio dovrebbe assumere per aumentare la propria complessità, è necessario comprendere che una buona conoscenza delle condizioni climatiche è essenziale per decidere gli interventi più adatti.

Senza una profonda conoscenza della dimensione climatica del sito anche il progettista più esperto non è in grado di far corrispondere le tecnologie all'area climatica e fallirà quindi lo scopo. D'altro canto il climatologo più preparato, se manca di un patrimonio di soluzioni tecniche edilizie cui fare riferimento, non può tradurre tutto ciò che conosce del sito in termini di proposta progettuale. La capacità di SU - SC (*Sistema Uomo – Sistema Costruito*), considerato come sistema regolatore, non può dunque superare quella sempre di SU - SC, considerato come canale di comunicazione. Vedremo ora cosa significa aumentare la complessità dello edificio come sistema regolatore. Mentre l'organizzazione dello spazio era relativamente indifferente al problema dell'energia, quindi il sistema di differenze, cioè l'articolazione della struttura, era determinata in funzione della distribuzione interna, della tecnologia, del contesto urbano, ora essa dovrà essere conformata in rapporto a tale problema. Ciò accade attraverso un processo di graduale apprendimento dell'esperienza sia che tale processo si svolga nella realtà oppure mediante simulazione. Registrate le conseguenze energetiche di determinate strutture edilizie in rapporto a varie aree climatiche, si procede a correggere tali strutture perseguendo l'obiettivo di un miglioramento delle prestazioni che riguardano l'energia.

Occorre in tal caso possedere una rilevante capacità di registrare le differenze climatiche, definendole in termini di requisiti, e un repertorio di soluzioni tecniche articolato in modo tale da soddisfare tali requisiti. Le differenze climatiche ambientali si traducono perciò nelle corrispondenti differenze tecnologiche, che costituiscono la complessità acquisita dall'edificio.

Il progettista ha 3 tipi di domande cui rispondere:

1. Quali caratteristiche possiede il clima di questa località?
2. Quali soluzioni alternative si possono suggerire per ridurre i consumi di energia non rinnovabile?
3. Quale tra queste soluzioni risulta più rispondente per la località indicata?

Ogni domanda implica una condizione di incertezza, e la domanda si pone in quanto cessa lo stato di indifferenza. La quantità di informazione in grado di ridurre l'incertezza a un livello soddisfacente rispetto alla decisione che il progettista deve prendere. Rappresenta anche la complessità incorporata dal sistema edilizio in tutta questa operazione.

## 4.5 CLIMATIZZAZIONE E SISTEMA DI CONTROLLO

Se l'uomo potesse perseguire i propri obiettivi, e svolgere le relative attività finalizzate, nell'ambiente naturale, l'edificio sarebbe quasi inutile. Poiché invece esiste una differenza tra l'ambiente corrispondente ai requisiti dell'uomo, cioè tra l'ambiente artificiale e quello circostante naturale, risulta necessaria una mediazione. Il dispositivo tecnologico realizzato per mantenere

questa differenza è il sistema *edificio-impianto*. Poiché la nostra capacità di riconoscere un sistema dipende dal fatto che esso è in qualche modo differente dal suo ambiente circostante, l'edificio, almeno dal punto di vista termodinamico e ambientale, sarà tanto più identificabile quanto più si differenzia dall'ambiente esterno, e ciò avviene d'inverno e d'estate; mentre durante certi periodi, nelle mezze stagioni quando la temperatura esterna risulta uguale a quella richiesta all'interno, non si rileva differenza alcuna tra edificio e ambiente esterno; se non ci fosse l'oscillazione climatica giornaliera le stesse attività che si svolgono dentro l'edificio si potrebbero svolgere anche fuori. E' appunto durante l'inverno oppure d'estate che uno avverte maggiormente la necessità di un edificio, ed esperisce con maggiore intensità la differenza tra interno climatizzato ed esterno. Ed è in questo avvertire con sollievo la diversità dello spazio interno dell'edificio, nel riconoscere il differente grado di adeguatezza ai nostri bisogni, dello spazio interno rispetto allo spazio esterno, che diventa chiaro il significato di informazione termodinamica.

Nei momenti in cui il sistema si differenzia maggiormente dal suo ambiente circostante, contraddistinti anche dal massimo allontanamento dal suo stato di equilibrio, esso raggiunge il livello massimo di informazione termodinamica. Questa informazione si perde quando il sistema risulta diffuso nell'ambiente, non più distinguibile perché in stato di equilibrio, durante le mezze stagioni, per tornare a raggiungere un certo livello dovuto alla differenza, sia pure di segno opposto, con l'ambiente.

Naturalmente, poiché il sistema tende a diffondersi nello ambiente se qualcosa non lo impedisce, occorre isolarlo riducendo al minimo i trasferimenti di energia con tale ambiente per conservare la informazione termodinamica e fornire al sistema l'energia necessaria per rimpiazzare quella eventualmente dissipata. Se consideriamo le questioni energetiche e il modo in cui caratterizzano questa differenza, osserviamo che l'obiettivo microclimatico dell'uomo risulta differente dallo stato climatico dell'ambiente: l'uomo esige intorno a sé un ambiente microclimatico stabile, che mantiene quindi le stesse condizioni di temperatura, di umidità relativa, di ventilazione e radiazione solare, mentre l'ambiente circostante presenta invece condizioni continuamente variabili, oscillando nel breve termine dal giorno alla notte, nel lungo termine dall'estate all'inverno. L'uomo deve mantenere una differenza rispetto a questi due ordini di oscillazioni; l'architettura, isolando lo spazio dell'uomo rispetto allo spazio dell'ambiente, consente il mantenimento di questa distinzione. La distinguibilità di un sistema rispetto all'ambiente condiziona la sua possibilità di fornire lavoro. Nel fornire lavoro si diffonde nell'ambiente e diviene indistinguibile da esso.

Nel nostro caso, la differenza è fine, non mezzo per fornire lavoro. Il fine del dispositivo è infatti il mantenimento di questa differenza. Ma non si tratta neanche, come potrebbe apparire a prima vista, del problema di conservare l'informazione termodinamica rappresentata dalla presenza del sistema edificio distinto dal suo ambiente. Ciò che potrebbe trarre in inganno è la necessità di conservare intatto e funzionante l'edificio, facendone la manutenzione e restaurandolo quando lo richiede il suo stato di conservazione, avendo una concezione dell'edificio che tende a considerarlo come un sistema statico e immutabile.

Il livello di informazione termodinamica deve risultare ogni giorno diverso in rapporto alle mutevoli condizioni dell'ambiente climatico esterno, fino ad annullarsi, per riprendere a crescere in un andamento oscillatorio. Si tratta dunque di un problema di regolazione, ciò che lo edificio e l'impianto rappresentano è allora un sistema di controllo accoppiato con il sistema costituito dall'ambiente interno abitato. Con lo sviluppo delle tecniche di climatizzazione mediante impianti ad aria condizionata, il sistema edificio-impianto diviene un sistema di controllo a circuito chiuso o a retroazione nel senso cibernetico.

La possibilità di correggere qualsiasi deviazione dello stato dell'ambiente interno dall'obiettivo prefissato, ogni volta che se ne presenta la necessità, propone una concezione dell'architettura abbastanza diversa da quella tradizionale. Per l'impianto che funziona come

elemento di controllo anche l'involucro edilizio appartiene all'ambiente e ne segue le oscillazioni. Adesso infatti l'impianto si deve adattare per poterne controllare la stabilità climatica richiesta dagli abitanti.

Consideriamo ora il sistema edificio-impianto dal punto di vista della regolazione, si osservi il seguente diagramma:

$$A \quad D \quad SEI \rightarrow U$$

dove  $A$  rappresenta la serie di disturbi provenienti dallo ambiente esterno,  $U$  lo stato dell'ambiente interno abitato dall'uomo, individuato dalla gamma di temperature ritenute soddisfacenti, e  $SEI$  il sistema edificio-impianto che funziona come dispositivo regolatore in grado di ridurre con la sua azione l'influenza di  $A$  su  $U$ .

La capacità di regolazione di  $SEI$  sarebbe rilevante se, malgrado le perturbazioni, cioè la grande variabilità delle temperature, trasmesse da  $A$ , mantenesse costante la temperatura in  $U$  al valore desiderato. Dire che la temperatura viene mantenuta stabile significa dire che deve essere molto basso il numero dei valori che essa può prendere. Se  $SEI$  è un buon regolatore, la molteplicità dei valori assunti da  $U$  deve essere molto minore di quella dei valori di  $A$ .

Quanto più  $SEI$  funziona, tanto più, se inserito tra  $A$  ed  $U$ , fa diminuire la molteplicità trasmessa da  $A$  ad  $U$ ; in breve a chi abita  $U$  verrà evitata la conoscenza di tutto quello che succede in  $A$ . Se ci si trova in una stanza con l'aria condizionata e si può dedurre, poiché fa caldo nella stanza, che fa caldo anche fuori, allora quel condizionatore funziona male come regolatore. Se invece funziona bene (e le finestre sono chiuse) non sarà possibile farsi un'idea di quale sia la temperatura esterna. Il buon impianto di condizionamento arresta il flusso di informazione sulla temperatura che proviene dall'esterno.

Si può dimostrare, nell'ambito della teoria della regolazione che soltanto la molteplicità, cioè la complessità strutturale e funzionale, del regolatore  $SEI$  può far diminuire quella dovuta ad  $A$ . Questa legge della molteplicità necessaria diviene manifesta se consideriamo 3 casi: assenza di regolazione, regolazione limitata, regolazione completa.

Nel primo caso, tutta la varietà delle condizioni ambientali di  $A$  giunge ad  $U$ , se fa caldo in  $A$  si sente caldo in  $U$ , e analogamente per il freddo; nel secondo caso, vi è soltanto un impianto di riscaldamento ma non di raffrescamento: se fa freddo in  $A$ , non si avverte in  $U$ , mentre, quando fa caldo,  $U$  recepisce tutte le modificazioni di stato di  $A$ ; nel terzo caso, infine, l'impianto di condizionamento, più complesso del semplice impianto di riscaldamento, arresta qualsiasi informazione sulle perturbazioni dovute a troppo caldo o troppo freddo presenti nell'ambiente esterno  $A$ , e  $U$  esperisce solo la temperatura dell'ambiente interno voluta.

La regolazione dell'ambiente interno da parte del *regolatore-edificio* si è storicamente sviluppata in rapporto al contesto culturale ed economico; nel passato l'impianto non aveva complessità alcuna e l'edificio con il suo arredo doveva assumere quel minimo di complessità che gli consentiva di limitare la trasmissione verso l'interno delle perturbazioni climatiche.

Con lo sviluppo della meccanizzazione l'impianto diventò una macchina altamente complessa, capace di arrestare qualsiasi variazione di clima proveniente dall'esterno aggiungendo calore o dissipandolo per mantenere stabile lo stato dello spazio interno, e utilizzando energia per effettuare questa regolazione.

Ora, con la crisi energetica, occorre sviluppare la complessità di quel sistema che non consuma energia tradizionale e che è l'involucro edilizio.

## 4.6 CONCILIAZIONE TRA AMBIENTE ARTIFICIALE ED NATURALE

La cultura architettonica ha sviluppato negli anni più recenti una particolare sensibilità per i problemi dell'ambiente, del paesaggio, del luogo. Molte scuole di architettura si sono trasformate in scuole di progettazione ambientale e la stessa esigenza di integrazione tra discipline, che emerge di fronte ai problemi della programmazione alle varie scale, trova nell'ambiente il comune sistema di riferimento. Gli architetti hanno elaborato il concetto di "*sito*" e molte ricerche insistono sulla specificità del luogo, sulla necessità di comprenderne l'intima natura per progettare un edificio che ne traduca e manifesti l'identità. Le relazioni tra tipologia edilizia e morfologia urbana riflettono una tensione particolare per la località, che è contemporaneamente parte di città e struttura edilizia. Ma in tutto questo lavoro progettuale l'assenza di una concezione anche energetica dell'architettura impedisce di individuare l'identità ambientale e climatica del sito. Anche se risulta evidente il ruolo del tempo e del clima svolto assieme al suolo e alla terra nel comporre la fisionomia tipica del luogo: il *genius loci*.

### 4.6.1 DIMENSIONE CLIMATICA DELL'AMBIENTE

Passando ora a definire l'organizzazione climatica dell'ambiente si possono identificare 4 scale caratteristiche: il *macroclima* che comprende aree molto ampie dalla regione al continente (da 20 a 10.000 Km), il *mesoclima* cui si può riferire l'area urbana di varie città (da 1 a 20 Km), il *clima locale* che interessa aree variabili tra complessi di edifici e strutture insediative (da 100 m e 10 Km), il *microclima* che riguarda l'edificio o l'isolato (dal metro a 100m). Tra questi diversi livelli quello che interessa più direttamente la progettazione dell'architettura passiva o bioclimatica è il *clima locale*, esso infatti comprende lo edificio con il suo ambiente circostante e quella parte del tessuto urbano che si costituisce sulla base di un sistema unitario di spazi pubblici. Esistono vari tipi di classificazione del territorio in aree climatiche con finalità diverse che vanno dall'agricoltura all'aviazione, manca, nonostante per alcuni paesi siano state elaborate mappe climatiche in funzione della progettazione degli edifici, uno studio sistematico orientato alla costituzione di una climatologia edilizia.

Nell'ambito del Sottoprogetto RERE (*Risparmio di energia nel riscaldamento degli edifici*) del CNR *Progetto Finalizzato Energetica* sono state elaborate per l'Italia due mappe climatiche che definiscono, una per la stagione fredda l'altra per quella calda, sette zone omogenee relativamente ai fattori che possono influenzare il progetto edilizio. Per ognuna di queste aree vengono forniti ai progettisti degli orientamenti che consentono di adeguare la costruzione al clima locale. Perché il progettista possa adattare l'edificio al clima locale occorre che disponga di informazioni sistematiche sui fattori che lo definiscono. Tali fattori comprendono la temperatura, l'umidità relativa, la ventosità e l'irraggiamento solare, oltre naturalmente a dati sulle precipitazioni e sui fattori geografici che influenzano il clima locale. Vengono presi in esame, uno per uno, gli andamenti mensili dei principali fattori le cui combinazioni determinano le oscillazioni climatiche durante il corso dell'anno, quali la temperatura, la radiazione solare, l'umidità relativa, il vento e le precipitazioni, lo stato del cielo. Per la temperatura vengono presi in esame i valori medi mensili delle medie, delle massime e delle minime giornaliere; in un secondo momento vengono presi in esame per l'umidità relativa i valori massimi e minimi giornalieri in corrispondenza con le temperature minime e le temperature massime giornaliere.

L'analisi confrontata delle due variabili, consente di determinare quando la loro combinazione può rilevarsi svantaggiosa perché rende difficile il mantenimento del comfort ambientale, e quando invece può rivelarsi un vantaggio, e in che misura.

Da questa analisi parallela possono già essere fornite, ove particolarmente evidenti gli effetti, alcune priorità o consigli generali di progettazione per il controllo ambientale del comfort.

Per il vento entrano in gioco i valori di velocità media mensile e le direzioni prevalenti trimestrali, quindi fattori di intensità e geometria che già possono indicare, conosciute le due variabili temperature e umidità relative, le situazioni in cui può favorire esigenza di raffrescamento (vantaggio) o quando è particolarmente dannoso sia per le infiltrazioni e le perdite di calore per convezione, sia per l'effetto meccanico se associato a precipitazioni. Il flusso di radiazione media mensile incidente sul piano orizzontale viene confrontato con i valori mensili dell'indice di soleggiamento (espresso come rapporto fra il numero di giorni di soleggiamento effettivo e quello teorico). Ciò consente di valutare la disponibilità oltre che in quantità anche in frequenza della radiazione e di poterne sfruttare i benefici e controllare gli effetti di surriscaldamento in combinazione con gli altri fattori climatici già analizzati.

#### 4.6.2 ARCHITETTURA BIOCLIMATICA

Se analizziamo alcuni esempi di architettura *vernacolare* in diverse situazioni climatiche si possono riconoscere evidenti relazioni tra architettura e ambienti e dimostrare come anche indipendentemente dalla crisi della energia queste relazioni determinassero la morfologia degli edifici e degli insediamenti. Naturalmente l'ambiente non può essere ridotto al complesso dei fattori climatici, altre dimensioni ne caratterizzano la struttura, urbanistiche, economiche e sociali, rimane tuttavia chiaramente riconoscibile l'influenza dell'area climatica nell'adattare la tipologia edilizia ai suoi condizionamenti. Ci sono due processi attraverso i quali l'edificio viene costruito in rapporto al suo territorio: la presenza di specifici materiali da costruzione che sono influenzati dal clima; la morfologia dell'edificio conformata in modo da migliorare le interazioni esistenti tra uomo e ambiente climatico. Nelle zone costiere la presenza dell'acqua rende umido il clima e provoca la crescita di molte piante: i materiali da costruzione saranno dunque i rami e le foglie di queste piante, la morfologia sarà definita da tetti spioventi che proteggono dalla pioggia e dal sole e da pareti che essendo realizzate con rami intrecciati, consentono la ventilazione naturale. Nelle zone interne il clima secco rende difficile la presenza delle piante per la mancanza della acqua: la terra e le pietre sono allora i materiali da costruzione che rendono massicce le murature e piccole le finestre, la morfologia sarà compatta e tale da ridurre al minimo la ventilazione e la presenza del sole dentro l'edificio.

L'edificio moderno avrà naturalmente una complessità maggiore e un diverso rapporto con l'ambiente circostante, non potrà in ogni caso prescindere, dopo la crisi energetica, da un attento controllo delle interazioni con il territorio che implicano l'uso dell'energia. In questi anni molto lavoro è stato svolto nel campo dei sistemi passivi e dell'architettura bioclimatica.

Cercheremo di fare un elenco degli aspetti innovativi emergenti nell'ambito dei sistemi passivi:

1. L'attenzione tende a spostarsi dall'involucro edilizio, come dispositivo per mediare i trasferimenti di energia, all'uomo con la sua esigenza di mantenere costante il flusso dissipativo del proprio corpo verso l'ambiente. L'edificio diviene uno strumento di regolazione capace di preservare nel tempo la stabilità di questo flusso. Il benessere climatico, la cui percezione consente di assicurare la stabilità del flusso dissipativo mediante comuni interventi correttivi, risulta da una combinazione di vari processi

- fisiologici e psicologici che devono essere studiati per consentire una progettazione consapevole dell'edificio come dispositivo regolatore.
2. Il verso di questo flusso dissipativo dal corpo all'ambiente determina una situazione di asimmetria che rende il riscaldamento dell'ambiente assai diverso dal suo raffrescamento; mentre per riscaldare potrebbe al limite bastare la conservazione dell'energia emessa dal corpo mediante un adeguato isolamento dell'involucro edilizio, per raffrescare occorre un dispositivo dissipatore in grado di scaricare l'energia in eccesso presente nell'ambiente e di riportare così il flusso dissipativo corporeo entro valori accettabili. L'isolamento dell'edificio dall'ambiente circostante risulta quindi efficace nel caso del riscaldamento, ma è del tutto inutile per raffrescare.
  3. Dissipare energia presuppone innanzitutto evitarne le immissioni, e poiché una delle maggiori immissioni è costituita dalla energia proveniente dal sole, l'edificio a raffrescamento passivo deve evitare qualsiasi ingresso di radiazione solare ed esserne quindi protetto; è allora difficile parlare, come spesso accade, di edifici solari passivi, anche nel caso del raffrescamento. Il sistema passivo dissipativo estende oltre i sistemi solari l'ambito di interesse della climatizzazione naturale e richiede per questo una più articolata conoscenza delle caratteristiche climatiche della aria. Il clima risulta da un complesso di fattori climatici che comprendono la radiazione solare, ma anche i profili di temperatura, l'umidità relativa e il vento in direzione e intensità. L'edificio sarà progettato in questo caso tenendo conto non solo dei dati di radiazione ma di tutti quei dati che rappresentano la situazione climatica complessiva dell'ambiente nel quale dovrà essere costruito.
  4. Analizzare la situazione climatica complessiva significa analizzare il sito, avremo perciò un orientamento riferito al sito piuttosto che al processo o al prodotto, nella ricerca e nella progettazione dei sistemi passivi. Le stesse tipologie edilizie invece che essere raggruppate in base a comuni processi di captazione saranno identificabili in rapporto ad analoghe situazioni climatiche.
  5. Risulta assai difficile trovare in tutto il pianeta aree nelle quali la climatizzazione si trova ad affrontare soltanto problemi di riscaldamento oppure di solo raffrescamento, nella maggior parte dei casi questi problemi non sono separabili e l'edificio richiede riscaldamento e raffrescamento insieme. Un orientamento basato sul sito invece che sul processo di trasferimento di energia implica dunque il riconoscimento che il problema più importante della climatizzazione naturale è l'alternarsi di requisiti di riscaldamento e raffrescamento e che questo problema non si può risolvere con la semplice giustapposizione di dispositivi per il riscaldamento e per il raffrescamento.
  6. Si passa così da problemi di produzione e di dissipazione di energia a problemi di regolazione. L'edificio diviene un sistema regolatore in grado di modificarsi in risposta alle mutevoli condizioni dell'ambiente. Tra le ricerche più interessanti che si possono citare in questo senso ricorderemo quelle riguardanti l'uso del terreno come dispositivo di regolazione del clima interno all'edificio e quelle sull'involucro a resistenza termica variabile che prevede dispositivi per modulare i flussi di energia tra interno ed esterno.
  7. Se l'approccio all'edificio che svolgeva separatamente funzioni di riscaldamento e raffrescamento poteva anche essere statico, l'approccio all'edificio come sistema di regolazione deve essere necessariamente dinamico. I metodi di progettazione devono confrontarsi in questo caso con gli aspetti dinamici della costruzione e tener conto delle mutevoli condizioni ambientali e delle reciproche interazioni, Questi aspetti dinamici possono interessare:

- a) le caratteristiche geometriche dell'edificio che, in rapporto alla mutevole geometria della radiazione solare, producono una regolazione naturale del flusso di energia in entrata;
  - b) i dispositivi mobili che, regolabili manualmente o automaticamente, possono rendere variabile l'involucro edilizio e con esso il flusso di energia che lo attraversa;
  - c) l'uso accorto delle proprietà fisiche e chimiche dei materiali che, mutando le prestazioni in rapporto alle modificazioni dell'ambiente costituiscono un ulteriore dispositivo di regolazione.
8. Ciò richiede un passaggio da una progettazione basata sui componenti a una progettazione basata sul sistema. Oggetto delle ricerche non sono più i dispositivi di captazione, accumulazione e distribuzione, ma unità modulari complete. Requisiti di prestazione e specifiche devono riguardare l'intorno ambientale invece che il singolo componente, e l'intorno ambientale rappresenta un complesso di funzioni che comprendono accanto a quelle termiche anche quelle luminose, acustiche, ... La progettazione di questo modulo ambientale deve quindi tener conto delle funzioni che complessivamente costituiscono l'organizzazione dello spazio abitato.
  9. L'attenzione centrata sul sistema invece che sui singoli componenti comporta anche il passaggio dal modulo ambientale singolo alle sue aggregazioni a scala di fabbricato e a scala urbana. Si devono allora affrontare i problemi relativi al microclima negli insediamenti e alle reciproche interazioni tra vari ambienti nei fabbricati.
  10. A scala urbana il problema non può essere limitato alla sola climatizzazione, essendo questa condizionata dalla struttura tecnologica ed economica caratteristica dell'area. Ciò anche perché con l'aggiunta del raffrescamento passivo, riferito alle località nelle quali è necessario, si interessano paesi con situazioni economiche e culture molto diverse tra loro. Le aree nelle quali si pongono prevalentemente problemi di riscaldamento interessano i Paesi industrializzati con tecnologie comuni e analoghe situazioni economiche, le aree del raffrescamento riguardano soprattutto paesi emergenti nei quali i problemi della climatizzazione si intrecciano fortemente con quelli dello sviluppo e della trasformazione produttiva e sociale.
  11. In molti casi il raffrescamento negli edifici può essere mantenuto soltanto a condizione di una conseguente evoluzione nelle attività che in essi si svolgono. Mentre nei paesi industriali si svolgono entro gli edifici attività che per essere mantenute devono ridurre il consumo di energia, nei paesi emergenti con lo stesso consumo di energia si devono sviluppare meglio le attività, usare quindi meglio le risorse umane presenti. Non le stesse prestazioni produttive con una minore quantità di energia, ma migliori prestazioni produttive con la stessa quantità di energia.
  12. Nei paesi con attività prevalentemente agricola, gli insediamenti sono caratterizzati da una notevole complessità di attività, abitative e produttive insieme, che richiedono l'uso sul sito di diverse fonti di energia rinnovabili oltre che di tecnologie appropriate. Si passa dunque dal problema della sola climatizzazione degli edifici a sistemi integrati per la produzione di energia termica, elettrica, al riciclaggio di rifiuti organici.

Costruzioni singole e agglomerati urbani in ogni parte del mondo presentano connotati distintivi legati al carattere del luogo in cui si trovano. Fra questi caratteri il clima è uno dei più determinanti. Esso condiziona i modi di vita e le necessità di uso degli spazi, e perciò gli spazi. In questa identità fra costumi e architettura sta il fascino degli edifici e delle città antiche che, in forma sempre unica e diversa, troviamo in ciascuna contrada.

L'infinito numero di aree climatiche può essere raggruppato in alcune grandi famiglie, per ciascuna delle quali sono prevalenti tipi di insediamento distinti, gli stessi individuati dagli studi di analisi urbana. Così nelle città dei climi temperati prevale lo stesso rapporto fra spazi pubblici e privati, in quelli freddi l'edificazione alta e massiccia, nei caldi secchi bassa e compatta, nei caldi umidi minuta e isolata. Allo stesso modo i materiali impiegati sono quelli del luogo, e sono gli stessi che offrono le maggiori difese dalle asperità del clima: vedi l'uso dei materiali terrosi negli edifici aderenti al suolo dei climi caldi secchi o l'uso del legno negli edifici sollevati da terra dei climi caldi umidi.

### 4.6.3 MODELLI TIPOLOGICI DI ARCHITETTURA BIOCLIMATICA

Negli studi che identificano l'adattamento degli edifici all'ambiente si considerano quattro aree climatiche (*aree fredde, temperate, calde umide e calde secche*) per le quali si definiscono dei modelli tipologici di architettura bioclimatica.

#### Clima Freddo

Nei climi freddi gli edifici presentano la massima compattezza, sono protetti dal vento e costruiti (almeno per quelli monofamiliari) attorno ad un grande camino centrale che con la sua massa consente di accumulare l'energia prodotta o captata dal sole e di ridurre<sup>39</sup> l'ampiezza delle oscillazioni termiche.

#### Clima Temperato

Nel clima temperato gli edifici integrano la protezione dal sole con aggetti, porticati e aperture finestrate per captare le radiazioni solari nel periodo invernale. Gli edifici sono difesi dal vento ma aperti alla ventilazione naturale. Presentano dispositivi per regolare l'andamento del clima interno progettati in modo da evitare infiltrazioni ma tali da raccogliere il calore solare. Negli ambienti più caldi gli edifici si aprono su terrazze e giardini, lasciano entrare il sole durante la stagione invernale ma d'estate sono ombreggiati. La presenza dell'acqua e degli alberi rende possibile un raffrescamento per evaporazione mentre la massa e la ventilazione notturna riducono i picchi di temperatura. A questo tipo di architettura appartengono, ad esempio, le abitazioni vernacolari siciliane.

#### Clima Caldo Umido

L'articolazione spaziale degli edifici situati nei climi caldo umidi permette di accentuare la ventilazione attorno gli ambienti abitati. Logge, balconi e portici proteggono lo spazio interno dal sole mentre l'aggetto dei grandi tetti consente l'apertura di ampie finestre e porte per ventilare tutto l'edificio. Molto spesso il pavimento della casa viene sollevato rispetto al terreno al fine di evitare umidità eccessive.

#### Clima Caldo Secco

Gli edifici nel clima caldo secco costituiscono una protezione dal caldo estivo negli ambienti orientati verso sud e ovest. Presentano spesso tipologia a *corte*, con vasche d'acqua, dove è possibile, per produrre raffrescamento attraverso l'evaporazione che rende anche più umida l'aria. La massa assai consistente protetta dalla radiazione solare conserva gli ambienti interni freschi anche di giorno e quindi nelle ore più calde. Un mirabile esempio di architettura che si ispira a

---

<sup>39</sup> Di questo effetto si è ampiamente parlato nel 2° Volume del Corso di Climatologia dell'Ambiente Costruito.

questi principi è quella araba nella quale l'uso delle fontane e dell'acqua in genere per raffrescare ed umidificare gli ambienti raggiunge vette estreme.

## 4.7 APPROCCIO ALLA PROGETTAZIONE BIOCLIMATICA<sup>40</sup>

### 4.7.1 IL PROBLEMA GENERALE

La molteplicità delle opzioni problematiche attualmente espresse da parte di operatori di diversa estrazione culturale e specialistica (opzioni che sono del genere di carattere settoriale e componentistico) trovano una precisa motivazione storica, che, seppure ne giustifica la comparsa, non consente di fare su di esse affidamento in misura adeguata all'entità delle questioni poste sul tappeto.

Nel panorama di tali opzioni, quale risulta dall'ampia letteratura, dalle realizzazioni sperimentali, dai contributi ai numerosi convegni internazionali e nazionali, sono riconoscibili tre categorie fondamentali:

- le opzioni riguardanti i sistemi passivi che investono la totalità del manufatto edilizio e fanno riferimento ad una logica più complessa e, globale nonché ad una gamma di tecnologie che va dalla tradizionale all'industrializzata;
- le opzioni riguardanti i sistemi attivi che però si presentano come *esterne* all'architettura o comunque giustapposte, tecnologicamente complesse e riferite ad un quadro produttivo specificatamente industriale;
- le opzioni riguardanti fenomeni di autocostruzione ed autogestione di sistemi anche integrati, nella logica del "*do it yourself*", che seppure innovative sono lontane da una risposta sistematica e quantitativamente rilevante.

Sulla base di queste considerazioni ci poniamo le seguenti questioni relative alla tematica residenziale:

- esiste un modo di impostare il problema del risparmio energetico nel processo e nel prodotto edilizio, che risulti più complessivo ma soprattutto più *interno* all'architettura, tale cioè da derivare direttamente da questa, dai suoi caratteri morfologici e tecnologici e con il minimo ricorso a tecnologie esterne?
- se esiste, è possibile configurarne la struttura, si può cioè individuare un approccio metodologico congruente?

Una risposta positiva a tali quesiti, proprio perché articolata tutta all'interno degli strumenti propri dell'architettura intrinsecamente flessibili, adattabili, mutevoli, lascerebbe intravedere risultati e sviluppi verso la restituzione all'architettura ed edilizia di quei caratteri di identità che tradizionalmente in epoca preindustriale la diversificavano da luogo a luogo. La ridefinizione del sistema edilizio proposta si articola nei seguenti temi fondamentali:

- modi propri dell'architettura nei confronti del controllo climatico,
- requisiti del sistema edilizio,
- - ridefinizione del sistema edilizio in chiave bioclimatica,

---

<sup>40</sup> Questo capitolo è stato tratto dall'intervento di M. Antonietta Esposito, M. Benedetta Spadolini, Vito Veninata nel *Primo Seminario Internazionale di Architettura Bioclimatica* tenuto nel febbraio 1981 a Catania.

- -abaco delle soluzioni ambientali e delle soluzioni tecnologiche integrate, in chiave bioclimatica,
- - metodologia per una analisi energetica dell'ambiente costruito.

#### 4.7.2 UN'ARCHITETTURA ENERGICAMENTE CONGRUENTE

Dal punto di vista termo-igrometrico, alla scala edilizia occorre analizzare le quantità e le qualità degli scambi tra l'organismo umano e l'ambiente circostante, in sintonia, s'intende, con l'evolversi della struttura dei comportamenti, connessi a motivazioni di ordine socioeconomico e culturale variabili nel tempo e nello spazio.

Pertanto (contrariamente a quanto auspicato dall'*International Style* in tempi di totale abbandono al miraggio dell'uso incontrollato di tecnologie costose, inquinanti e non rinnovabili) non si tratta di pervenire alla definizione di un modello di organizzazione spaziale generalizzato, valido a tutte le latitudini e riconducibile ad una prefigurazione univoca della forma architettonica. Si tratterà invece di ripristinare il concetto di *relatività* dell'esperienza fenomenica e di assumere nuovamente come matrice di riferimento dell'atto progettuale la specificità del dato contestuale, non già per una riedizione di un passato ormai superato ma per l'instaurazione di un nuovo relazionarsi dell'uomo con l'ambiente naturale. Posto in questi termini il problema richiede:

- la definizione di sistemi ambientali in equilibrio dinamico cioè dotati di un'elevata capacità di adattamento al mutare dei dati fenomenici ivi compresi quelli bioclimatici (all'interno di questi sistemi si possono fissare le invarianti e lasciare libere di interagire le varianti ritenute idonee);
- la definizione di strumenti e metodi per il ripristino di un corretto equilibrio tra l'architettura e l'uso a basso costo del patrimonio delle risorse ambientali disponibili, salvaguardando altresì la qualità della produzione e la continuità con la tradizione storico - culturale;
- l'introduzione delle tecniche di controllo ambientale, oggi ampiamente disponibili, nel repertorio delle strumentazioni in atto nell'ambito delle metodologie di progettazione;
- la definizione in funzione del fattore climatico di modelli base di articolazione spazio-funzionale della residenza: i riferimenti sono reperibili nelle situazioni di condizione limite di sollecitazione esterna (nelle fasce territoriali a condizioni climatiche limite e pressoché costanti);
- l'approntamento di un abaco di soluzioni tipo, dedotte dai modelli-base di riferimento attraverso operazioni di selezione, interpretazione e interpolazione, finalizzati all'ottimizzazione dei livelli prestazionali dei sistemi ambientali propri delle situazioni climatiche intermedie della fascia temperata, caratterizzata da forti escursioni termiche sia diurne che stagionali. Tali situazioni climatiche inducono all'acquisizione della concezione dell'unità edilizia quale organismo biologico dotato di spiccate capacità di adattamento.

E' rilevabile che l'articolazione spaziale è pressoché inesistente nelle abitazioni dei popoli nomadi: queste sono dei veri e propri artifici con funzione di protesi rispetto all'organismo umano al quale risultano commisurate anche formalmente e dimensionalmente. In tal caso la mediazione tra uomo ed ambiente viene assolta unicamente dalle capacità protettive e quindi dalle valenze tecnologiche dell'involucro: in altri termini la connessione tra interno ed esterno è *diretta*.

Si può parlare invece di articolazione spaziale e quindi di sistema, laddove la connessione tra interno ed esterno si realizza attraverso una sequenza logica di più involucri protettivi, di *strati* costituiti da una giustapposizione di pieni e di vuoti, di alternanze di spazi coperti e scoperti (vedi, ad esempio, casa islamica). E' fuori di dubbio che il grado di complessità di tale articolazione cresce proporzionalmente all'evoluzione dei modi del vivere collettivo dei gruppi sociali.

Appare opportuno pertanto:

- suddividere per classi le modalità di espletamento delle connessioni dal punto di vista climatico tra spazio interno e spazio esterno;
- ricercare, di tali connessioni, le possibili corrispondenze biunivoche con le modalità di scambio tra sfera privata e sfera pubblica;
- attingere, attraverso l'istituzione della suddetta corrispondenza biunivoca, dal repertorio dei materiali formali dall'architettura quegli elementi costitutivi del sistema ambientale della residenza energeticamente congruenti.

Introducendo le variabili relative ai fenomeni delle escursioni termiche giornaliere e stagionali nella analisi dei condizionamenti indotti sulla strutturazione dello spazio abitativo alla scala edilizia nonché sulla struttura dei comportamenti collettivi, si perviene alla formulazione di modelli tipologici di comportamento del sistema ambientale. Ad un primo rapido esame si può tentare di distinguere tra grandi ordini di modelli definibili come segue:

- **statici**, quando il sistema ambientale una volta determinato rimane fisso in quanto è funzione dell'orientamento, della durata della radiazione solare, della direzione dei venti dominanti, ecc. Esso richiede al sistema tecnologico quelle prestazioni che consentono la conservazione per tempi più o meno lunghi delle condizioni termiche raggiunte al proprio interno. In tal caso il modello tipologico si può anche definire *anisotropo* nel senso che non consente la flessibilità delle condizioni d'uso dello spazio.
- **dinamici**, quando il sistema ambientale è libero di svilupparsi e modificarsi in tutte le direzioni e quindi è flessibile rispetto all'uso. Ciò si può ottenere in due modi: attraverso la modalità e l'intercambiabilità dei componenti il sistema tecnologico (vedi, ad esempio, la casa giapponese) oppure attraverso l'isolamento ermetico generalizzato dello spazio e col ricorso a costosissimi sistemi di climatizzazione artificiale (vedi la "*Maison Type*" proposta dall'International Style, il Centro - Soyuz a Mosca di Le Corbusier, ecc.). In tal caso il modello tipologico si può anche definire *isotropo*: l'alloggio si risolve in un contenitore di funzioni la cui articolazione possiede un grado minimo di definizione e di specificità per un grado massimo di flessibilità.
- **integrati**, quando nel sistema sono compresenti caratteri appartenenti ai due modelli tipologici precedenti. In tal caso il modello tipologico si può anche definire *sinergico* atto cioè a fornire quelle prestazioni che i due modelli statico e dinamico presi singolarmente non sono in grado di attivare.

Quanto sopra detto si limita però alla ridefinizione del sistema relazionale delle attività nel suo sviluppo planimetrico-distributivo: necessita altresì la verifica, con altrettanto rigore scientifico, del sistema ambientale stesso nel suo sviluppo volumetrico, vale a dire la ridefinizione delle grandezze fisiche relative ai volumi di spazio compatibili con l'espletamento delle funzioni fisio-psicofisiche umane, ponendo particolare attenzione alla sperimentazione del grado di applicabilità dei valori minimi.

### 4.7.3 SISTEMA TECNOLOGICO

Nella progettazione architettonica, se la definizione del sistema ambientale tende alla ottimizzazione dei rapporti relazionali tra le molteplici componenti della realtà, la definizione del sistema tecnologico corrispondente deve tendere necessariamente all'ottimizzazione, in termini di prestazioni, dei manufatti: a questi infatti, viene richiesto di tradurre un sistema puramente concettuale, qual è quello ambientale, in un sistema spaziale concreto che abbia tutti quei requisiti atti a soddisfare la domanda. Pur adottando le stesse metodologie di scomposizione e

ricomposizione della realtà, i processi di definizione dei due sistemi sono di senso opposto: quello *ambientale* muove dall'unità del problema, ne enuclea le componenti e ne fissa la struttura logica; quello *tecnologico* invece parte dalle componenti, ne interpreta il ruolo all'interno della struttura, dopodiché di ciascuna, presa singolarmente, ne ricerca gli elementi costitutivi. Questi ultimi a loro volta, attingendo al patrimonio delle risorse disponibili, si traducono finalmente in entità fenomeniche dotate di quelle prestazioni che, finalizzate a ricomporre l'unità del problema ne danno la soluzione concreta. Di un organismo edilizio quindi, mentre il *sistema ambientale* detta *l'impianto*, il *sistema tecnologico* realizza *l'involucro* ossia quell'insieme di connessioni tra interno ed esterno connaturate alle modalità di scambio desiderate tra uomo ed ambiente fisico. Però mentre il primo, *l'impianto*, può essere elementare o in casi estremi non esistere affatto, il secondo, *l'involucro*, è sempre presente, può talvolta prendere il sopravvento sull'altro ed è comunque sempre dotato di un considerevole grado di complessità.

Presso le società primitive l'impianto è spesso così elementare da potersi ritenere pressoché inesistente e l'involucro, assumendo un ruolo primario di connessione diretta, risulta essere fortemente caratterizzato rispetto alle condizioni climatiche del luogo. Al contrario, nelle società ad alto sviluppo tecnologico, quando ancora l'energia era reperibile a basso costo, si è andato sviluppando sempre più l'impianto, scaricando l'involucro di ogni funzione mediatrice che non sia quella di pura delimitazione formale fino ad arrivare alle costruzioni pneumatiche dove l'involucro è ridotto ad un sottile foglio di polietilene sostenuto da aria compressa.

Può risultare di notevole utilità per una lettura delle potenzialità energetiche dell'involucro scomporre l'edificio in quattro componenti fondamentali:

- a) il **basamento**, che determina l'attacco al terreno;
- b) il **corpo**, definito dalle chiusure esterne per lo più verticali e che può avere uno sviluppo a più livelli;
- c) la **copertura**, che può essere piana, inclinata, voltata, etc.;
- d) gli **elementi connettivi** di complemento (aggetti, logge, gallerie, balconi, schermature fisse o mobili, ecc.).

I manufatti che realizzano gli elementi costitutivi dei componenti a), b) ed e), se concepiti tali da essere in grado di fornire di volta in volta quelle prestazioni compatibili con i fenomeni termodinamici basilari (irraggiamento, conduzione, convezione) si possono definire "*supporti tecnologici passivi*" in quanto, interagendo tra loro e con le cavità opportunamente distribuite, possono attivare un *sistema di sfruttamento naturale dell'energia solare*. Attraverso tali manufatti l'involucro si adatta all'ambiente orientando aperture e chiusure, si conforma per schermare l'energia in uscita nelle notti invernali e quella in entrata nelle giornate estive. Quegli artifici o veri e propri manufatti che si possono ritenere aggiuntivi, riferibili al punto d), usati per migliorare il rendimento degli elementi costitutivi dell'involucro stesso soprattutto nei climi a forte escursione termica possono invece essere definiti "*dispositivi tecnologici passivi*".

Anche per il *sistema tecnologico*, come per quello *ambientale*, sembra valido, per un uso appropriato delle risorse naturali, il riferimento alle soluzioni tecnologiche tradizionali adottate in condizioni climatiche estreme e pressoché costanti. Da queste si può facilmente risalire alla formulazione dei principali fattori che concorrono alla definizione delle potenzialità energetiche dei manufatti edilizi. In prima approssimazione si possono individuare fattori:

- *qualitativi*, dati dalle caratteristiche fisico-chimiche dei materiali (densità, capacità termica, indice di riflessione, ecc.);
- *quantitativi*, dati dalla consistenza ponderale e dimensionale; quest'ultima a sua volta deve essere analizzata rispetto allo sviluppo del manufatto sia in profondità (spessore) sia in superficie (area);

- di *localizzazione*, dati dalla posizione che il singolo manufatto occupa rispetto all'intera costruzione e dall'angolazione rispetto al sole e alla direzione dei venti dominanti;
- *formali*, dati dalla geometria del manufatto.

Inoltre, rispetto ai fenomeni di irraggiamento, conduzione e convezione i manufatti definibili "*supporti tecnologici passivi*" si possono classificare in:

- *permeabili*, se consentono la trasmissione della radiazione e dell'aria;
- *impermeabili*, se riflettono la radiazione e/o non consentono la ventilazione.

Se valutati rispetto al tipo di tecnologia usata, i manufatti appartenenti a ciascuna delle suddette classi possono essere "*fissi*" a tecnologia *hard* o "*dinamici*" ossia mobili e regolabili a tecnologia *soft*. La suddetta classificazione può essere rivolta soprattutto a facilitare il reperimento di soluzioni integrate per le fasce climatiche temperate, nelle quali l'uso appropriato e scientificamente controllato, per lo stesso edificio, di supporti tecnologici permeabili opportunamente combinati con quelli impermeabili può consentire:

- la definizione della specificità dei ruoli delle singole parti costitutive dell'edificio stesso rispetto al bilancio energetico complessivo programmato;
- la reversibilità del sistema di prestazioni al variare periodico delle condizioni climatiche.

#### 4.7.4 RIDEFINIZIONE DEL SISTEMA EDILIZIO

In relazione ai fenomeni termodinamici che si manifestano nell'ambito bioclimatico, si pone il problema di una adeguata analisi del sistema stesso per individuare classi di elementi in grado di offrire prestazioni tra loro analoghe seppure di diversa entità.

Assunta la classificazione di sistema ambientale e sistema tecnologico essa può essere messa in relazione con le richieste di prestazione: captare o respingere l'energia radiante accumulare tale energia in forma di energia calorica diffondere o trasferire quest'ultima.

Per esprimere in misura adeguata la rispondenza degli elementi del sistema edilizio alle richieste di prestazione citate, si dovrà pervenire ad una idonea classificazione che individui e distingua: superfici, per la funzione del captare/respingere masse, per la funzione dell'accumulare cavità, per la funzione del diffondere e/o trasferire.

Un tale tipo di classificazione che estrae le prime due classi di elementi dal sistema tecnologico, e la terza dal sistema ambientale, sembra risultare pienamente soddisfacente sul piano intuitivo anche se, da un punto di vista di rigorosa sistematicità, presenta il limite di usare termini definitori tra loro disomogenei. Si ritiene pertanto che essa vada comunque utilizzata, salvo successivi perfezionamenti, perché è applicabile a qualsiasi livello scalare pur manifestando la sua evidente specificità. Un criterio per una prima classificazione di superfici, masse, cavità può essere quello che le distingue in base al sistema di appartenenza. Si avranno pertanto:

- *nel sistema edilizio*: SE = superfici edilizie ME = masse edilizie CE = cavità edilizie
- *nel sistema urbano*: SU, = superfici urbane MU = masse urbane CU = cavità urbane
- *nel sistema naturale*: SN = superfici naturali MN = masse naturali CN = cavità naturali

Ciò premesso si dovrà procedere all'individuazione di parametri per un'ulteriore classificazione delle tre classi di elementi in funzione del loro comportamento rispetto all'irraggiamento solare.

## 4.8 IL CLIMA E LA TRADIZIONE COSTRUTTIVA<sup>41</sup>

La valutazione del possibile uso di tecnologie diverse in edilizia comporta la necessità di leggere l'edificio come sistema di utilizzazione di risorse e come sistema di controllo ambientale, piuttosto che come rigida e astratta nomenclatura di elementi costruttivi. Lo studio della tradizione costruttiva dell'Italia Meridionale ha messo in luce, nell'ambito dei processi di costruzione adottati, proposte innovative atte a migliorare il grado di comfort degli spazi interni abitati.

Nell'analizzare questo patrimonio architettonico si è ritenuto più significativo anziché leggere globalmente la complessità delle scelte costruttive in relazione al clima nelle diverse zone, scomporre l'unitarietà del fenomeno costruttivo, analizzando singolarmente le molteplici invenzioni architettoniche e mettendole, di volta in volta, in relazione con le azioni termoregolatrici degli elementi del clima (difesa dal freddo). In particolare rispetto ai meccanismi di difesa dal caldo sono state sintetizzate in 4 punti le più significative azioni di regolazione del clima, che si possono così schematizzare:

1. ridurre la superficie esposta ai raggi solari rispetto al volume costruito;
2. impedire un eccessivo riscaldamento dell'involucro murario;
3. creare sensibili differenze di temperatura tra le varie parti della casa e tra la casa e l'ambiente circostante;
4. creare ampie zone d'ombra attraverso schermature fisse o mobili.

### 4.8.1 RIDUZIONE DELLE SUPERFICI ESPOSTE AI RAGGI SOLARI RISPETTO AL VOLUME COSTRUITO

#### **Orientamento.**

Negli insediamenti costieri dell'Italia Meridionale molti abitati marini si sono sviluppati in fasce strette disposte lungo l'asse est-ovest, ottimizzate per ricevere la minore quantità possibile di irraggiamento estivo. Egualmente, nelle strutture a corte di origine agricola, la disposizione dei diversi locali sui quattro lati è tale da assegnare agli ambienti destinati all'alloggio la disposizione di minore irraggiamento per i mesi estivi.

#### **Configurazione geometrica.**

Tra le molteplici soluzioni adottate nelle aree più calde del Mezzogiorno si individuano tre differenti conformazioni, quelle lungo i pendii, con realizzazione di case a terrazza, quelle costruite in pianura con lo sviluppo a cortili interni, e quelle sulle alture, tipiche dei paesi di origine medievale, arroccati intorno ad un nucleo centrale. A queste diverse disposizioni, legate alle particolari configurazioni orografiche (il terrazzamento, la collina e la pianura) corrispondono diversi gradi di isolamento dell'abitato dall'esterno.

---

<sup>41</sup> Questo capitolo è tratto dall'intervento fatto da M. Isabella Amirante e Gabriella Caterina nel *Primo seminario Internazionale di Architettura Bioclimatica* tenuto nel febbraio 1981 a Catania.

## 4.8.2 CONTROLLO DELLA QUANTITÀ DI CALORE TRASMESSA DALL'INVOLUCRO.

Nell'architettura del Mezzogiorno la coincidenza tra involucro esterno e struttura portante continua comporta proprietà termiche essenziali per la climatizzazione della casa. L'involucro murario, inteso come frontiera climatica tra spazio interno ed esterno, assolve alla funzione essenziale di ridurre al minimo, nei periodi più caldi, la quantità di calore che penetra nelle ore diurne all'interno dell'abitazione. In relazione alle specifiche proprietà dei materiali più diffusi nel Mezzogiorno (tufi, pietre calcaree, adobi) l'azione di frontiera dell'involucro murario si esplica soprattutto operando sulle superfici esterne in modo da conferire loro un notevole potere riflettente, avvalendosi dell'inerzia termica delle strutture in pietra e riducendo al minimo le aperture che interrompono l'effetto di barriera dell'involucro esterno.

### Potere riflettente delle superfici.

La giacitura delle superfici rispetto ai raggi solari, il loro colore, il grado di opacità sono tutti elementi che, saggiamente adoperati possono costituire un ulteriore valido schermo all'ingresso del calore nella casa. E' questa consapevolezza che ha determinato la diffusione, nell'architettura costiera e in quella dei paesi interni più caldi, dell'uso del **bianco** come colore dominante, sia esso ottenuto mediante imbiancatura a calce o con l'adozione di pietra calcarea chiara lasciata a vista.

### Inerzia termica della muratura.

Nel Mezzogiorno, la costruzione in pietra, che richiede sempre spessori notevoli, consente di utilizzare la capacità termica dei materiali in relazione alla variazione delle temperature tra il giorno e la notte, usufruendo efficacemente del raffreddamento notturno.

### Spessore delle pareti verticali.

Lo spessore delle pareti verticali (dell'ordine dei 50 cm), il notevole peso delle coperture, comunque esse siano realizzate (volte in tufo, ricoperte con astrico, volte in pietra, solai piani con massetti molto spessi, ecc.), la presenza quasi costante di corpi aggiunti (scale, ballatoi, loggiati che aumentano lo spessore delle pareti specialmente nelle facciate esposte a sud) sono tutti elementi che contribuiscono a rendere *pesante* l'insieme dell'involucro murario. Unici elementi che interrompono questo effetto di barriera dell'involucro sono le aperture, porte e finestre, che di conseguenza vengono realizzate in modo tale da ridurre al minimo il loro effetto di *ponte termico*.

## 4.8.3 CREAZIONE DI AMBIENTI A DIFFERENTE TEMPERATURA.

Le forme più rudimentali di abitazioni ricavate utilizzando e adattando gli anfratti rispondono molto bene, sul piano climatico, nelle zone caldo-secche. Infatti, essendo ricavate lungo scoscesi pendii rocciosi, gole, valloni, canjons, si trovano incassate nella roccia ad una profondità tale da non risentire che minimamente delle escursioni termiche esterne. In questo tipo di ambienti, per la differenza di temperatura tra la parete esterna riscaldata dai raggi solari e quelle interne più fredde, si generano dei moti convettivi che contribuiscono a mantenere fresco lo spazio interno.

### Effetto refrigerante della roccia e dei terrapieni.

La geometria stessa delle configurazioni a terrazza e dei nuclei abitati sorti lungo i crinali delle colline favorisce lo sfruttamento dell'effetto refrigerante della parete rocciosa utilizzata

come supporto, integrandola intimamente alla struttura dell'abitato. Nelle case a terrazza, ricavate nei fianchi di formazioni rocciose, di gradini orografici naturali o sui terrazzamenti realizzati artificialmente tagliando il fianco della collina, si opera in modo da utilizzare la parete verticale del gradino come parete stessa della casa, che presenta in questo modo due o tre pareti a temperatura costantemente più fredda, oltre il piano di appoggio. Dal pavimento verso il soffitto e dalle pareti a contatto della roccia verso le pareti esterne si generano di conseguenza moti convettivi, agevolati dalla disposizione delle aperture verso l'alto<sup>42</sup> che favoriscono la fuoriuscita dell'aria più calda.

### **Effetto cortile.**

In tutta la tradizione mediterranea il sistema *a corte*, con soluzioni più o meno raffinate in relazione alle particolari condizioni climatiche e allo sviluppo di culture più o meno evolute, è stato elaborato, oltre che come forma di abitazione comunitaria, come un complesso organismo termoregolatore. La *casa a corte*, infatti, oltre a sfruttare, come già visto, l'inerzia termica delle murature, utilizzando sapientemente la configurazione geometrica e l'alternanza di pieni e vuoti, consente di regolare, oltre l'irraggiamento, anche, la ventilazione e l'umidificazione, allo scopo di climatizzare sia lo spazio vuoto della corte (che è uno spazio collettivo destinato a svolgere specialmente in estate la maggior parte delle attività diurne) sia gli ambienti che su di essi si affacciano.

I meccanismi termici principali sono essenzialmente di due tipi: la ventilazione per effetto camino, dipendente dalla configurazione geometrica del cortile, e la permanenza di una sensibile differenza di temperatura tra parti alte e basse del cortile, accentuata dall'irraggiamento notturno verso il cielo chiaro del suolo e di tutte le superfici orizzontali riscaldate dal sole durante il giorno.

## **4.8.4 CREAZIONE DI ZONE D'OMBRA ATTRAVERSO SCHERMATURE FISSE O MOBILI.**

In un'architettura che deve difendersi dal sole lo spazio d'ombra è, infatti, in primo luogo assenza di sole e sensazione di fresco<sup>43</sup>; in secondo luogo si configura come una zona intermedia tra spazio indefinito e spazio racchiuso, tra esterno ed interno. I meccanismi, la geometria degli spazi d'ombra sono quelli del sole e perciò legati alla variabilità nel tempo e nello spazio del suo corso. Dall'alba al tramonto, dall'inverno all'estate, l'arco del sole e la sua altezza sull'orizzonte cambiano gli spazi d'ombra e ne suggeriscono una utilizzazione variabile temporale, prevalentemente estiva. Le comunità dell'Italia meridionale, come del resto tutti i paesi che si affacciano sul Mediterraneo, hanno fatto largo uso di questa possibilità di difesa dal caldo e dalla luce eccessiva, dapprima utilizzando la natura, poi costruendo spazi d'ombra sempre più complessi e assoggettando la natura stessa, con l'uso appropriato di vegetazione a foglia caduca, alla variabilità dell'esigenza di ombra e di sole.

### **Configurazione orografica.**

La morfologia degli elementi naturali e in particolare la presenza di rilievi altimetrici, variamente orientati, determina una riduzione delle ore di insolazione che può incidere anche

---

<sup>42</sup> Anche l'architettura araba in zone desertiche sfrutta l'effetto camino di aperture nella copertura per attivare una ventilazione notturna quando l'abbassamento della temperatura esterna consente una refrigerazione dell'edificio.

<sup>43</sup> Si ricordi quanto detto nel 1° Volume del Corso a proposito della temperatura aria-sole e sulle sensazioni provocate sulla pelle.

sensibilmente sulle condizioni climatiche locali. La particolare configurazione orografica dell'Appennino meridionale, che si protende sovente fino al mare con estese penisole, ripidi pendii e profonde gole scavate nei suoi rilievi, ha determinato la formazione di coste molto frastagliate, costellate di piccole insenature chiuse lateralmente da alte pareti rocciose. In questi luoghi, di preferenza, si sono insediate le piccole comunità disseminate lungo la costa dove al riparo di uno sperone roccioso, l'abitato ha potuto avvantaggiarsi della vasta zona d'ombra, fornita dalla particolare configurazione orografica.

### Costruzione di spazi d'ombra.

Nell'Italia meridionale la compattezza dell'abitato favorisce in generale la creazione di ampie zone d'ombra; in particolare la dimensione sempre molto ridotta delle strade, difficilmente superiore a 3 metri, fa sì che, ad eccezione delle ore centrali della giornata, esse siano in ombra per buona parte del giorno. La strada e le rare piazzette che si aprono in questi tessuti edificati compatti, diventano l'ideale completamento della casa, luoghi di incontro e di attività all'aperto. Le coperture a cupola prevalentemente estradossate, caratteristiche delle zone costiere campane, e quelle coniche o troncoconiche, che si riscontrano in Puglia, per la loro forma godono in modo continuo dell'effetto raffreddante dell'ombra in movimento. La geometria elementare del quadrato e del rettangolo si arricchisce di elementi *accessori*, logge, porticati, scale esterne che migliorano il funzionamento climatico della casa.

### L'ombra della vegetazione.

La possibilità di ottenere, mediante l'impiego della vegetazione, zone d'ombra mutevoli al variare delle stagioni è stata ampiamente utilizzata \*dalle comunità del Mezzogiorno a vocazione prevalentemente agricola.

Agrumeti e vigneti, elementi costitutivi tipici del *giardino mediterraneo*, che hanno caratterizzato le sistemazioni agricole a terrazza di tanta parte delle coste tirreniche, soprattutto in Campania hanno contraddistinto anche l'immagine della casa. La configurazione di queste colture, basata su un reticolo spaziale a maglia quadrata o rettangolare costituito da sostegni lignei orizzontali e verticali, si trasforma, nella casa rurale, nel pergolato che delimita spesso lo spazio aperto della corte agricola. Il pergolato, spoglio d'inverno e coperto d'estate dal fogliame delle viti o di rampicanti, viene costruito dagli stessi contadini con elementi molto semplici ed economici realizzando, con una minima spesa, un comodo spazio di penombra. Il pergolato è stato presto trasferito anche nelle strutture più tipicamente urbane e caratterizza molti dei piccoli centri delle coste campane, impiantato non solo nei cortili ma anche sui terrazzi, che diventano, in questo modo, abitabili durante i mesi estivi.

## 4.9 I COMPONENTI FONDAMENTALI PER L'ARCHITETTURA BIOCLIMATICA

Si è visto nel capitolo precedente quali problemi pone la stessa definizione di *Architettura Bioclimatica*. Per brevità qui intenderemo quell'Architettura che è in grado di temperare il minimo dispendio di energia fossile pur nel rispetto delle condizioni di comfort interno per l'uomo. L'idea di costruire un edificio energeticamente autosufficiente che non richiede apporti energetici esterni, ad eccezione di quelli solari ed interni, è da considerarsi quasi un'utopia<sup>44</sup> per cui la

---

<sup>44</sup> Negli anni '70 sono stati effettuati studi teorici e sono stati anche costruiti prototipi di edifici detti a *zero energia* cioè capaci di essere del tutto autosufficienti a mantenere le condizioni di comfort interne con l'ausilio delle sole fonti energetiche rinnovabili (ad esempio energia solare, biomassa, eolica, ...). Queste esperienze dimostrarono che, se pur realizzabili, questi edifici risultavano poco confortevoli e questa linea di ricerca non ha più avuto sviluppi.

tendenza attuale è quella di progettare e costruire edifici capaci di ridurre al minimo i consumi energetici pur garantendo condizioni di comfort interno (sia relative alle condizioni di benessere termoigrometriche che di qualità dell'aria) ottimali.

E' opportuno qui considerare il fatto che il futuro dell'architettura bioclimatica non è quello dipendente dalle nuove costruzioni ma dal recupero del patrimonio edilizio esistente. Basta considerare, infatti, che la percentuale di nuove abitazioni è inferiore all'1% annuo rispetto all'edificato esistente e che pertanto poco può incidere l'applicazione dei concetti di *architettura bioclimatica* alle nuove costruzioni. Molto si può fare, invece, agendo sui vecchi edifici da ristrutturare. Naturalmente le metodologie di intervento sono molto più complesse rispetto a quelle possibili per le nuove costruzioni perché avranno in più vincoli architettonici (ad esempio per edifici storici) e limitazioni delle possibilità di intervento (per le tipologie costruttive e tecnologiche non facili da modificare) e richiedono uno studio preliminare molto più dettagliato e particolare.

In questo capitolo vogliamo studiare i componenti fondamentali dell'architettura bioclimatica, così come si sono affermati negli ultimi vent'anni. In particolare si esamineranno le tipologie costruttive dette *sistemi passivi* cioè tali da non richiedere apporti energetici esterni perché capaci essi stessi di fornire energia all'edificio nei quali sono inseriti e, brevemente, i *sistemi attivi* intesi come sistemi aggiuntivi che captano energia solare e la distribuiscono all'edificio mediante un'impiantistica del tipo tradizionale.

Questi elementi sono così classificati:

#### Sistemi passivi

- Sistemi a guadagno solare diretto;
- Sistemi a guadagno solare indiretto;
- Sistemi a guadagno misto;

#### Sistemi attivi

- Sistemi a collettori piani ad acqua;
- Sistemi a collettori ad aria;
- Sistemi misti.

Non si deve, però, pensare che per avere una progettazione *bioclimatica* occorre inserire uno o più elementi passivi nell'edificio perché si commetterebbe un errore concettuale grave. La progettazione *bioclimatica* può ben coincidere con quella che più volte si è definita *energeticamente cosciente*. Pertanto tutti gli interventi che portano alla limitazione degli sprechi energetici e che possono rendere l'edificio meno avido di energia esterna sono da considerare nella direzione giusta per una corretta progettazione *bioclimatica*.

Vedremo, infatti, che l'inserimento di elementi *passivi* non sempre è possibile senza sconvolgere l'architettura dell'edificio o modificarla in modo da rendere possibile il suo utilizzo. Ad esempio il *muro Trombe - Michell* non si può inserire in qualsivoglia costruzione perché la sua peculiarità impone una riprogettazione architettonica dell'edificio: esso deve avere una faccia esposta a sud e su questa si inserisce una parete massiccia opportunamente attrezzata (vedi nel prosieguo la descrizione di questo elemento) e priva di finestre. La facciata a sud è solitamente quella più pregiata dal punto di vista architettonico e accecarla con una parete nera e massiccia non è sempre accettabile. Lo stesso discorso vale per gli altri elementi passivi.

---

Per ridurre le perdite di calore durante il periodo invernale, ad esempio, si utilizzavano pareti fortemente isolate e infissi del tutto stagni. Gli svantaggi erano di varia natura: i costi di costruzione erano elevati, non si aveva ventilazione interna sufficiente per i ricambi d'aria fresca esterna.

Meglio è cercare di fare in modo che le funzioni di captazione dell'energia solare sia svolte dallo stesso edificio (opportunamente orientato e con un involucro esterno ben studiato) o quanto meno che si possano limitare le perdite energetiche in modo da ridurre al massimo i consumi. In questa direzione si sta muovendo la legislazione nazionale che cerca di incentivare la progettazione e la costruzione di edifici con disperdimenti ancora più limitati di quanto la L. 10/91 richiede. In alcune regioni (Emilia Romagna, Toscana, Lombardia e Province Autonome di Trento e Bolzano) i regolamenti edilizi premiano con una sensibile riduzione dei costi degli oneri di urbanizzazione il maggior costo della riduzione dei disperdimenti oltre il minimo di legge.

#### 4.9.1 SISTEMI PASSIVI

Con questa poco felice definizione ci si intende riferire ad elementi costruttivi dell'edificio (pareti, finestre, schermi, ...) capaci di trasferire energia solare all'edificio e quindi di limitare il consumo di energia esterna *non rinnovabile*<sup>45</sup>. Un uso intelligente di componenti passivi può ridurre considerevolmente (20 ÷35%) i consumi di energia degli edifici. In pratica il comportamento di questi elementi è assimilabile a quelli dei collettori solari; essi captano energia solare e la distribuiscono in qualche modo all'interno dell'edificio.

Le problematiche sull'utilizzo dei componenti passivi sono sensibilmente diverse a seconda che ci si riferisca alle condizioni invernali o alle condizioni estive. Il comportamento di un elemento passivo, infatti, non è sempre positivo. Ad esempio, se utilizziamo un elemento per catturare molta energia solare durante il periodo invernale abbiamo poi l'esigenza di limitare il surriscaldamento estivo mediante artefici sullo stesso elemento passivo e anche con la sua parziale esclusione. Quasi sempre i componenti passivi hanno lo scopo di riscaldare l'edificio e quindi occorre sempre prevedere un sistema di protezione estivo dal surriscaldamento interno.

##### Sistemi a guadagno solare diretto

Con questi sistemi si fa in modo da raccogliere l'energia solare e di trasferirla poi all'interno dell'edificio che, per conseguenza, si riscalda. Questi elementi sono, in pratica, dei collettori solari a tutti gli effetti e sfruttano in massima parte l'*effetto serra*<sup>46</sup>. L'accumulo dell'energia solare raccolta può essere effettuato sia in masse termiche opportune che nelle stesse strutture dell'edificio. Nella seguente *Figura 78* si ha un esempio di *sistema a guadagno diretto* costituito da una generosa vetrata rivolta a sud<sup>47</sup> che capta la radiazione solare entrante. L'accumulo è costituito dalla massa delle murature interne che hanno isolante esterno per avere una buona capacità termica. Questo sistema, facilmente realizzabile ed architettonicamente non impegnativo, funziona bene durante il periodo invernale ed è in grado di riscaldare gli ambienti strettamente a contatto con le vetrate esterne. In estate occorre limitare il flusso solare mediante l'utilizzo di schermi solari (anche mobili).

---

<sup>45</sup> Con questo altrettanto infelice neologismo si vuole indicare una forma di energia che non riduce le risorse terrestri. In realtà l'energia non si crea e non si distrugge ma si trasforma, come insegna la Termodinamica, e quindi il concetto di *rinnovo* appare un paradosso. Si considera *rinnovabile* l'energia non proveniente da combustibili fossili come, ad esempio, l'energia solare, l'energia eolica, l'energia da biomassa. L'energia proveniente dai combustibili fossili (solidi, liquidi o gassosi) è detta *non rinnovabile* poiché ottenuta a spese di risorse terrestri non più *rinnovabili*.

<sup>46</sup> L'*effetto serra* è generato, come già visto nel 1° Volume, dalla forma particolare del fattore di trasmissione solare del vetro che lascia passare quasi interamente le radiazioni di bassa lunghezza d'onda (cioè inferiori a 3  $\mu\text{m}$  quali le radiazioni solari) e blocca quella di elevata lunghezza d'onda (cioè oltre i 9  $\mu\text{m}$  quali le radiazioni emesse dai corpi a temperatura inferiore a 500 K).

<sup>47</sup> Si ricordi che l'esposizione migliore per la raccolta dell'energia solare durante l'intera giornata è quella a *sud*. L'inclinazione ottimale è pari al valore della latitudine più 10° in inverno e -10° in estate.

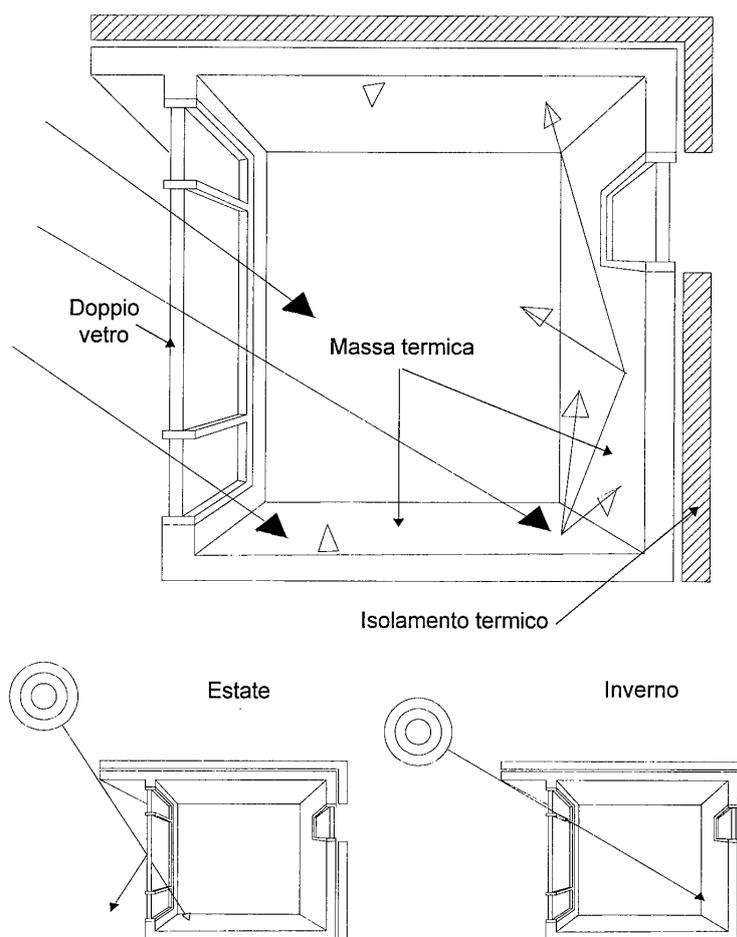


Figura 78: Schematizzazione di un sistema a guadagno diretto

Le radiazioni solari di bassa lunghezza d'onda raggiungono le masse interne dell'ambiente, vengono da queste assorbite e trasformate in energia interna (accumulo termico) e quindi, per convezione termica, ceduta all'aria interna (riscaldamento ambiente).

Possiamo così schematizzare le caratteristiche del sistema a guadagno diretto:

- Necessità di avere una vetrata esposta a sud; si possono anche utilizzare doppi vetri o, nei climi più rigidi, tripli vetri.
- Necessità di avere masse di accumulo termico all'interno dell'ambiente ben isolate sia per non disperdere all'esterno il calore accumulato che per evitare il surriscaldamento interno degli ambienti limitrofi.
- Necessità di protezione solare durante il periodo estivo da attuare mediante schermi, tendaggi o altri sistemi idonei.

L'elemento principale dei sistemi *a guadagno solare diretto* è la vetrata che funge da elemento di captazione dell'energia solare (come in un collettore piano). La superficie di questa vetrata deve essere sufficiente a captare l'energia per riscaldare almeno<sup>48</sup> l'ambiente retrostante che funziona da *serra*.

Ciò significa anche che le masse di accumulo interno debbono essere sufficienti a garantire, anche nel periodo invernale, un'oscillazione termica non superiore ai 10÷20 °C.

<sup>48</sup> Si vedrà in seguito come con il sistema Barra-Costantini si migliori molto la raccolta dell'energia solare mediante l'utilizzo di una superficie di captazione costituita da una sorta di veneziana ad elementi inclinati che offre ai raggi solari una superficie maggiore di quella apparente frontale.

Rispetto ad altri sistemi passivi (vedi nel prosieguo) questo sistema appare architettonicamente flessibile e facilmente inseribile in un contesto progettuale di tipo convenzionale e con costi aggiuntivi limitati, vedi *Figura 79*.

Per contro si ha l'inconveniente, in estate, di doversi proteggere dalla forte irradiazione solare e quindi dagli eccessivi surriscaldamenti ambientali a meno di non utilizzare schermi esterni che blocchino la radiazione stessa (vedi particolari in basso della *Figura 78*).

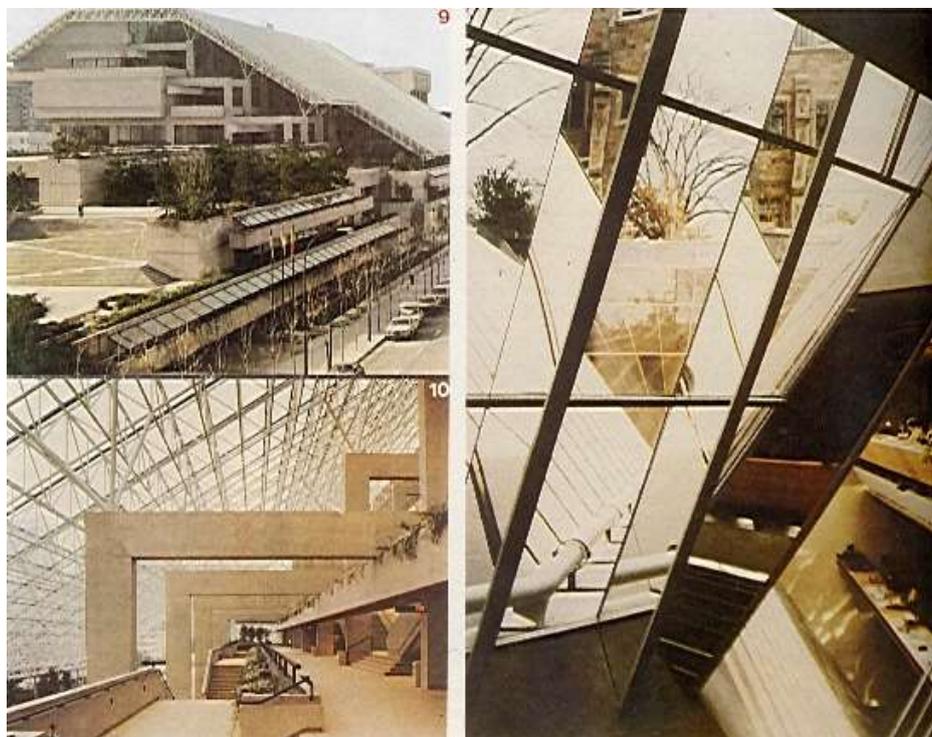
Inoltre, soprattutto alle nostre latitudini, si possono avere problemi dovuti all'eccessiva illuminazione diurna che danneggia l'arredamento interno<sup>49</sup> e che possono essere risolti mediante tendaggi, veneziane, ....

Per avere un'idea di quanto possa contribuire la superficie vetrata al riscaldamento ambientale si può prevedere, di larga massima, una superficie di captazione secondo la seguente tabella:

Temperatura esterna (°C)	Superficie vetrata per m <sup>2</sup> di pavimento
-7 ÷ 1	0,30 ÷ 0,40
2 ÷ 7	0,10 ÷ 0,25

La massa di accumulo termico è costituita, come già detto, dalle pareti interne che non devono avere spessore inferiore a 10 cm per limitare le oscillazioni termiche interne. Per una stanza di dimensioni 4 x 4 m<sup>2</sup> occorrono mediamente circa 6 m<sup>2</sup> di superficie vetrata e quindi si ha quasi il totale impegno della superficie esterna (a sud).

L'interno dell'ambiente solarizzato deve assorbire uniformemente l'energia solare e quindi occorre distribuire l'energia entrante in modo uniforme (ipotesi della Sfera di Ulbricht già indicata nel Volume 1°) utilizzando colori chiari per le superfici riflettenti poste all'interno. Pertanto i colori saranno scuri per le pareti che fungono da accumulo termico mentre saranno chiari (o addirittura traslucidi) per gli elementi leggeri e le pareti non accumulatrici di calore.



*Figura 79: Esempio di solarizzazione nella Biblioteca della facoltà di storia di Cambridge*

<sup>49</sup> La radiazione solare di bassa lunghezza d'onda produce un invecchiamento rapido delle superfici colpite e quindi si hanno scolorimenti degli arredi interni, indurimento e ingiallimento delle materie plastiche trasparenti.

Il calcolo esatto dei contributi solari richiede l'applicazione delle teorie di simulazione già esposte nel 2° Volume. Si tratta, comunque, di metodi complessi e che richiedono notevoli risorse di calcolo e impegno nella scrittura dei bilanci energetici. Nel prosieguo si esporrà anche una metodologia di calcolo semplificata per il calcolo di prima approssimazione di questi elementi passivi.

### Sistemi a guadagno solare indiretto

Con questi sistemi si opera la raccolta dell'energia solare con elementi esterni all'ambiente da riscaldare e si convoglia l'aria riscaldata mediante canali naturali nella stessa struttura dell'edificio. La captazione solare viene effettuata con un collettore naturale nel quale la superficie captatrice è costituita da una grossa parete annerita esternamente e che funge anche da massa per l'accumulo termico.

Il sistema più noto è il *muro di Trombe - Michell* schematicamente riportato nella seguente

*Figura 80.* La parete esterna, di colore nero ed esposta a sud per raccogliere la massima energia solare, è ricoperta da una superficie vetrata (o anche a doppi vetri a seconda dei climi). L'energia raccolta dalla parete (di solito massiccia ed isolata nel lato interno) viene ceduta all'aria nell'intercapedine fra parete e superficie vetrata e questa viene canalizzata verso l'ambiente attiguo mediante bocchette di aerazione aventi dimensioni di circa 1/100 della superficie del pavimento.

In una versione più semplificata la parete esterna massiccia non viene isolata e si lascia passare il calore verso l'ambiente interno per convezione ed irraggiamento dalla faccia interna. Questo sistema ha mostrato numerosi inconvenienti, primo fra tutti il forte surriscaldamento estivo dell'ambiente interno.

Questo sistema evita il forte soleggiamento estivo ed invernale all'interno e quindi limita il danneggiamento dell'arredamento. L'aria viene riscaldata nell'intercapedine con il vetro esterno e quindi si ha una limitazione delle escursioni termiche nell'ambiente riscaldato. Inoltre, dimensionando opportunamente lo spessore della parete esterna si ha un accumulo termico di alcune ore e quindi sufficiente per il riscaldamento giornaliero dell'ambiente contiguo.

Per contro si hanno inconvenienti notevoli sul lato estetico ed architettonico. Il *muro Trombe - Michell*, infatti, *acceca* la facciata a sud con una parete massiccia, annerita e senza finestre.

L'inserimento architettonico di un elemento così ingombrante non è facile ad eccezione di case unifamiliari e quindi per edilizia residenziale monofamiliare. I costi aggiuntivi non sono limitati sia per la tipologia costruttiva dell'elemento passivo che per le necessarie modifiche interne agli ambienti.

Durante il periodo estivo occorre bloccare il trasferimento di calore all'interno degli ambienti per evitare un surriscaldamento eccessivo ed insopportabile. Pertanto si ricorre a diversi artifici; ad esempio si può aprire superiormente ed inferiormente l'intercapedine fra parete e superficie vetrata, chiudendo i canali di comunicazione con l'ambiente interno, in modo che l'aria venga riscaldata e per effetto camino esca dall'alto senza interessare l'ambiente interno. Un altro sistema inizialmente utilizzato con questo elemento passivo consiste nell'aprire in basso l'intercapedine d'aria esterna e in alto una fessura dell'ambiente interno nella parete opposta a nord. In questo modo si attiva una circolazione d'aria fra la parete a sud e quella a nord che potrebbe rinfrescare l'ambiente interno se le temperature raggiunte non sono eccessivamente elevate.

Quest'ultimo metodo non ha però dimostrato buoni risultati proprio a causa del forte surriscaldamento estivo degli ambienti e quindi si preferisce far disperdere l'energia raccolta mediante effetto camino direttamente attraverso l'intercapedine d'aria fra vetro e muro esterno.

Si osserva che non è pensabile di chiedere le sole bocchette interne di aerazione con l'ambiente e lasciare l'aria nell'intercapedine in condizioni di stagnazione perché si avrebbero possibili danneggiamenti ai componenti esterni.

Le temperature che si raggiungono durante l'estate sono tali da produrre invecchiamenti rapidi dei materiali, forti tensioni termiche che possono portare anche alla rottura delle superfici vetrate. I rapporti di superfici esterne rispetto a quella del pavimento dell'ambiente da riscaldare sono, in prima approssimazione, dati dalla seguente tabella.

Temperatura esterna (°C)	Superficie vetrata per m <sup>2</sup> di pavimento
-7 ÷ 1	0,40 ÷ 0,95
2 ÷ 7	0,2 ÷ 0,6

Come si può osservare l'ingombro esterno di questo sistema è notevole e ciò comporta un maggior impegno architettonico nell'inserire un elemento ingombrante, massiccio e poco gradevole da vedere. Inoltre il colore scuro della superficie esterna del muro Trombe - Michell rende ancora più impegnativa la soluzione architettonica.

Durante il periodo notturno si ha un maggior raffreddamento (in inverno) dell'aria nell'intercapedine del muro esterno rispetto a quella interna all'ambiente e ciò può provocare un'inversione del regime di moto dell'aria. Per evitare, quindi, che di notte il muro Trombe - Michell funga da radiatore a spese dell'ambiente interno occorre fare in modo che l'inversione di flusso non avvenga.

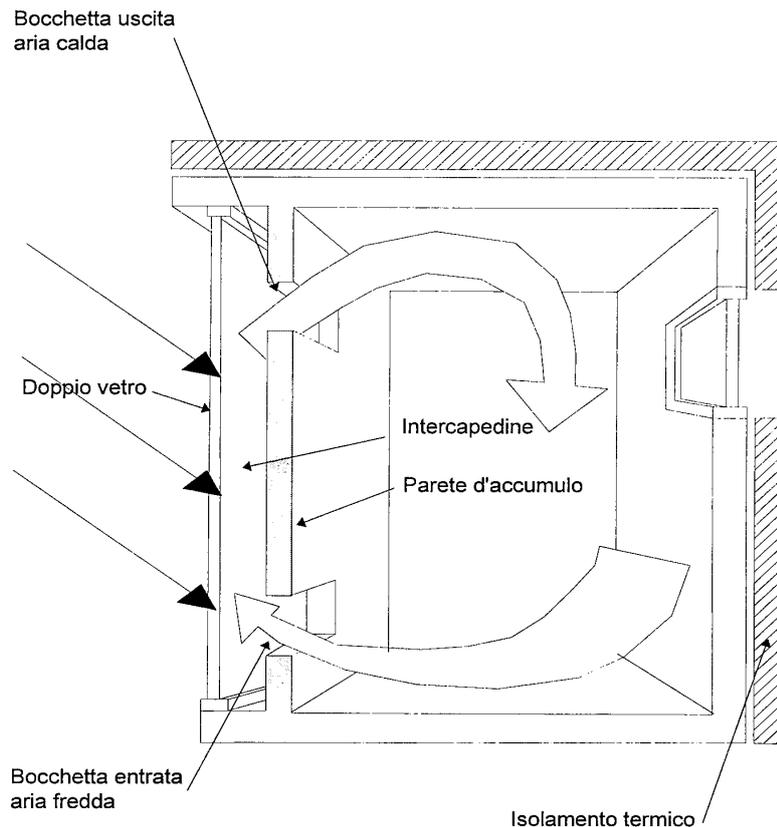


Figura 80 Schema a guadagno solare indiretto.

Ciò si ottiene mediante opportune banderuole che vengono poste sulle bocchette di aerazione: quando l'aria calda proviene dall'intercapedine del muro Trombe - Michell allora, per un opportuno gradiente di pressione, si ha il sollevamento delle banderuole. Quando il flusso

d'aria tende ad invertirsi le banderuole rimangono abbassate e quindi si blocca il pericolo di raffreddamento dell'ambiente.

Il calcolo degli apporti di un sistema a guadagno indiretto può essere effettuato mediante opportuni codici di calcolo basati sulle procedure già illustrate nel 2° Volume oppure, in prima approssimazione, si possono utilizzare metodi semplificati. La Norma UNI-10344 nell'appendice F indica una procedura semplificata che verrà illustrata nel prosieguo.

### Sistemi a guadagno termico misto

Si può immaginare di unire il meglio dei due sistemi anzidetti utilizzando una *serra* vetrata di captazione dell'energia solare non più direttamente accoppiata all'ambiente da riscaldare bensì esterna ad esso e collegata mediante bocchette di aerazione, come illustrato per il muro di Trombe - Michell. Ciò che deriva è definito *sistema a guadagno misto* ed è illustrato nella seguente *Figura 82*.

In pratica si ha una sorta di *collettore* con funzioni di accumulo ben separato dall'ambiente da riscaldare e a questo collegato mediante canali di aerazione. L'energia trasferita all'ambiente da riscaldare può essere tutta o solo in parte (ad esempio aprendo alcune delle superfici vetrate esterne).

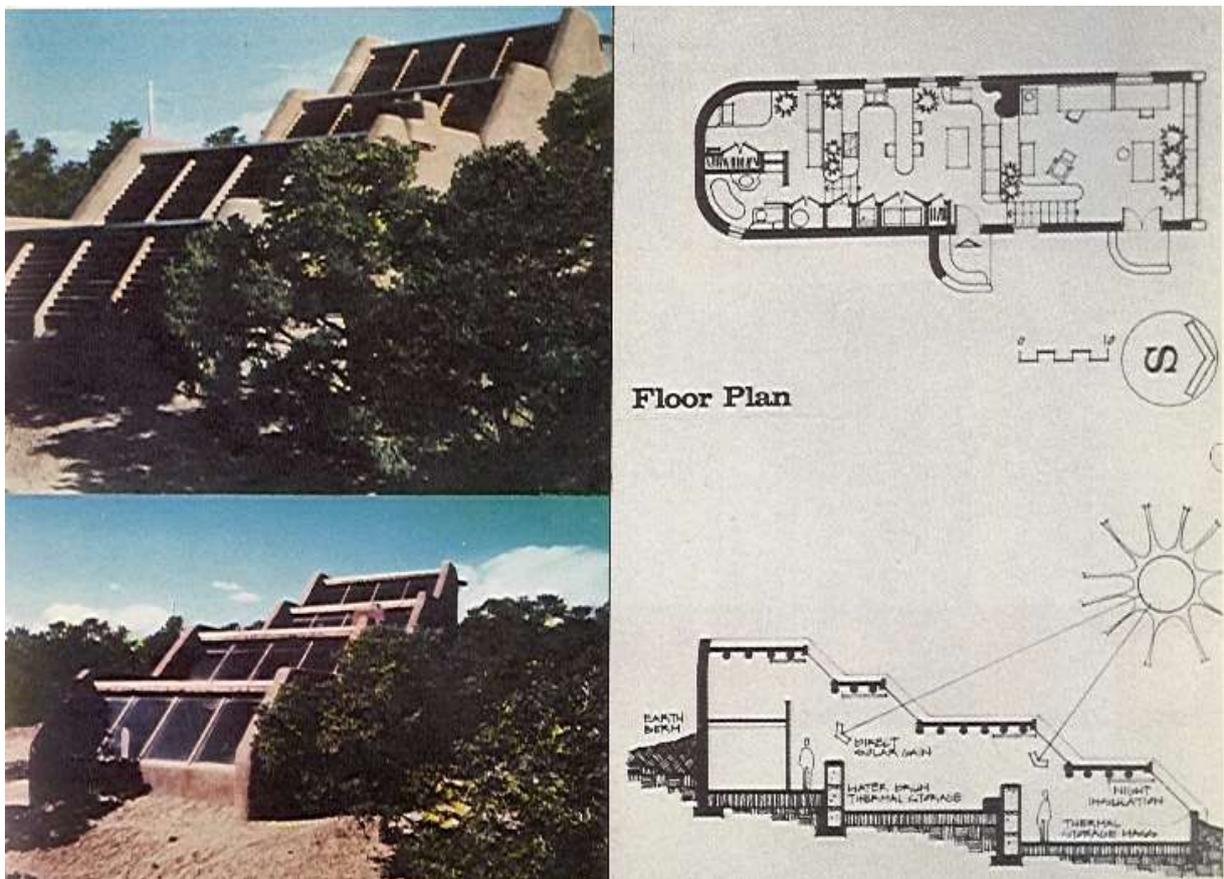


Figura 81: Esempio di casa solare a guadagno diretto- Santa Fè – New Mexico

Questa soluzione presenta notevole interesse architettonico poiché svincola la struttura dell'ambiente interno dalla funzione di accumulo termico vista con i sistemi a guadagno diretto. La *serra addossata* (esposta preferenzialmente a sud con tolleranza di  $\pm 30^\circ$ ) può avere forma e volume dipendente anche dalla geometria dei volumi che il progettista può manovrare. Inoltre durante il periodo estivo la serra può essere del tutto aperta e trasformarsi in uno spazio aperto fruibile per attività esterne. L'inserimento architettonico di questo elemento può risultare meno oneroso dei precedenti grazie alla possibilità di trasformare i porticati o gli spazi esterni in *serre addossate* semplicemente chiudendoli con superfici vetrate (anche mobili).

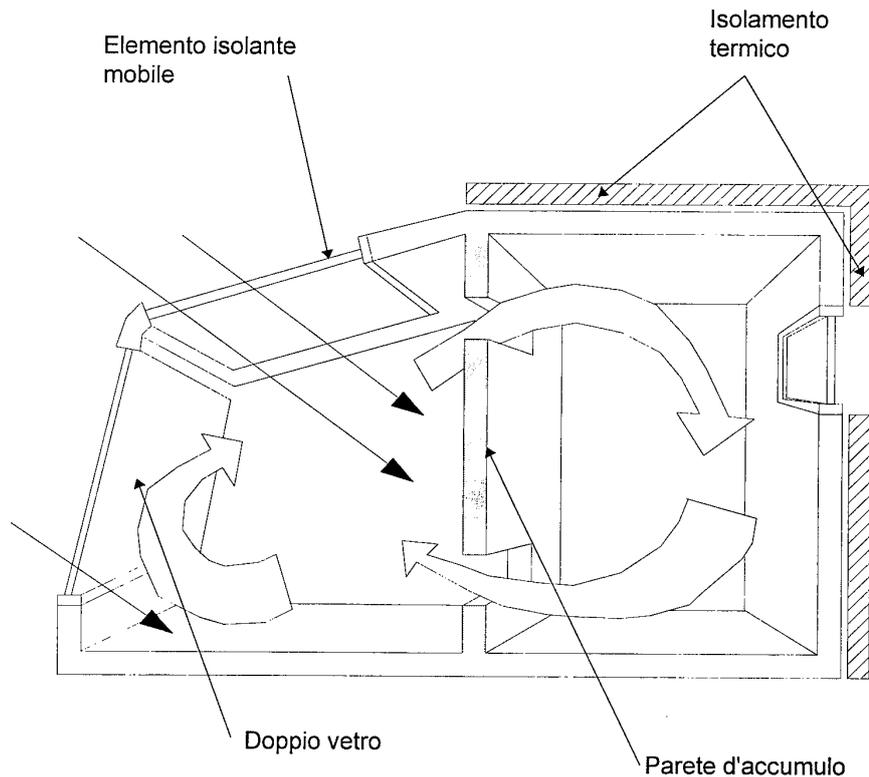


Figura 82: Sistemi a guadagno termico misto

L'interno della serra (detto *sunspace*) può essere utilizzato per coltura di piante o per qualsivoglia altra applicazione. Per aumentare l'accumulo termico si può porre della ghiaia a terra. Inoltre la massa di accumulo termico può essere estesa fino a inglobare anche l'ambiente da riscaldare (come nel caso dei sistemi a guadagno diretto, vedi anche *Figura 82*).

Fra i vantaggi del *sunspace* sono da ricordare:

La riduzione delle escursioni termiche giornaliere negli spazi interni per effetto delle masse di accumulo termico.

La riduzione delle dispersioni termiche dell'edificio verso l'esterno per la presenza della *serra addossata*.

La minore complessità architettonica dell'elemento passivo che risulta in realtà composto da più elementi compositivi.

La possibilità di *retrofitting* in edifici esistenti.

Gli effetti di questo sistema passivo sono di difficile valutazione anche della notevole variabilità geometrica ed architettonica. In prima approssimazione si possono avere le indicazioni della seguente tabella.

Temperatura esterna (°C)	Superficie vetrata per m <sup>2</sup> di pavimento
-7 ÷ 1	0,70 ÷ 1,6
2 ÷ 7	0,3 ÷ 0,95

La parete di divisione fra il *sunspace* e l'ambiente da riscaldare svolge la notevole funzione di accumulo termico e pertanto il suo spessore non dovrebbe essere mai inferiore ai 25÷30 cm per muratura in mattoni pieni e 35÷45 cm per pareti in calcestruzzo. Il colore della superficie esterna verso il *sunspace* deve essere di colore scuro.

Valgono anche in questo caso le stesse considerazioni viste per i sistemi a guadagno diretto e in particolare occorre fare in modo che le radiazioni solari non colpiscano la parete di confine con l'ambiente da riscaldare per evitare forti surriscaldamenti estivi. Pertanto, oltre ad aprire la *serra addossata* è bene utilizzare schermi fissi o mobili che impediscano alle radiazioni solari di colpire la parete suddetta.

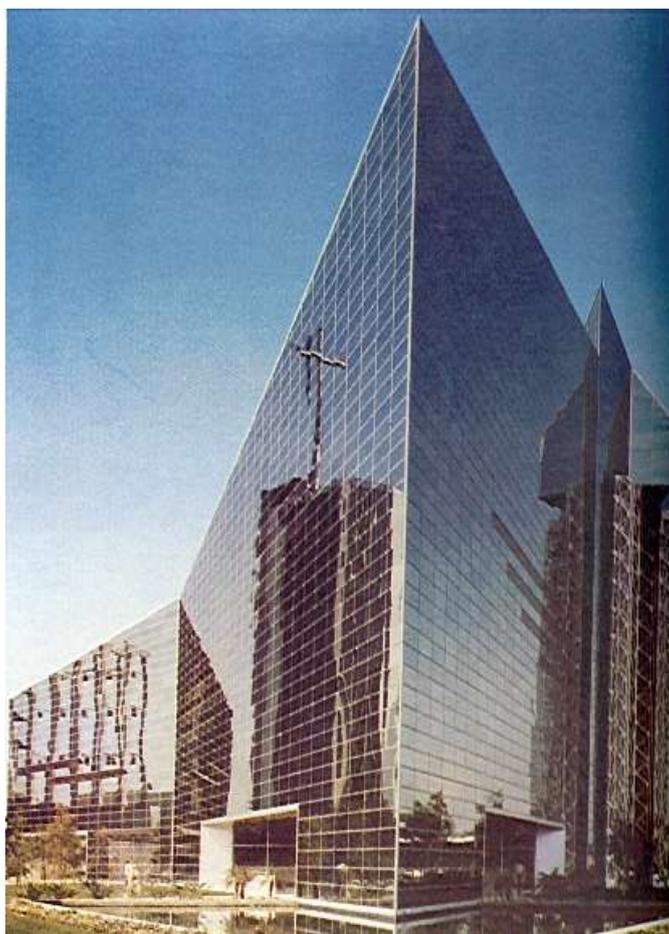
Le bocchette di aerazione devono essere dimensionate in modo che si abbia circolazione sufficiente dell'aria riscaldata dalla serra. Si possono indicare, in prima approssimazione, valori della superficie di passaggio non inferiore ad 1/100 della superficie del pavimento dell'ambiente da riscaldare. Inoltre per evitare fenomeni di inversione di flusso, come già indicato per il muro di Trombe - Michell, si consiglia di installare banderuole mobili o altri sistemi di controllo.

Per lo studio e la progettazione di questi sistemi occorre utilizzare sofisticati codici di calcolo, come già indicato in precedenza. Un metodo semplificato è indicato anche nell'appendice F della Norma UNI-10344 che sarà illustrata nel prosieguo.

### Osservazione sull'uso esteso delle vetrate

Da quanto sopra detto appare chiaro che un uso sapiente, equilibrato e ben studiato delle superfici vetrate può rendere l'edificio molto poco esigente in termini di consumi energetici. In fondo questo concetto è ripreso nella L. 10/91 che obbliga i progettisti a tenere conto anche dei guadagni solari diretti ed indiretti (vedi nel prosieguo il richiamo all'appendice F della UNI-10344).

Non si deve commettere l'errore che un uso smodato, vedi *Figura 83*, delle superfici vetrate sia incondizionatamente un bene. La radiazione solare aiuta durante l'inverno a riscaldare l'edificio ma in estate costituisce la fonte principale delle *rientrate termiche* e quindi accresce il carico termico di condizionamento.



*Figura 83: Esempio di edificio estesamente vetrato – Garden Grove – California*

Inoltre anche durante la stagione invernale si possono avere eccessi di guadagni solari rispetto al carico termico di riscaldamento e ciò costringe al paradosso di dovere attivare il raffrescamento (condizionamento) anche d'inverno. E' quello che succede, ad esempio, nei grattacieli dove, a seconda dell'esposizione e dell'ora si hanno condizioni di climatizzazione differenti da zona a zona dello stesso edificio.

A Milano presso il grattacielo Pirelli avviene che gli ambienti a sud sono raffrescati anche durante l'inverno mentre quelli diversamente esposti sono riscaldati.

### Il sistema a guadagno indiretto con assorbitore di massa trascurabile

Un sistema passivo che presenta notevole interesse pratico è quello a guadagno indiretto ma con assorbitore a massa trascurabile, detto anche *sistema Barra - Costantini*. Brevemente si tratta di un sistema a collettore solare passivo nel quale la finzione di piastra captatrice è svolta da un assorbitore alettato (vedi figura) posto all'esterno delle pareti esposte a sud e formante due intercapedini con le pareti stesse e con le lastre vetrate esterne che creano l'effetto serra. L'aria viene fatta circolare, per effetto camino, dal basso verso l'alto e, nella stagione invernale, inviata mediante appositi canali negli ambienti da riscaldare. Le masse di accumulo termico sono costituite dalle strutture murarie (solai e pareti) dello stesso edificio.

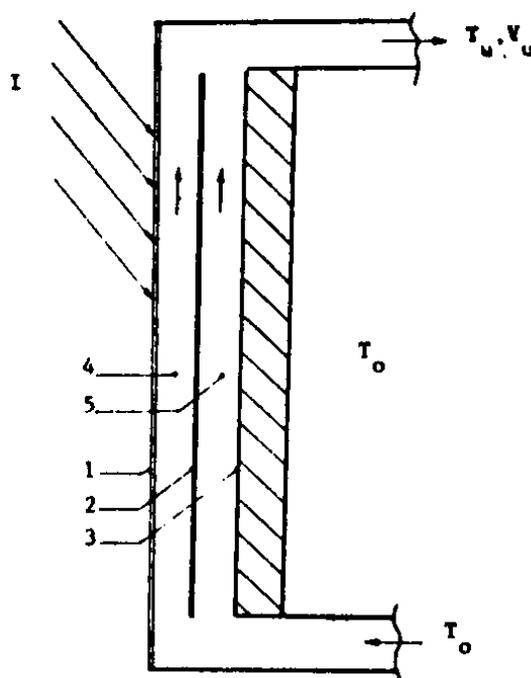


Figura 84: Schema del camino del sistema a massa assorbitrice trascurabile

La lastra assorbitrice è costituita da una specie di veneziana in lamiera di acciaio o in alluminio annerito, come raffigurato in Figura 85.

In questo modo è possibile avere una superficie di captazione maggiore della superficie frontale occupata dalla facciata su cui l'assorbitore viene posto.

L'aspetto interessante di questo sistema consiste nella possibilità di rendere superfici captatrici tutte le superfici esposte a sud anche in edifici esistenti. Basta infatti aggiungere l'assorbitore alettato all'esterno delle murature, ricoprirlo con una lastra vetrata e creare un sistema di canali di distribuzione dell'aria calda verso gli ambienti interni, vedi Figura 86.

Poiché la superficie di captazione è maggiore di quella apparente  $S = HL$  ne consegue che, rispetto al muro Trombe - Michell o alle serre addossate, questo sistema è in grado di captare energia sufficiente, alle nostre latitudini, per riscaldare non solo l'ambiente contigui ma anche due e anche tre ambienti in linea sud - nord.

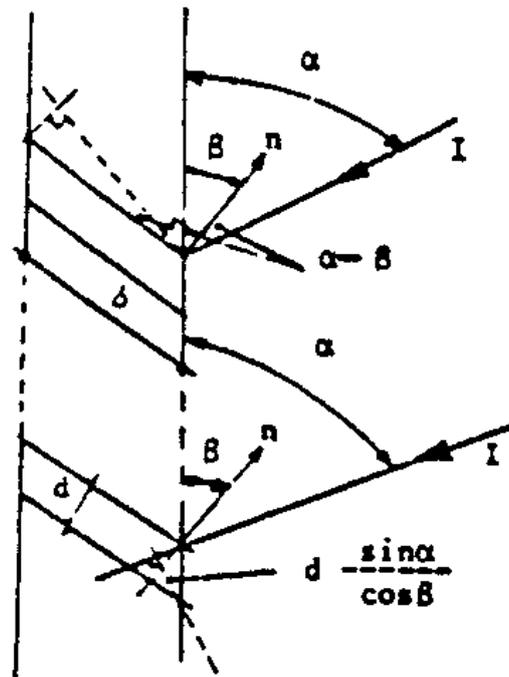


Figura 85: Particolare dell'assorbitore alettato

In pratica con la sola superficie delle pareti esposte a sud si può riscaldare efficacemente un intero appartamento.

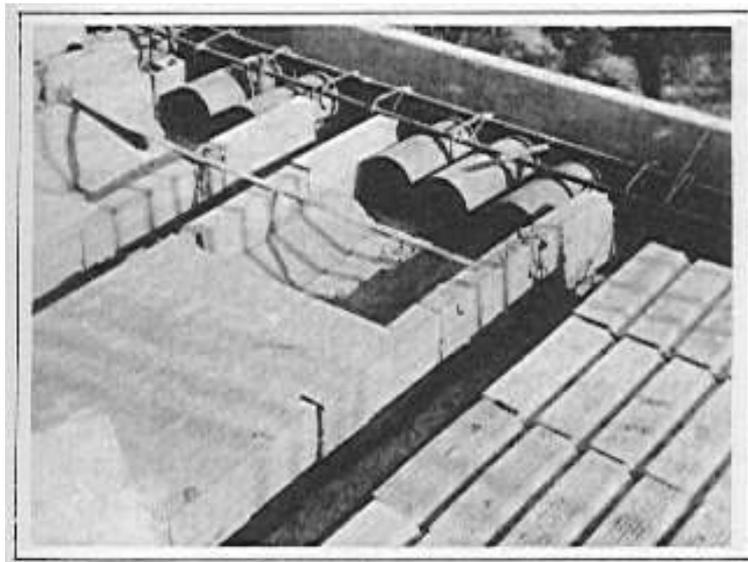


Figura 86: Particolare delle canalizzazioni dell'aria

I canali dell'aria possono essere ricavati anche all'interno delle pignatte dei solai e quindi senza occupazione di spazi aggiuntivi. In edifici esistenti si potranno costruire all'esterno dei solai sia in muratura che in lamiera zincata mascherati in modo da formare finte travi.

Nella successiva figura si ha la schematizzazione completa dell'inserimento di un assorbitore alettato all'esterno, della lastra vetrata e della formazione dei canali d'aria nascosti nelle strutture del solaio di un edificio di nuova costruzione.

E' qui opportuno osservare che nella parete a sud è sempre possibile aprire finestre o altre aperture (balconi, verande, ...) ed utilizzare per la captazione solare solo le aree murarie piene, come illustrato nella seguente figura.

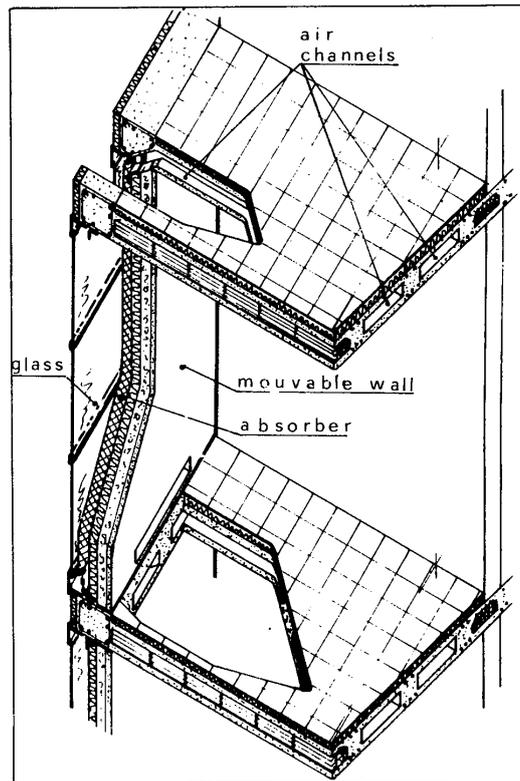


Figura 87: Particolare di installazione del sistema Barra – Costantini

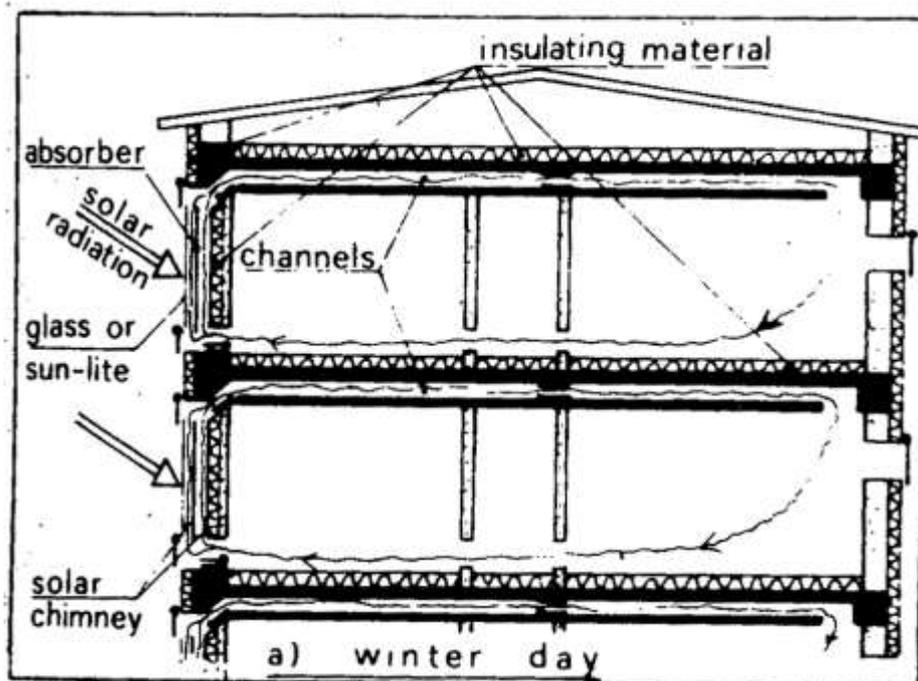
Si osservi ancora che in figura il sistema è stato installato in un edificio a due piani di tipo tradizionale ed esso è in grado di riscaldare tutto l'edificio. Questa caratteristica rende interessante il sistema Barra-Costantini per il *retrofitting* di edifici esistenti. Certo non si ha un bell'effetto estetico ma in cambio si ottiene un edificio solarizzato quasi del tutto autosufficiente e senza sconvolgere la distribuzione architettonica e le tipologie costruttive degli edifici. Ciò significa anche una notevole riduzione dei costi rispetto a tutti gli altri metodi di solarizzazione visti nei capitoli precedenti.



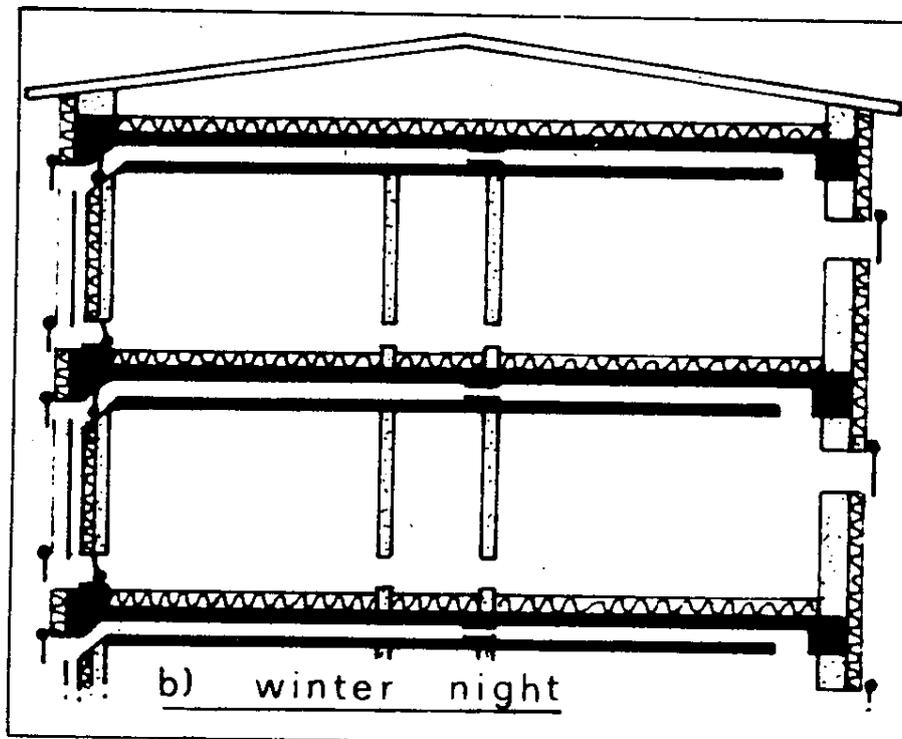
Figura 88: Fotografia di un prospetto con il sistema BC

Anche con questo sistema si hanno rischi di inversione di flusso durante il periodo notturno e di surriscaldamento durante il periodo estivo. In questo caso, però, il sistema risolve brillantemente questi problemi, come indicato nelle successive figure. In inverno durante il periodo diurno si ha il funzionamento normale indicato in *Figura 89*. L'aria viene riscaldata nelle intercapedini esterne dell'assorbitore alettato e viene inviata, per effetto camino, all'interno dell'edificio attraverso i canali di aerazione che in questo caso sono aperti.

Si osservi come i canali si estendano a più ambienti in linea, per tutta la larghezza dell'edificio. Nel periodo invernale durante la notte si ha l'abbassamento delle banderuole di chiusura dei canali d'aerazione e quindi viene interdetto il flusso inverso che porterebbe al raffreddamento dell'edificio, come illustrato nella *Figura 90*.



*Figura 89: Sistema BC in funzionamento invernale di giorno*



*Figura 90: Sistema BC in funzionamento invernale notturno per evitare l'inversione di flusso*

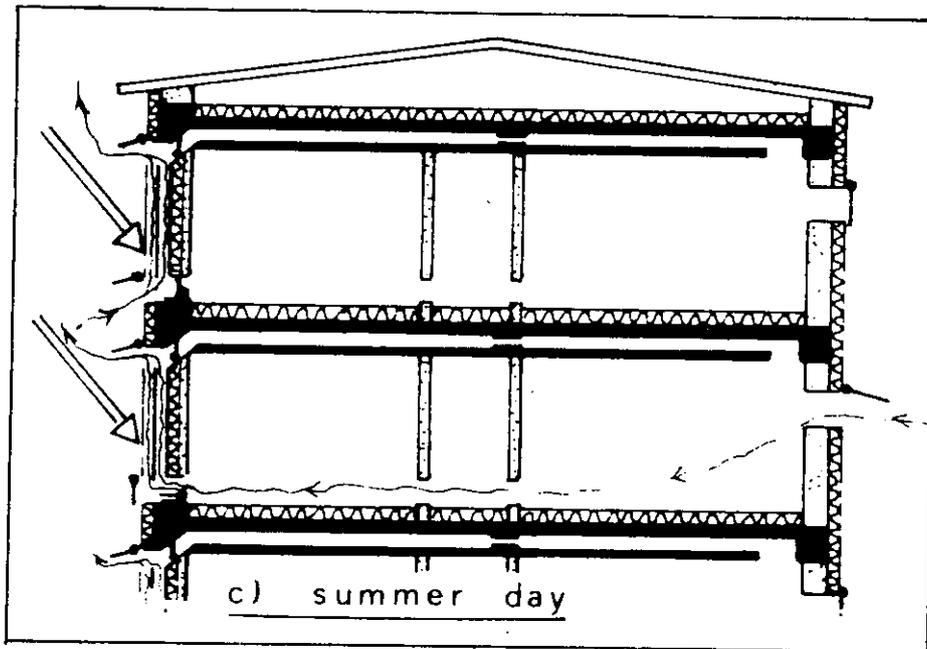


Figura 91: Sistema BC in funzionamento estivo diurno con raffrescamento interno.

In estate per evitare i surriscaldamenti degli ambienti interni si sfrutta l'effetto camino innescato dall'assorbitore esterno per attivare una circolazione dell'aria esterna a nord (e quindi più fresca rispetto alle altre esposizioni) attraverso l'interno degli ambienti e facendola fuoriuscire nella parte alta dell'intercapedine esterna, come illustrato nella Figura 91.

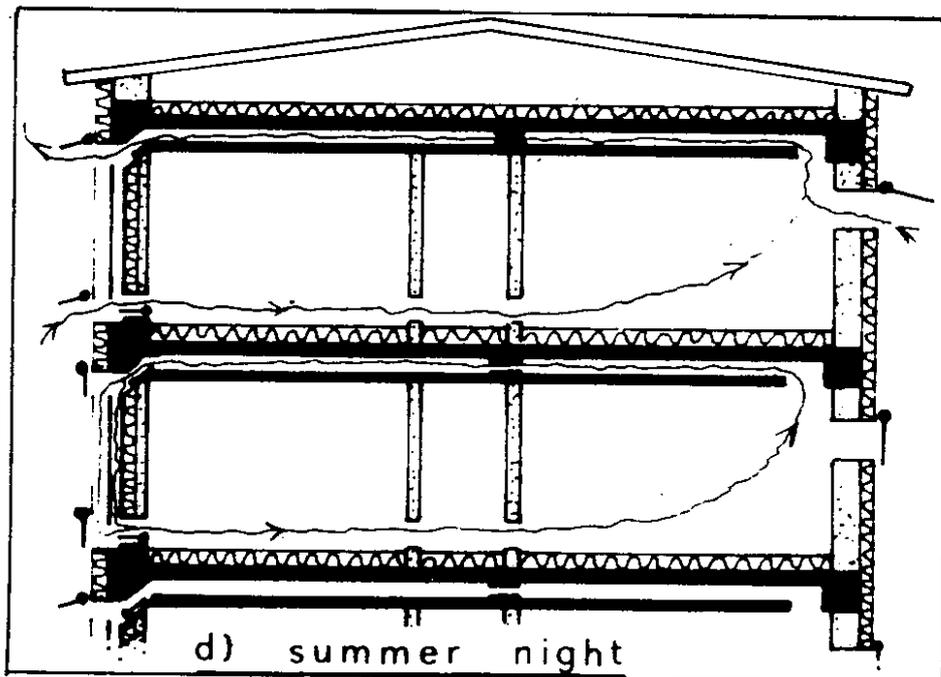


Figura 92: Sistema BC in funzionamento estivo notturno

Di notte il sistema BC attiva una circolazione d'aria dal basso verso l'alto che favorisce il raffrescamento degli ambienti, come riportato in Figura 92. In definitiva giocando con le serrande poste nei canali e in corrispondenza della zona a nord (più fresca) si può fare in modo che il camino solare del sistema BC sia una sorta di circolatore naturale dell'aria sia interna dell'edificio che esterna.

Lo studio analitico del sistema Barra - Costantini può essere condotto in analogia a quanto detto per gli altri sistemi.

## 4.9.2 SISTEMI SOLARI ATTIVI

La definizione di questi sistemi non è agevole. Si tratta sempre di sistemi ad energia solare ma la funzione di raccolta dell'energia solare non è svolta da componenti architettonici più o meno complessi, come visto in precedenza, bensì da elementi *meccanici* appositamente costruiti e che vengono poi inseriti in opportuni impianti di riscaldamento. Questi elementi di captazione sono i *collettori solari* (piani, a concentrazione, ad acqua o ad aria), come schematizzato nella seguente *Figura 94* ove si ha la schematizzazione di collettori ad aria. Gli elementi principali che costituiscono un collettore solare sono:

Una piastra assorbitrice delle radiazioni solari, solitamente in metallo (rame, alluminio, acciaio) annerito e/o trattato superficialmente per migliorare il rendimento di raccolta (superfici selettive).

Una lastra vetrata (ad uno o più vetri, a seconda delle condizioni climatiche) a basso contenuto di ossidi di ferro per avere una migliore trasparenza alle radiazioni solari di bassa lunghezza d'onda.

Una contenitore (*carter*) isolato in modo che l'energia raccolta non si disperda all'esterno ma venga tutta convogliata verso il fluido di lavoro.

Il fluido di lavoro può essere l'acqua (*collettori ad acqua*), l'aria (*collettori ad aria*), glicole etilenico puro o in diluizione con acqua per i climi freddi per evitare il congelamento. I collettori ad acqua (e in genere a liquidi) sono di dimensioni più contenute, a pari prestazioni, rispetto a quelli ad aria. Questi ultimi hanno la possibilità di potere essere più facilmente inseriti nell'edificio (ad esempio in apposite falde inclinate di copertura) e l'aria calda inviata direttamente all'interno degli ambienti mediante canali tradizionali.

I collettori ad acqua richiedono un impianto ausiliario per potere cedere calore all'edificio. Di solito si ha una superficie di raccolta che può essere sistema in copertura o in uno spazio a terra adiacente all'edificio.

I collettori vengono disposti in batterie di serie e parallelo. Da queste batterie l'acqua viene fatta circolare in un serbatoio di accumulo termico e da quest'ultimo, con un circuito secondario, si alimenta la rete di riscaldamento dell'edificio. Per un esempio di impiantistica solarizzata attiva si consideri la *Figura 93*.

Quando l'energia solare non risulta sufficiente per il riscaldamento dell'edificio allora si integra con una caldaia tradizionale posta in serie (preriscaldamento solare) o in parallelo (sostituzione del circuito solare). I collettori ad aria possono accumulare calore in opportune masse nascoste nei cantinati, nelle fondazioni o nelle stesse murature degli edifici. A causa delle maggiori dimensioni dei canali d'aria e delle peggiori capacità di scambio dell'aria rispetto all'acqua gli impianti solari con collettori ad aria sono maggiormente ingombranti rispetto a quelli ad acqua.



*Figura 93: Esempio di edificio solarizzato con impianti attivi. Scuola di Scoli Piceno*

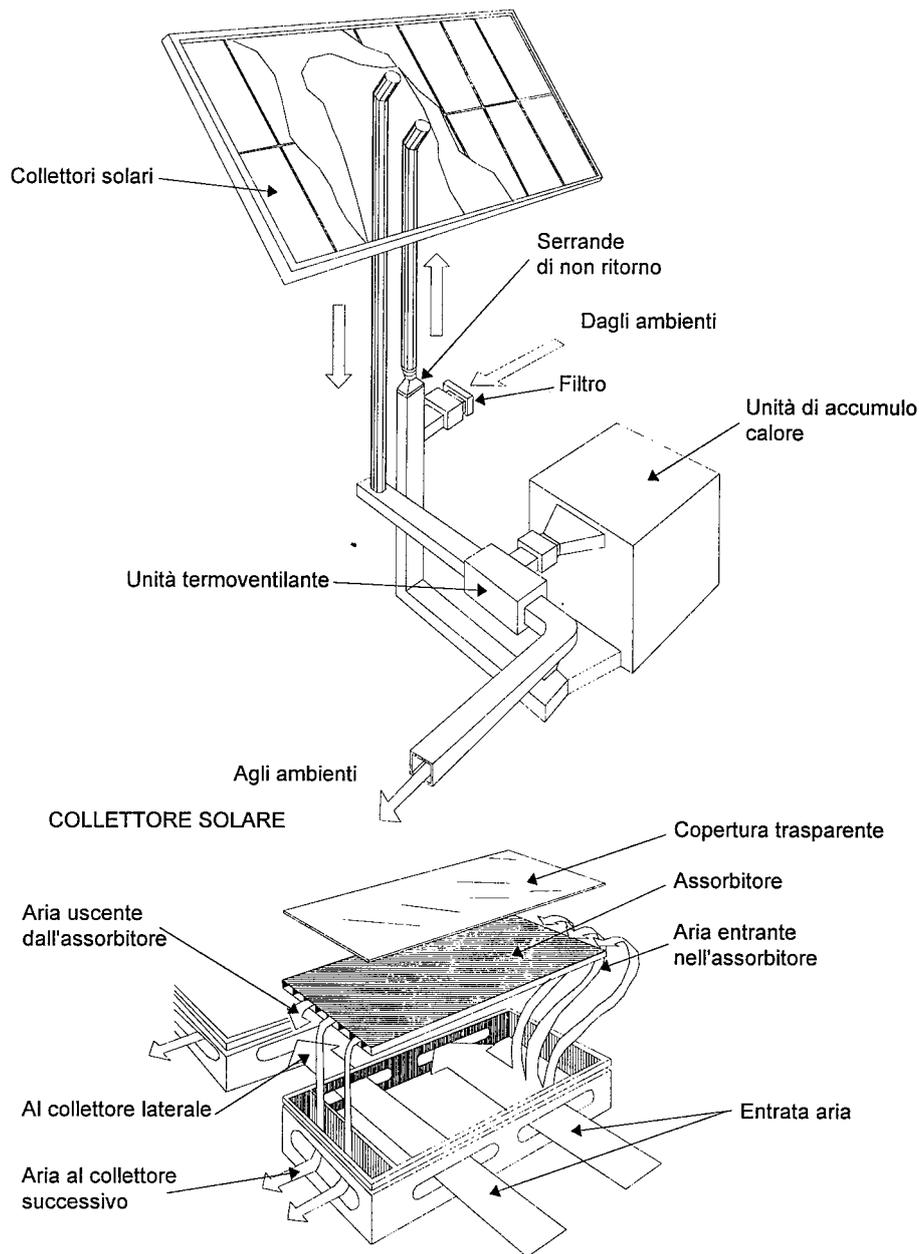


Figura 94: Esempio di sistema solare attivo

Per contro questi collettori presentano significativi vantaggi quali una maggiore semplicità di installazione, l'assenza del pericolo di congelamento, minori problemi di corrosione e quindi di durata. Il loro sviluppo è stato molto limitato nel nostro paese ed hanno trovato applicazione principalmente negli Stati Uniti.

Per migliorare la raccolta energetica ed anche per ottenere temperature più elevate rispetto ai collettori piani si utilizzano collettori focalizzanti o a concentrazione. In essi la superficie di raccolta è speculare e di forma parabolica in modo da focalizzare i raggi verso un elemento di raccolta (caldaietta solare) che raggiunge temperature facilmente superiori ai 150 °C.

Questi sistemi sono tecnologicamente più complessi, richiedono organi di controllo più sofisticati e sono quasi sempre utilizzati per applicazioni di processo e poco per applicazioni nell'edilizia.

### Convenienza degli impianti solari attivi

E' bene qui considerare che l'utilizzo dell'energia solare per il riscaldamento invernale degli ambienti mediante collettori piani (ad aria o ad acqua) è concettualmente errato.

Basta osservare, infatti, che il riscaldamento invernale richiede più energia per l'edificio proprio nel periodo in cui c'è minore disponibilità di energia solare. Inoltre durante la stagione invernale le condizioni atmosferiche non sono le più ideali a causa della presenza delle nuvole. Ne consegue che per il riscaldamento ambientale occorre una tale superficie di collettori piani che difficilmente si potrà ammortizzare nel tempo di vita dei collettori stessi.

Ad esempio, un'abitazione ben coibentata di 100 m<sup>2</sup> posta a Siracusa richiede circa 4 kW di potenza per il riscaldamento. Ipotizzando un periodo di riscaldamento di 6 ore al giorno si avrebbe una richiesta di energia pari a  $Q_T=6 \times 4 = 24$  kWh. Supposta un'efficienza di raccolta pari al 25% (sempre per Siracusa) ed una energia totale giornaliera incidente su 1 m<sup>2</sup> di collettore solare piano pari a 0,8 kWh/m<sup>2</sup>/giorno si ha  $Q_u=0.25 \times 0,8 = 0,2$  kWh/m<sup>2</sup>/giorno.

Ne consegue che nel periodo più freddo occorre una superficie totale di raccolta pari a  $A_c=24/0,2=120$  m<sup>2</sup>. Supponendo un costo globale<sup>50</sup> di L/m<sup>2</sup>. 1.200.000 si ha un costo totale di impianto pari a  $120 \text{ m}^2 \times 1.200.000 \text{ L/m}^2 = \text{L. } 144.000.000$  (lira più, lira meno) e solo per avere il riscaldamento solare totale nel mese di dicembre e gennaio.

A marzo si ha una radiazione solare circa 3,5 volte maggiore di quella di dicembre e a giugno oltre 5 volte maggiore rispetto a dicembre. E cosa si fa di questa energia in più? Nulla. Anzi siamo anche costretti a dissiparla nell'ambiente per evitare di spaccare i vetri dei collettori che in condizioni di stagnazione si danneggerebbero!

Si intuisce come quello del riscaldamento solare attivo sia un falso problema che ha contribuito non poco alla scarsa diffusione dell'energia solare nel nostro Paese. Chi ha voluto remare contro non fatto altro che diffondere l'illusione, miseramente smentita dall'esperienza, di facili sostituzioni degli impianti tradizionali di riscaldamento con quelli ad energia solare. E la favola non è finita!

Di questi profeti ce ne sono sempre e ancora oggi qualcuno va dicendo che dobbiamo usare l'energia solare per risparmiare le fonti tradizionali (fossili).

Questa vera e propria mistificazione della realtà scientifica si completa facendo l'analisi energetica della produzione dei collettori solari. Se consideriamo l'energia necessaria per ottenere il rame, l'alluminio o il ferro della piastra di captazione, l'energia per il vetro a basso contenuto di ferro, del carter e dell'isolante termico si trova che spendiamo molta più energia tradizionale a costruire questi collettori di quanta essi ce ne possono dare durante tutta la loro vita. Molto, molto di più! E allora dov'è l'imbroglio?

*L'energia solare è diffusa sul territorio in quantità sufficiente alla vita terrestre. Per averne a sufficienza per le applicazioni impiantistiche occorre disporre di molta superficie di captazione e questa costa troppo in rapporto al valore dell'energia raccolta.*

Gli impianti solari sono a basso valore energetico e la tecnologia utilizzabile per essere economicamente convenienti non può che essere *povera* nel senso che si debbono utilizzare materiali semplici e poco costosi per applicazioni energetiche che fanno un uso coerente ed intelligente dell'energia solare.

Ad esempio è conveniente utilizzare l'energia solare per riscaldare acqua sanitaria per tutto l'anno e non per il riscaldamento invernale limitato a pochi mesi (da noi anche troppo pochi!). Il riscaldamento di acqua calda per i campeggi estivi, ad esempio, è conveniente perché si richiede più energia proprio quando se ne ha di più. Inoltre utilizzando l'acqua calda a bassa temperatura si ha una maggiore efficienza di raccolta e quindi occorrono meno m<sup>2</sup> di collettori.

---

<sup>50</sup> Si intende con costo globale quello totale riferito al m<sup>2</sup> di collettore e comprendente l'acquisto del collettore, degli accumuli termici, dei circolatori, della centralina elettronica di regolazione, delle tubazioni e delle coibentazioni necessarie e di quanto altro necessario per la costruzione dell'impianto regolarmente funzionante.

In molte nazioni del mediterraneo (Israele, Spagna, Grecia) si hanno impianti per produzione di acqua calda sanitaria fatti in modo semplice: una lastra di lamiera di acciaio verniciata nera, un sistema di tubi appena saldati sotto la piastra che viene inserita in un contenitore rudimentale coibentato con lana di roccia, al di sopra della piastra una banale lastra di vetro comune, un serbatoio di accumulo ricavato da bidoni di benzina ed ecco un impianto solare efficiente.

## 5. ESEMPI DI ARCHITETTURA BIOCLIMATICA

Esistono brillanti esempi di Architettura Bioclimatica distribuiti a tutte le latitudini. In questo capitolo se ne vedranno alcuni. Si cercherà di evidenziare le peculiarità che rendono ciascuno di questi esempi importanti ed utili per una corretta progettazione degli edifici. Nell'espressione *Architettura Bioclimatica* sono contenuti molti concetti diversi e che possiamo schematizzare, anche alla luce di quanto detto nei capitoli precedenti, come un complesso di soluzioni progettuali che consentono di avere condizioni di benessere con il minimo apporto energetico esterno da fonti non rinnovabili ma cercando di utilizzare al massimo le fonti rinnovabili. In definitiva l'edificio deve stabilire un nuovo rapporto con l'ambiente esterno tale da produrre le necessarie alterazioni delle condizioni ambientali principalmente in virtù delle sue caratteristiche morfologiche, dimensionali, termofisiche, ...

### 5.1 PRINCIPI GENERALI

Poiché le condizioni esterne variano con il sito e per un dato sito variano nel tempo ne consegue che un *edificio bioclimatico* ideale dovrebbe modificare la propria struttura disperdendo pochissimo quando c'è freddo (captando l'energia solare che lo investe e immagazzinandola per

limitare le oscillazioni termiche) e disperdendo molto nei periodi caldi soprattutto respingendo l'energia solare che altererebbe le condizioni interne.

Questo comportamento ideale può solo essere approssimato mediante una serie di accorgimenti e configurazioni. Importantissimi sono la *forma* e l'*orientamento* dell'edificio, come già dimostrato in precedenza. Si ricorda, infatti, che forme compatte riducono le dispersioni termiche e limitano i guadagni estivi sia dovuti alla radiazione solare che alla trasmissione attraverso le murature. L'orientamento influenza il comportamento delle superfici al fine della captazione solare o dell'interazione con i venti.

Anche la posizione dell'edificio nel territorio (microscala) rispetto agli altri edifici o a superfici alberate o a specchi d'acqua influenza molto gli scambi termici fra edificio ed ambiente.

Per ridurre le dispersioni occorre isolare termicamente le pareti dell'edificio, ridurre le superfici vetrate<sup>51</sup> sulle pareti che ricevono poca radiazione solare ed utilizzare vetri doppi con schermature mobili che tengano conto del cammino solare apparente.

Le superfici esposte a sud sono maggiormente esposte alle radiazioni solari e quindi sono in grado di captare più energia delle altre. Pertanto esse sono preziose per tutte le applicazioni bioclimatiche, come già esposto. L'obiettivo da perseguire nella progettazione bioclimatica si può così sintetizzare:

**Captazione dell'energia solare**  
**Accumulo dell'energia nelle masse termiche**  
**Trasporto dell'energia accumulata negli ambienti**

Ciascuna di queste fasi può essere attuata in vari modi (vedi capitolo 4.9.1) con svariate soluzioni architettoniche. Vedremo nei prossimi paragrafi alcune applicazioni di questi concetti in alcuni esempi di architettura vernacolare.

Durante il periodo estivo le problematiche sono diametralmente opposte: l'energia solare non è più desiderata e anzi è proprio quella che dobbiamo evitare per avere condizioni più confortevoli all'interno degli edifici. Ecco che allora si può pensare di utilizzare schermi esterni (fissi o anche mobili ovvero, come oggi si tende a fare negli edifici più sofisticati, anche controllati elettronicamente in modo da seguire il cammino apparente del sole). La *forma* e le dimensioni debbono favorire il raffrescamento notturno e la ventilazione.

Un parziale interrimento dei lati a nord favorisce, in genere, sia le condizioni invernali che quelle estive a causa della stabilità della temperatura del terreno.

## 5.2 INFLUENZA DEL CLIMA

Quando le condizioni climatiche esterne sono prossime a quelle interne di benessere non si hanno molti problemi energetici per gli edifici. I problemi nascono quando le condizioni esterne si allontanano da quelle di benessere interne e in misura tanto maggiore quanto maggiori sono gli scarti fra le due condizioni climatiche.

La progettazione di un edificio, pertanto, deve tenere conto in modo assoluto del clima esterno e non può essere plagiata senza tenere conto delle conseguenze che le variazioni climatiche comportano. Eppure si assiste sempre più alla diffusione di uno stile progettuale unico

---

<sup>51</sup> Si ricordi che 1 m<sup>2</sup> di vetro normale disperde come 15 m<sup>2</sup> di parete e che 1 m<sup>2</sup> di vetro doppio disperde come circa 10 m<sup>2</sup> di parete.

da nord a sud, da est ad ovest, come se condizioni climatiche di Oslo sono le stesse di quelle di Siracusa o di Città del Capo.

Si ha, cioè, la diffusione di uno stile *anonimo* che non tiene conto delle peculiarità climatiche, culturali, storiche ed ambientali dei siti.

Si è già detto come le grandezze principali da considerare per il clima esterno siano la temperatura, la radiazione solare e la velocità del vento. Queste grandezze sono oggi raccolte in manuali specializzati o in pubblicazioni specifiche del CNR e/o di altri centri di ricerca.

Vedremo ora alcune realtà architettoniche in condizioni ambientali limiti e riscopriremo come, forse inconsciamente, antiche popolazioni abbiano applicato i concetti di Termofisica prima esposti portando le costruzioni all'estrema ottimizzazione in relazione al sito, ai materiali disponibili e alla cultura. Si tratta di esempi mirabili dell'arte di costruire innata nei popoli e che deve essere ritrovata oggi con la coscienza e conoscenza necessaria.

### 5.2.1 INSEDIAMENTO INDIANO DI MESA VERDE IN COLORADO

Questo insediamento risale al 1200 ed è stato fatto nel Colorado (USA). Esso rappresenta un esempio perfetto e mirabile di utilizzo delle risorse naturali per la sopravvivenza.

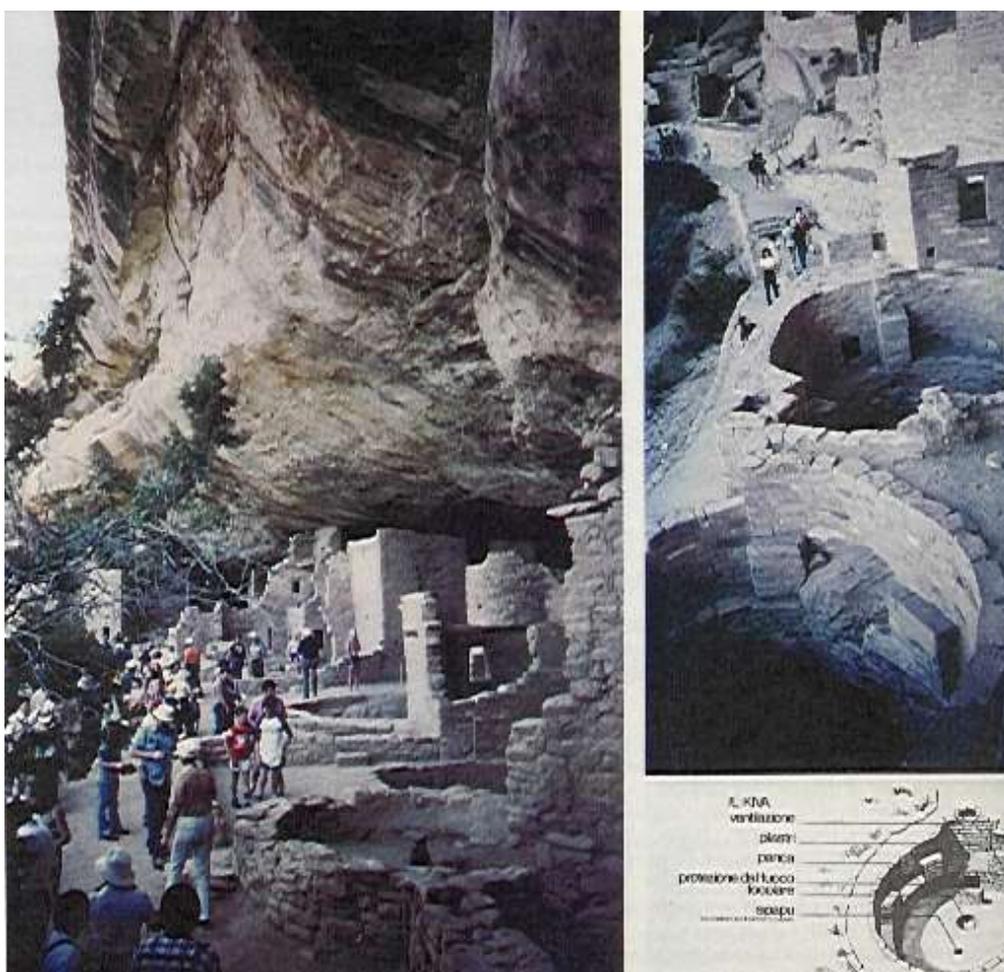
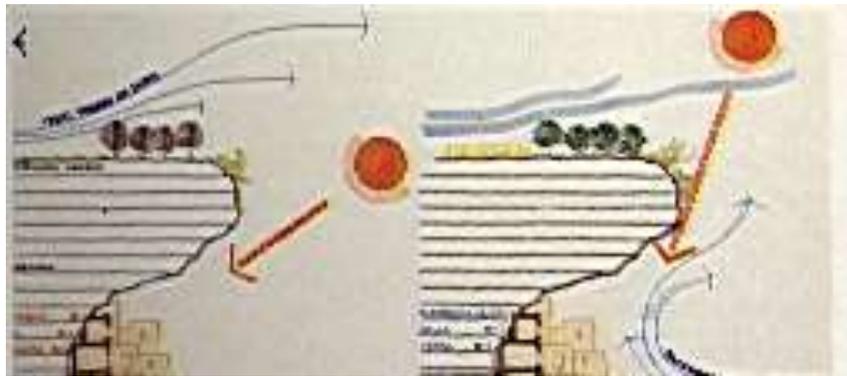


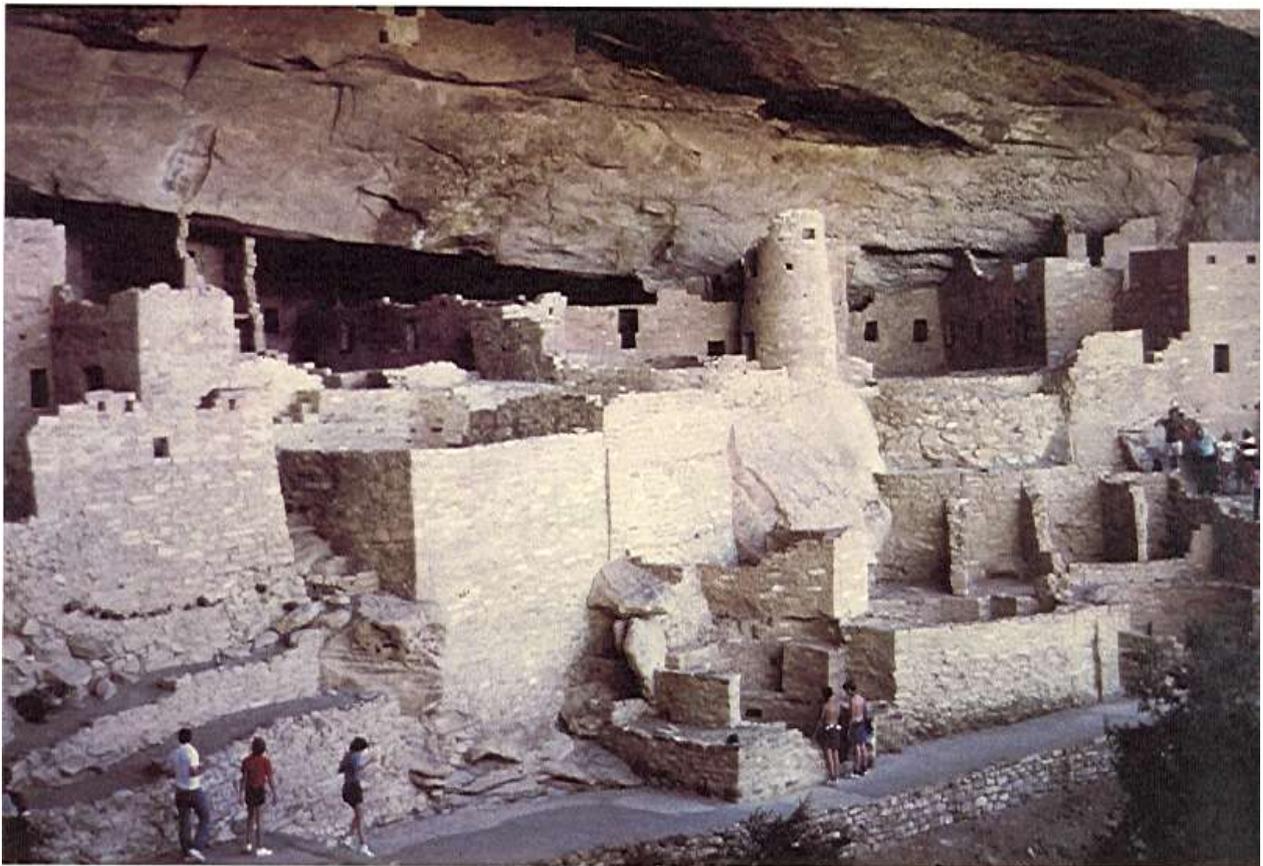
Figura 95: Insediamento di Mesa Verde in Colorado – Esterno e particolare del kiva.

Si tratta di costruzioni edificate in una incasso nella roccia ed esposte a sud in modo da risultare al riparo dai raggi solari in estate ma colpite da questi in inverno. Il guadagno solare in inverno è consentito proprio da quest'ultimo fatto.

La massa di accumulo termico è data da tutta la roccia esistente all'interno dell'insediamento (vedi *Figura 97*) che ha una notevole capacità ed inerzia termica. Il risultato di questo intelligente insediamento è che le condizioni climatiche sono ottimali durante tutto l'anno. Nella Mesa Verde l'efficienza di raccolta dell'energia solare è maggiormente efficiente, del 56%, d'inverno rispetto all'estate. Infatti durante l'inverno il sole è più basso rispetto all'orizzonte (vedi *Figura 96*) e quindi i suoi raggi solari penetrano nell'insediamento riscaldandolo. Il calore delle radiazioni solari viene anche accumulato efficacemente nella roccia e nei mattoni di terra di cui son fatte le costruzioni e poi ceduto, lentamente, agli ambienti interni dopo il tramonto di sole, creando, così, un microclima quasi costantemente confortevole rispetto alle gelide condizioni invernali e caldo torride tipiche del Colorado. Durante il giorno la vita sociale degli Indiani Anasazi si svolgeva all'interno del cosiddetto *kiva*. Si tratta di un ambiente circolare (vedi particolare nella *Figura 95*) riscaldato da un focolare centrale e nel quale era assicurato un ricambio d'aria mediante un sistema naturale di ventilazione.



*Figura 96 : Funzionamento invernale ed estivo per Mesa Verde*



*Figura 97: Vista all'interno di Mesa Verde*

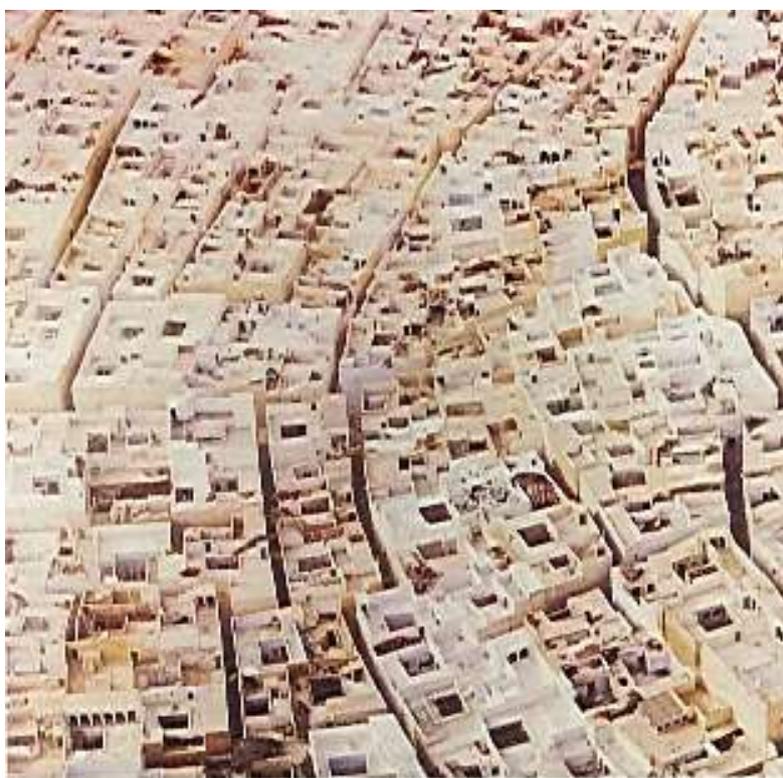
L'aria riscaldata dal focolare sale attraverso un buco nel soffitto, risucchiando aria fresca da un canale posto all'altezza dei piedi. La corrente d'aria così generata colpisce il muretto-deflettore posto tra questa cavità ed il focolare, circolando attraverso il *kiva*.

Possiamo rivedere in questo insediamento i tre caratteri fondamentali delle costruzioni passive: capacità di captazione solare differenziata fra estate ed inverno (*Figura 96*), accumulo termico nelle masse rocciose (vedi *Figura 97*) e distribuzione dell'aria negli ambienti con effetto camino (*kiva*, vedi *Figura 95*).

Questo mirabile insediamento ha consentito la vita degli indiani in condizioni climatiche estreme: molto freddo in inverno e molto caldo in estate.

## 5.2.2 CITTÀ DI GHARDAIA, ALGERIA

Un altro tipico esempio di applicazione dei concetti di architettura bioclimatica è costituito dall'abitato della città di Ghardaia in Algeria (vedi *Figura 98*), nella valle dell'Oued (letto di un antico fiume) detta M'Zab, nel Sahara settentrionale, sull'altopiano roccioso di *Hamada*.



*Figura 98: Città di Ghardaia in Algeria – Tessuto urbano*

In quest'altopiano sorgono le città di El Ateuf, Bou Noura, Beni Isguen, Melika e Ghardaia che è anche la maggiore fra le cinque. Essa si trova a circa 500 m di altitudine, alla latitudine di 32° 30' N e 3° 45' di longitudine E, a circa 600 km da Algeri. Le temperature medie giornaliere sono di 10÷12 °C nel mese di gennaio e di 22÷40 °C a luglio, con punte massime estive registrate di 50 °C ed un minimo invernale di 1 °C. Vi è una forte escursione termica fra il giorno e la notte. La media annuale della pioggia è di 50÷60 mm l'anno e non piove mai per più di 10 giorni all'anno.

### LE ABITAZIONI E I MATERIALI

L'aspetto maggiormente interessante di questo insediamento urbano è la tipologia dei materiali tipici del luogo, anche se oggi non è difficile vedere l'uso di cemento, putrelle metalliche e legno bianco.

L'abitato storico è costruito con pietra, mattoni crudi, gesso, calce e rami di stipa<sup>52</sup>. L'uso sapiente di questi materiali poveri ma reperibili sul posto ha consentito di costruire una città vivibile pur nella rigidità del clima.

### L'ARCHITETTURA VERNACOLARE E IL CLIMA

Le escursioni sono notevoli, com'è tipico nelle regioni desertiche, e non vi è umidità che possa mitigare il surriscaldamento diurno. I venti sono spesso violenti e trasportano sabbia e polvere.

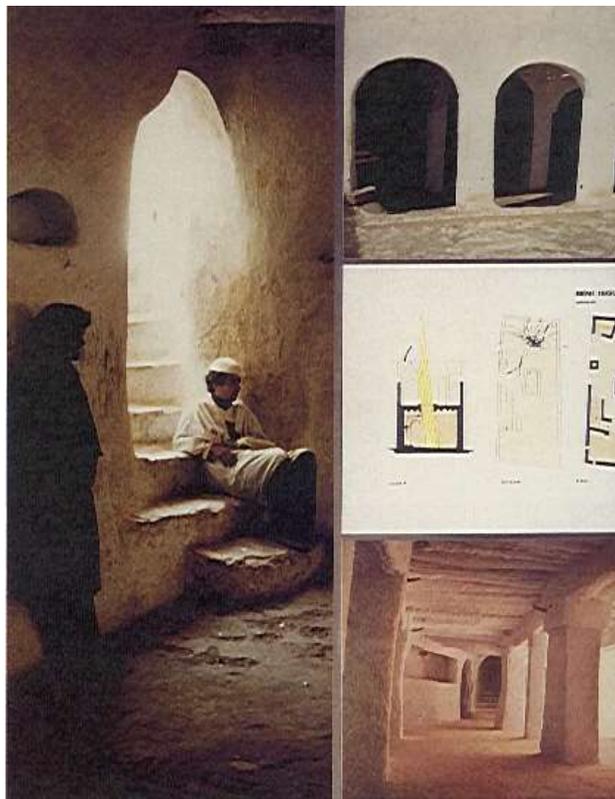


Figura 99: Interno tipico delle abitazioni di Ghardaia

Le piogge, anche se rare, sono violente e temporalesche. La radiazione solare, considerata la latitudine, è intensa. In queste condizioni climatiche è arduo costruire abitazioni confortevoli. Vediamo come hanno risolto i vari problemi gli abitanti mozabiti di Ghardaia.

Le case sono costruite, tipicamente, con mura di pietra generalmente spesse. Esse sono costruite addossate l'una all'altra, addirittura incastrate fra loro in modo da rendere disponibile grandi spazi in rapporto alle superfici esposte al sole, quindi con un rapporto di forma S/V il minore possibile. Proprio questa disposizione a maglia stretta (vedi Figura 98) crea molte zone d'ombra che ricoprono le strade e i vicoli proteggendoli dalla radiazione solare.

I muri spessi e massicci costituiscono una grande capacità termica che smorza le oscillazioni termiche diurne assorbendo l'energia solare di giorno (quando la temperatura dell'aria esterna è elevata) e restituendola durante la notte (quando la temperatura dell'aria esterna è notevolmente più bassa per via della notevole escursione termica giornaliera). Nelle abitazioni si hanno due focolari: il primo è posto all'interno e permette di cuocere gli alimenti e di riscaldare contemporaneamente gli ambienti; il secondo è posto all'esterno e viene utilizzato prevalentemente in estate, al riparo dal sole.

<sup>52</sup> Si tratta di una graminacea utilizzata intera per realizzare grosse travi oppure tagliata in assi di 30÷40 cm di larghezza e con 3 cm di spessore per lavori di carpenteria.

Il porticato è aperto a sud con un orientamento tipico e funzionale. In estate il sole è alto sull'orizzonte e i suoi raggi non penetrano all'interno per effetto della schermatura creta dai soffitti. In inverno l'altezza solare è tale che i raggi penetrano all'interno dei cortili e degli ambienti riscaldandoli. Anche qui si applica il concetto di cattura differenziata delle radiazioni solari, come già visto per l'insediamento di Mesa Verde. Gli ambienti di Ghardaia sono generalmente chiari e riflettono la radiazione solare. Elemento tipico delle abitazioni mozabite è il *chebeq* che è una specie di grosso foro nel soffitto di forma grosso modo quadrata e che è anche l'unica fonte di luce dell'abitazione. In questo modo si proteggono le abitazioni dall'eccessiva luminosità del sito e dalla radiazione solare.

Il *chebeq* è ricoperto con una grata metallica e viene anche ricoperto con legno o stoffa in modo da chiudere del tutto l'apertura parzialmente o totalmente a seconda delle ore del giorno e della stagione. In estate l'abitazione mozabita risulta fresca e ombrosa, il *chebeq* è parzialmente aperto per far filtrare la luce diurna. Lungo le pareti perimetrali si hanno una serie di fori che, unitamente alla porta di ingresso lasciata socchiusa, lasciano passare dell'aria esterna di ventilazione richiamata dall'effetto camino creato dal *chebeq*. Quando la temperatura notturna è troppo elevata all'interno delle abitazioni i Mozabiti usano dormire sulle terrazze. L'abitazione mozabita è internamente priva di mobilio e può essere utilizzata e vissuta in qualunque modo mediante un sapiente uso di tappeti e stuoie per sedersi e riposare. In inverno i tappeti sono posti anche sui muri per isolarli termicamente dall'esterno e le aperture di ventilazione vengono chiuse per gran parte del giorno.

### 5.2.3 I SASSI DI MATERA

Un altro esempio di architettura bioclimatica spontanea e largamente utilizzata da tutte le popolazioni primitive, è costituita dalle caverne. I sassi di Matera (o le abitazioni di Ibla a Ragusa in Sicilia) sono un esempio di utilizzo sapiente delle cavità rocciose.



Figura 100: Sassi di Matera

Nelle cavità rocciose si ha un funzionamento climatico del tipo indicato per Mesa Verde. Le masse rocciose costituiscono un grosso volano termico che rende le escursioni termiche all'interno delle caverne molte limitate: la temperatura è praticamente uniforme durante tutto l'anno.

### 5.2.4 I DAMMUSI DI PANTELLERIA

Un altro esempio tipico di architettura spontanea bioclimatica è il tipico *dammuso* di Pantelleria.

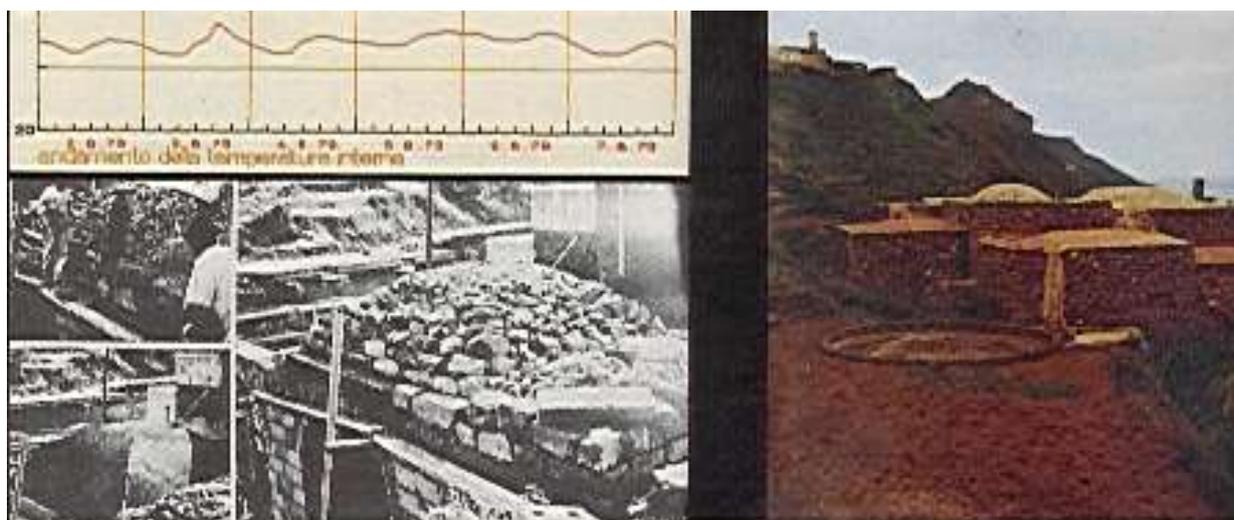


Figura 101: I Dammusi di Pantelleria

Il clima dell'isola presenta temperature elevate (oltre 40 °C) durante il periodo estivo e miti (circa 10 °C) in inverno. La piovosità è piuttosto bassa e la ventosità elevata. Il *dammuso* (vedi Figura 101) è una costruzione vernacolare che ha lo scopo precipuo di offrire una difesa al forte caldo e al forte vento.

Si tratta di una costruzione nata molti secoli fa essenzialmente come abitazione rurale per la coltivazione della vigna e la custodia degli attrezzi e del raccolto. La copertura del *dammuso* è una tipica volta a botte, esternamente impermeabilizzata per la raccolta dell'acqua piovana che confluisce in una cisterna sotterranea.

Vi è una sola porta di accesso al *dammuso* e non vi sono, generalmente, aperture laterali per impedire l'entrata dei raggi solari. Per consentire il ricambio dell'aria vi sono due o tre aperture molto piccole nelle pareti perimetrali. I muri perimetrali sono in pietrame e con forti spessori (circa 80 cm). La tecnica costruttiva è con muratura a secco nei due strati esterni e con riempimento in pietrisco più fine all'interno.

Questo sistema garantisce un elevato accumulo termico e quindi già da solo consente di ridurre le oscillazioni termiche giornaliere.

La scarsa radiazione solare entrante evita il surriscaldamento interno diurno e il gioco delle masse rende minima l'oscillazione termica interna.

Il clima interno che si ottiene è talmente ottimale che il *dammuso* è stato utilizzato anche come abitazione normale da parte dei pantechi.

Alcune misurazioni effettuate in un tipico *dammuso* ha mostrato valori della temperatura interna vicini ai 26 °C ad agosto con oscillazioni termiche di qualche grado fra giorno e notte.

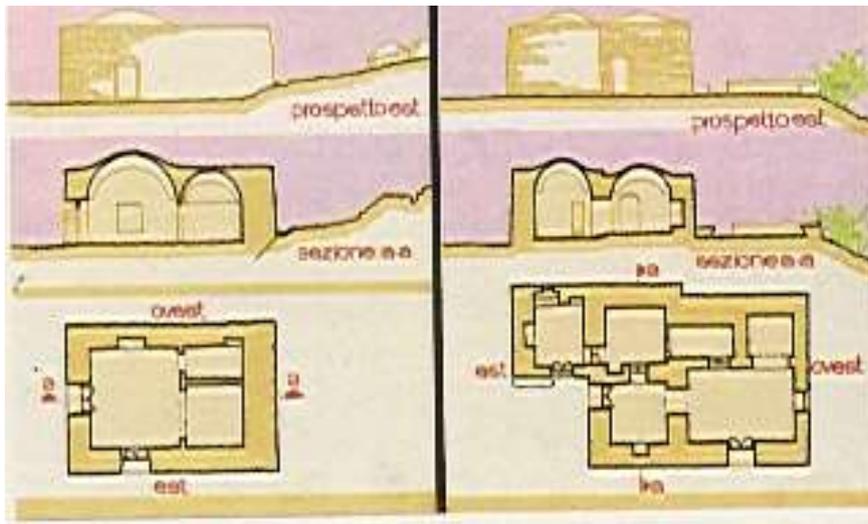


Figura 102: Schema di funzionamento di un Dammuso di Pantelleria

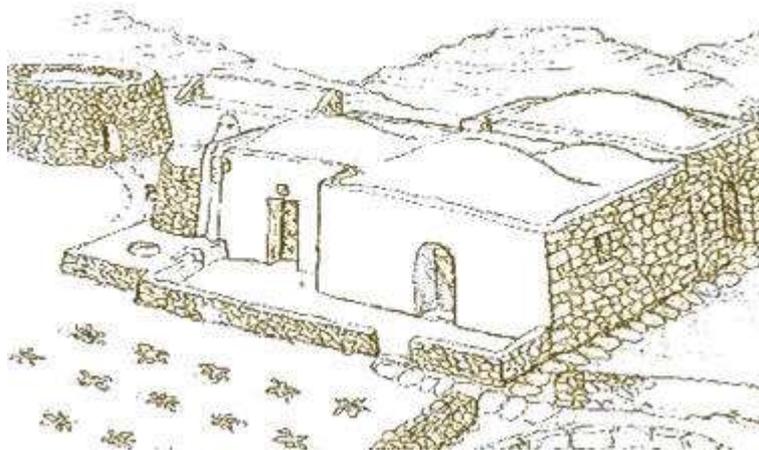


Figura 103: Schematizzazione del Dammuso

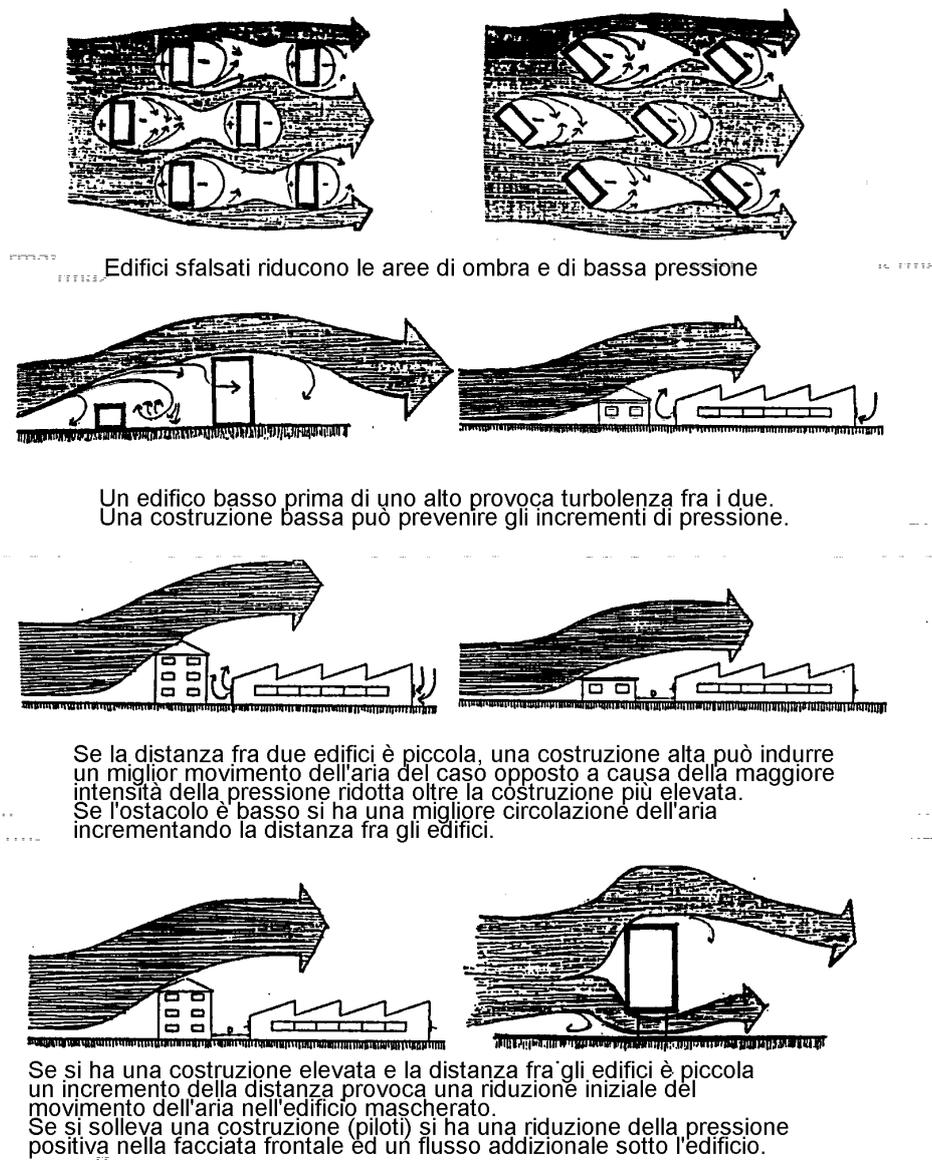
In *Figura 102* si ha la schematizzazione di un tipico *dammuso* di Pantelleria nella quale si possono ben osservare il gioco delle masse accumulatrici, la forma tipica della cupola di copertura e l'assenza di finestre esterne ad eccezione della porta di ingresso. Con concetti simili al *dammuso* si spiegano anche i *Trulli* di Alberobello (Puglia) che garantiscono condizioni climatiche estive confortevoli.



Figura 104: Dammuso di Pantelleria

### 5.2.5 LE TORRI IRANIANE

Gli scambi di calore tra un edificio e l'aria che lo circonda dipendono, a parità di condizioni, dalla velocità del vento, come già osservato nel 1° Volume e come si desume dalle correlazioni sperimentali per il calcolo del coefficiente di convezione esterna. Quest'osservazione suggerisce di favorire queste dispersioni quando ci si vuole raffreddare (estate) e di limitarli quando ci si vuole riscaldare (inverno). Il moto dell'aria favorisce sia gli scambi di tipo convettivo che quelli di ventilazione e/o infiltrazione attraverso l'involucro dell'edificio. Il vento crea una sovrappressione sulle facciate direttamente investite (vedi *Figura 105*) mentre crea una depressione sulle facciate sottovento nella stessa direzione di moto (vedi *Figura 106*). Questa differenza di pressione fra facciate opposte favorisce il moto dell'aria attraverso le aperture o le fessure delle pareti esterne. Se si vuole limitare questi scambi occorre utilizzare infissi con una buona tenuta all'aria, come prescritto anche dalle norme UNI.



*Figura 105: Effetti del vento e modificazioni apportate dagli edifici*

La protezione dal vento può essere ottenuta mediante ostacoli che, deviando la corrente d'aria verso l'alto, generano a valle una zona di calma relativa. La profondità della zona protetta dipende dall'altezza dell'ostacolo e dalla sua forma (vedi *Figura 105*). Così, ad esempio, un ostacolo

formato da un piano verticale compatto (un muro) investito da un vento ad esso perpendicolare genera una zona dove la velocità dell'aria risulta ridotta del 75%. Se l'ostacolo è costituito da una fila d'alberi con fogliami denso si hanno riduzioni di velocità minori ma la profondità dell'azione è maggiore potendosi avere ad una distanza di 25 volte l'altezza degli alberi una riduzione del 75% della velocità che si avrebbe in assenza degli alberi. Questo sistema di protezione è utilizzato in Patagonia (Argentina) in zone molto ventose: gli alberi vengono schierati in modo da formare un quadrato al cui interno vengono edificate le abitazioni.

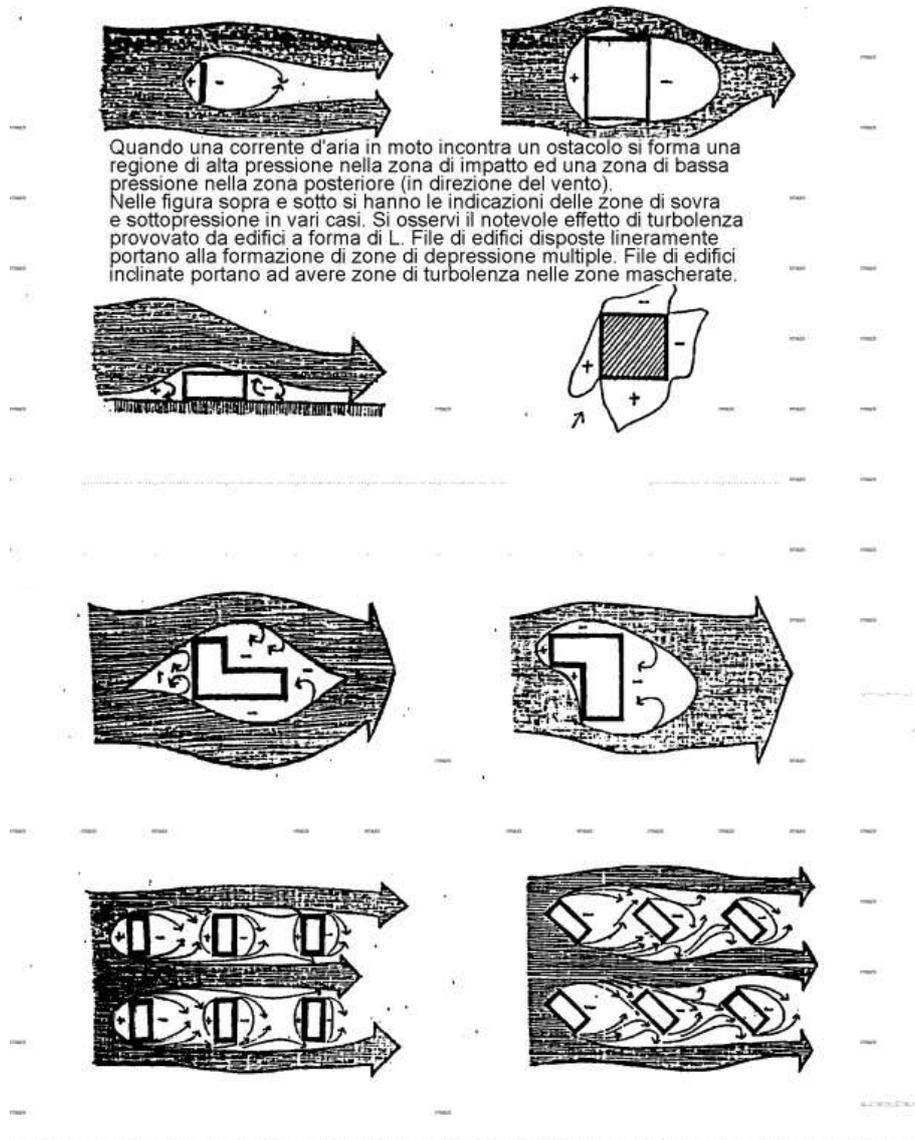


Figura 106: Zone sopra e sotto vento

Se si desidera raffrescare le abitazioni favorendo i moti convettivi allora si dovranno evitare gli ostacoli esterni ai venti estivi prevalenti. Poiché la superficie su cui scorre il vento ne condiziona la temperatura, se si inserisce uno specchio d'acqua prima di colpire l'abitazione l'aria si raffresca e quindi si ha un effetto di raffrescamento migliore.

La disposizione degli edifici in un complesso urbano crea effetti di velocità non facilmente prevedibili che dipendono dalle forme, dalle distanze e dalle dimensioni degli edifici stessi. Si possono avere effetti di protezione reciproca o di incanalamento con aumento della velocità (effetto Venturi, vedi Figura 107). Infine l'efficacia dell'azione del vento all'interno degli edifici dipende dalla forma, dimensioni e posizione delle aperture. Ad esempio, le aperture di dimensioni maggiori poste sulla parete sottovento rispetto a quelle sopravvento producono un incremento di

velocità all'interno degli ambienti rendendo più efficace l'azione di ventilazione e di raffrescamento.

Se si invertono le proporzioni (maggiori quelle sopravvento rispetto a quelle sottovento) si ha un rallentamento della velocità all'interno degli ambienti. Poiché l'aria più calda si trova, in un edificio, in alto vicino al soffitto, le aperture di ingresso e di uscita poste entrambe in basso hanno un effetto rinfrescante limitato mentre se le aperture di ingresso dell'aria sono poste in basso e quelle di uscita in alto si ha un'azione di raffrescamento efficace.

Giocando sull'azione del vento alcuni edifici in Iran (e parzialmente in Pakistan) utilizzano sistemi ingegnosi di architettura bioclimatica spontanea per rendere più confortevole le abitazioni esposte ad un clima particolarmente caldo in estate (torrido di giorno e freddo di notte, com'è tipico delle zone desertiche). Le abitazioni sono ancora costruite secondo i principi di architettura passiva già visti in precedenza: muri spessi e pesanti in mattoni o in pietrame per avere elevate capacità termiche che stabilizzano le oscillazioni termiche a valori medi fra giorno e notte, cortili interni con piante arboree che schermano le pareti e consentono di umidificare l'aria di ventilazione e mantenere il fresco notturno, edifici addossati l'uno all'altro per ridurre le superfici soleggiate e le perdite di calore in inverno.

In aggiunta a questi criteri che possiamo definire *canonici* dell'architettura passiva vi è un sistema originale detto delle *Baud Geer* o *Torri del vento* (o anche *Torri Iraniane*). Le parole *Baud Geer* significano letteralmente "acchiappa vento". Questi elementi costruttivi sono comparsi in Iran intorno al decimo secolo. La *torre del vento* è una specie di camino (vedi *Figura 109*) diviso in più sezioni da setti verticali in mattoni. Durante la notte la torre si raffredda, durante il giorno l'aria a contatto con muratura si rinfresca a sua volta e, diventando più densa per la diminuzione della temperatura, scende verso il basso ed entra nell'edificio. Quando c'è il vento questo processo viene accelerato.

L'aria entra nella torre dal lato opposto al vento (sottovento e quindi in depressione) scende e passa nell'edificio attraverso porte si aprono sulla sala centrale e sullo scantinato (vedi *Figura 110* e *Figura 111*). La pressione dell'aria fresca spinge fuori l'aria calda che è presente all'interno dell'edificio attraverso le porte e le finestre. Durante il giorno la torre si riscalda: questo calore viene ceduto all'aria esterna durante la notte, creando un effetto camino con una corrente ascendente: se vi è necessità di ulteriore raffrescamento si può usare questa corrente per aspirare l'aria fresca notturna esterna all'interno dell'edificio attraverso porte e finestre.

Quando c'è vento anche di notte l'aria può fluire verso il basso nella sezione della torre esposta al vento, scaldandosi al contatto con la muratura mentre vi sarà una corrente ascensionale nella sezione sottovento della torre. Aprendo e chiudendo opportunamente le comunicazioni tra le varie sezioni della torre e l'edificio è possibile utilizzare la torre per raffrescare l'edificio a seconda delle necessità

Le torri del vento sono spesso usate insieme con tetti o cupole che contribuiscono al comfort ambientale nella calura estiva. Infatti l'aria calda tende a salire nella volta, al di sopra della zona abitata ed inoltre un tetto a cupola riceve la stessa radiazione solare di un tetto piano di pari superficie apparente ma ha una superficie di scambio convettivo e radiativo notturni notevolmente maggiore (rapporto S/V maggiore).

Un effetto ancora maggiore si ha con una cupola che presenti in alto un'apertura per la circolazione dell'aria (vedi *Figura 110*): quando c'è vento il passaggio dell'aria sulla superficie curva esterna determina un punto di depressione proprio sull'apice della cupola che quindi funge da aspiratore dell'aria calda interna che si è accumulata in alto.

L'occhio al colmo della cupola è generalmente sormontato da una calotta nella quale vi sono altre piccole aperture che convogliano il vento per accrescerne l'effetto di risucchio.

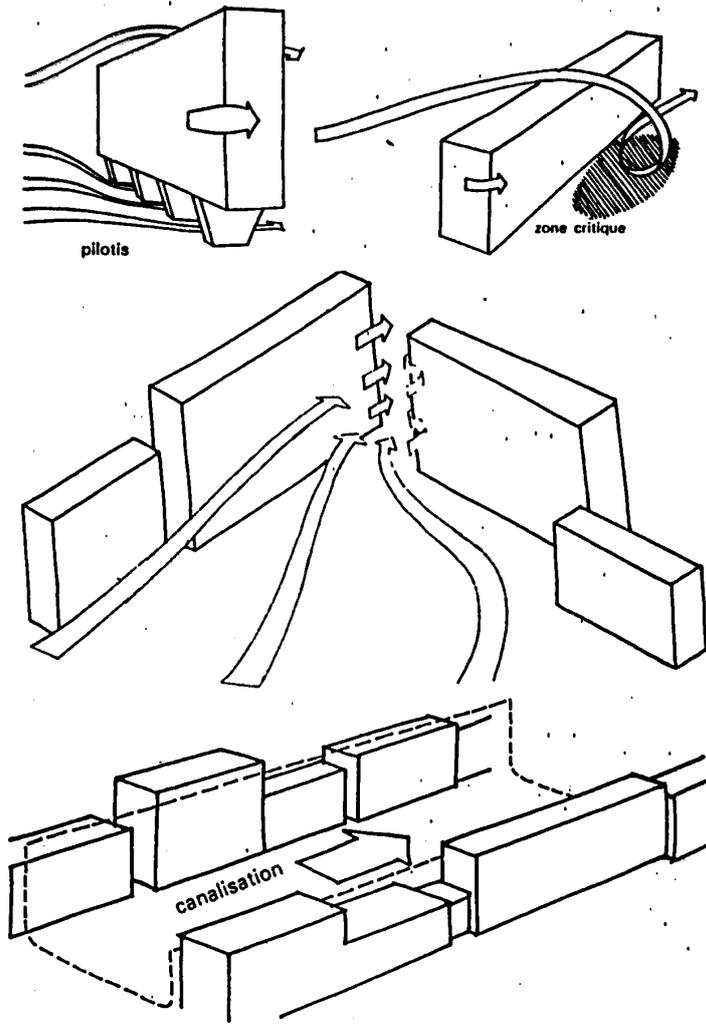


Figura 107: Effetti di canalizzazione e Venturi provocati dagli edifici

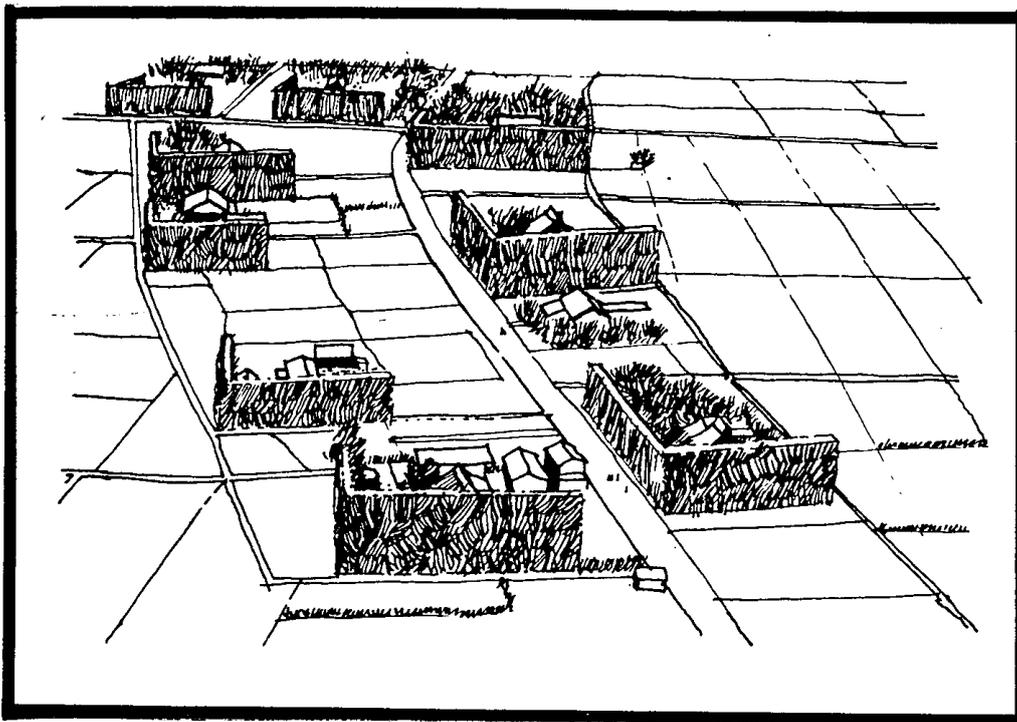
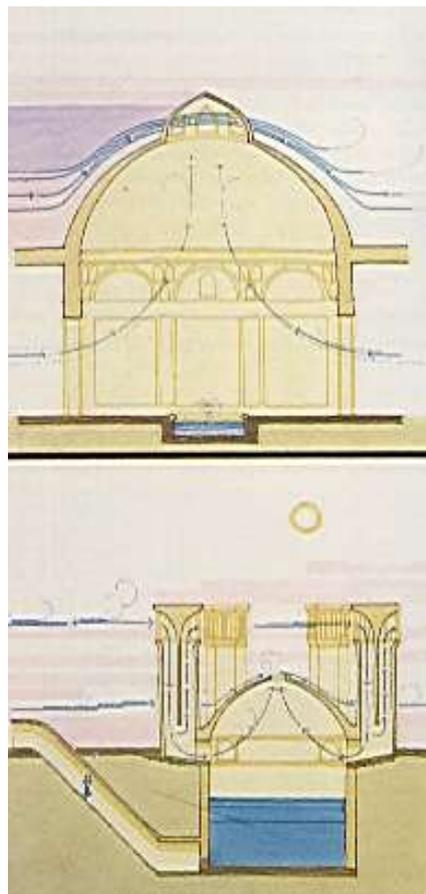


Figura 108: Uso di schermi naturali per ripararsi dal vento (Giappone)



*Figura 109: Esempio di Torri Iraniane*



*Figura 110: Schema di funzionamento delle Torri Iraniane*

L'apertura della volta si trova generalmente sopra il locale di soggiorno. Spesso le cupole sono realizzate in combinazione con le torri del vento (vedi *Figura 110*), altre volte da sole, specie se il vento porta molta sabbia.

Nelle zone nelle quali il vento spira prevalentemente in una sola direzione, la cupola è spesso sostituita da una volta cilindrica con asse del cilindro perpendicolare alla direzione del vento.

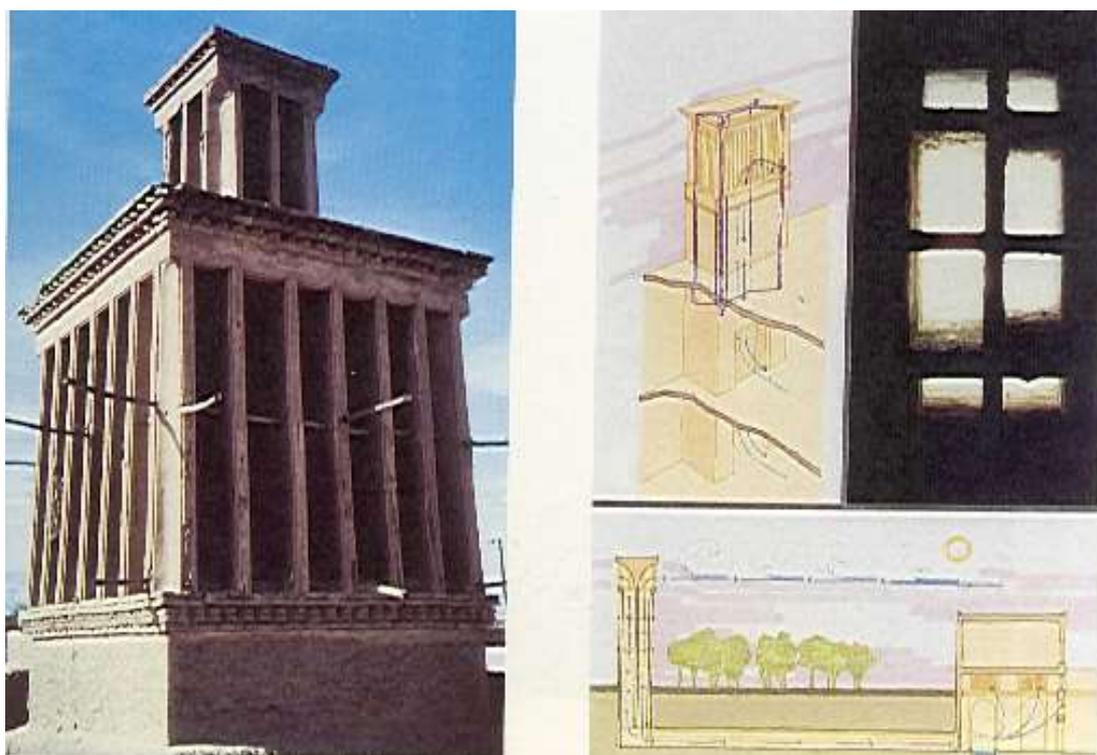


Figura 111: Effetti delle Torri Iraniane

I sistemi di raffrescamento naturali più efficaci che si trovano nell'architettura tradizionale iraniana utilizzano anche l'acqua. E' questa una caratteristica fondamentale della cultura araba, si vedano, ad esempio i giardini dell'Alhambra a Granada (Andalusia, Spagna). In questi casi si sfrutta il raffrescamento per evaporazione: l'aria passando sopra la superficie dell'acqua (o sopra una parete inumidita dall'acqua) cede calore latente all'acqua che vaporizza parzialmente e quindi si raffresca.

Queste condizioni possono essere realizzate in molti modi: si può sfruttare l'umidità naturale del muro sotterraneo della torre del vento oppure del condotto che dalla torre porta all'edificio, vedi *Figura 110* e *Figura 111*. Questo condotto di collegamento era anticamente utilizzato anche per la conservazione dei cibi essendo a temperatura inferiore degli altri ambienti. Oggi l'utilizzo dei frigoriferi ha quasi del tutto soppiantato quest'usanza.

Un altro modo per sfruttare l'evaporazione per il raffrescamento consiste nell'impiegare una vasca fornita di fontana posta nel sotterraneo della torre del vento oppure nel locale in cui sbocca il condotto che proviene dalla torre. In alcuni casi, ancora, ci si serve di fiumi o ruscelli sotterranei, di pozzi aperti verso il condotto che vengono lambiti dall'aria proveniente dalla torre a velocità elevata.

Un sistema particolarmente efficace per raffreddare l'acqua consiste nell'accoppiare più torri del vento con una cisterna (vedi *Figura 110*). Questa è un serbatoio profondo 10÷20 m, scavato nel suolo, ricoperto da una cupola e circondato da varie torri del vento.

Il funzionamento delle cisterne approfitta delle variazioni stagionali di temperatura nel deserto e delle proprietà di isolamento termico del terreno. In inverno le cisterne sono parzialmente riempite di acqua fredda, in estate, prima che il calore esterno si propaghi verso gli strati più bassi dell'acqua, lo strato superficiale viene trasportato via dalla corrente d'aria, mantenuta attiva dalle torri del vento, e raffresca la massa d'acqua sottostante per evaporazione.

In questo modo l'acqua della cisterna si mantiene fredda per lunghi periodi anche in pieno deserto.

### 5.3 ESEMPIO DI RETROFITTING DI UNA MASSERIA

L'architettura mediterranea presenta notevoli spunti di interesse di studio per le intrinseche capacità bioclimatiche delle quali si è parlato nel capitolo 4.8. Si vuole qui presentare uno studio effettuato per il *retrofitting*<sup>53</sup> di una masseria sita nelle pendici di Taormina nel quale si sono considerati gli aspetti funzionali, tecnici, storici e semantici oltre a quelli che qui possiamo definire bioclimatici. In particolare si è voluto studiare un sistema per migliorare il comportamento estivo dell'edificio alla luce di quanto sin qui studiato sui dispositivi bioclimatici e in particolare si è studiato un sistema di raffrescamento che, partendo dalle esperienze dell'architettura araba sull'uso dell'acqua per il raffrescamento estivo con umificazione nei climi secchi, utilizza un sistema di *saturazione adiabatica*<sup>54</sup> con circolazione d'acqua forzata. Le condizioni estive sono di solito quelle più impegnative rispetto a quelle invernali per altro più facilmente risolvibili<sup>55</sup> anche per effetto delle notevoli masse delle pareti esterne ed interne.

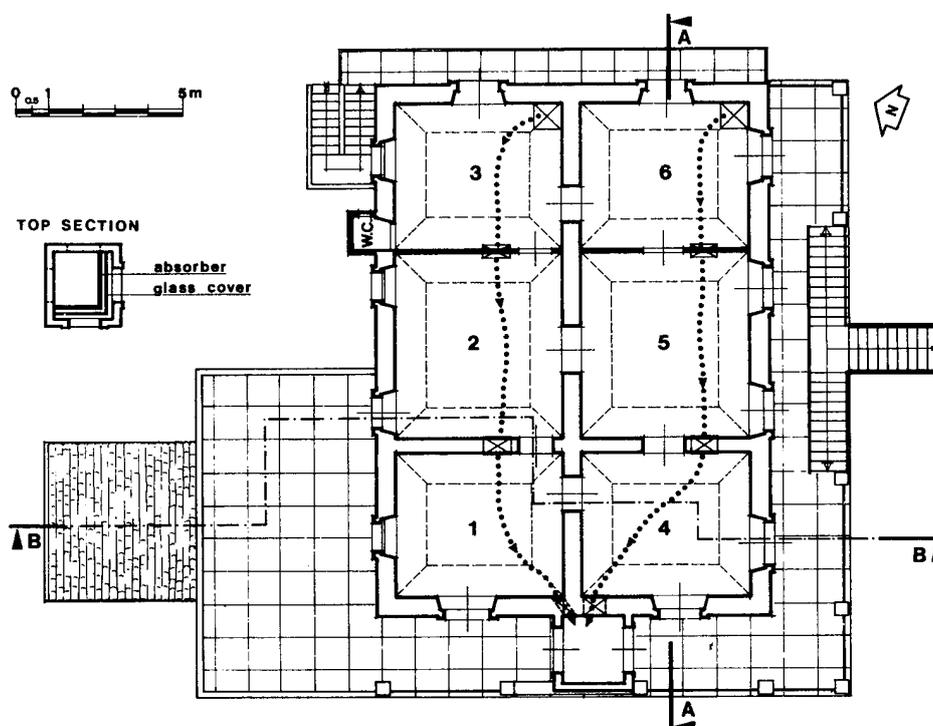


Figura 112: Pianta della Masseria equipaggiata con camino solare

L'intervento di *retrofitting* proposto per migliorare il comportamento estivo è di inserire un camino solare (*solar chimney*) opportunamente modificato. Inizialmente si è studiato il comportamento della *masseria* con il solo inserimento del camino solare che, attivando un tiraggio

<sup>53</sup> *Retrofitting* è un termine inglese usato per indicare un insieme di interventi atti a migliorare il comportamento termico di un edificio.

<sup>54</sup> Si ricorda che la *saturazione adiabatica* è stata studiata nel secondo volume e consiste nel far passare una corrente di aria umida attraverso un volume controllato all'interno del quale si ha una specie di doccia che spruzza acqua in goccioline piccolissime (polverizzazione) sull'aria che l'attraversa in modo che parte dell'acqua spruzzata vaporizzi portando a saturazione (umidità relativa 100%) l'aria stessa.

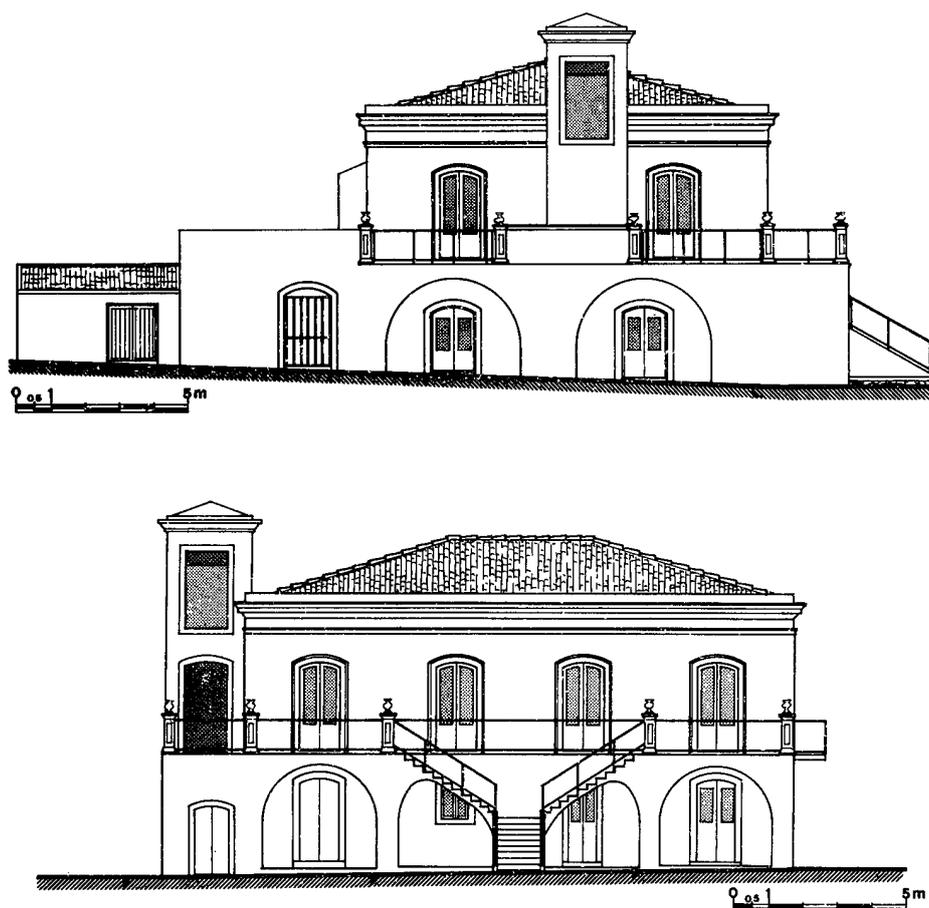
<sup>55</sup> Del comportamento invernale il Gruppo di Fisica Tecnica della Facoltà di Ingegneria di Catania si è occupato in numerose ricerche per le quali si rimanda alla bibliografia.

naturale di aria da nord verso sud porta all'interno degli ambienti aria parzialmente più fresca proveniente dai magazzini sottostanti gli ambienti abitati, vedi *Figura 112* e *Figura 113*. Il camino solare è stato immaginato in stile con la masseria per non deturparne l'architettura e costruito con gli stessi materiali (mattoni pieni con intonaco di gesso e sabbia).

Il camino solare<sup>56</sup> è posto in modo da essere esposto a sud e la superficie totale è pari a 5 m<sup>2</sup>.

### 5.3.1 FUNZIONAMENTO DEL CAMINO SOLARE (SOLAR CHIMNEY)

Per studiare il funzionamento del camino solare e il comportamento di tutta la masseria dopo l'inserimento di questo componente si è utilizzato il codice *BIOCLI* già illustrato nel 2° Volume e al quale si rimanda per ulteriori approfondimenti. Per l'applicazione al caso in esame si è modificato il codice con l'aggiunta di un modulo fluidodinamico per tenere conto del passaggio dell'aria nei vari ambienti secondo il percorso punteggiato in *Figura 112*. L'effetto del camino solare (SC) è di creare un tiraggio naturale dell'aria esterna all'interno dell'edificio attraverso le varie stanze, secondo un collegamento in serie o in parallelo. A seconda della posizione degli ambienti lungo il percorso dell'aria circolante all'interno si hanno comportamenti diversi in funzione delle diverse interazioni termofisiche e fluidodinamiche.



*Figura 113: prospetti ad ovest (sopra) e a sud (sotto) della Masseria.*

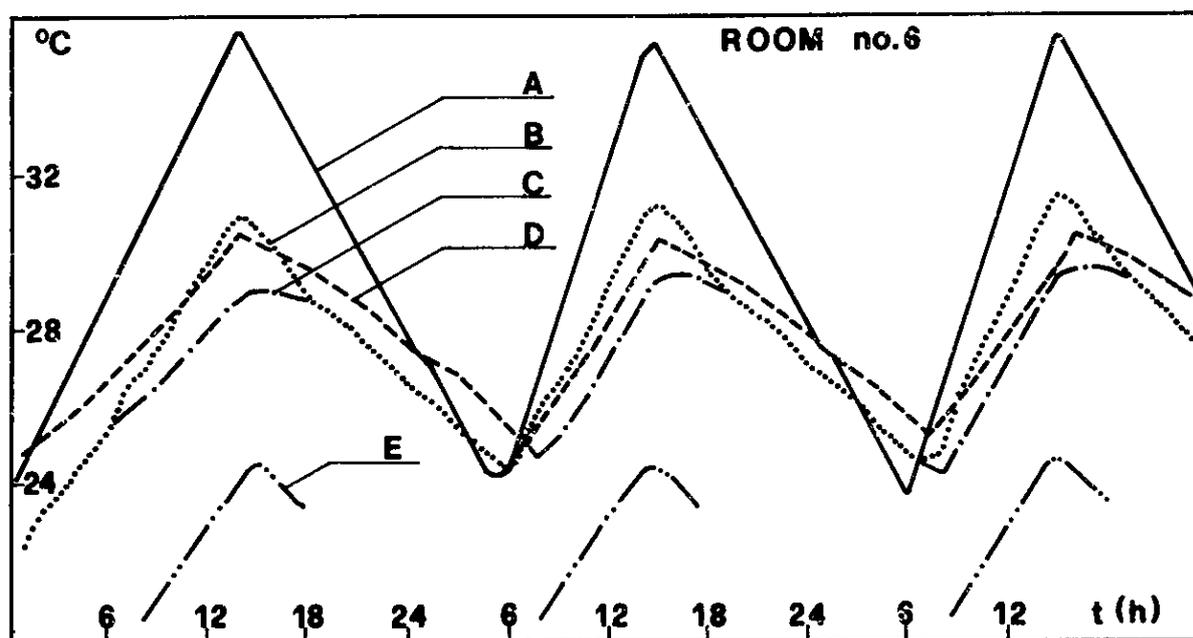
<sup>56</sup> Il *Camino Solare* è costituito da un condotto (*camino*) riscaldato esternamente lungo la superficie laterale dall'energia solare. Si viene a creare un effetto di *tiraggio* che porta l'aria a muoversi dal basso verso l'alto, come si è visto anche nello studio del sistema Barra-Costantini.

Lo studio è stato inizialmente rivolto all'analisi dell'evoluzione termica degli ambienti senza e con il camino solare. La temperatura esterna per il sito di Taormina varia fra un massimo di 36 °C ed un minimo di 24 °C e l'irradiazione media giornaliera sul piano orizzontale è pari a 6.5 kWh/m<sup>2</sup>/giorno. Le simulazioni riportate nel prosieguo si riferiscono ai soli ambienti 4, 5 e 6 maggiormente rappresentativi del comportamento termico dell'edificio.

I diagrammi temporali delle temperature per questi ambienti sono riportati in *Figura 114*, *Figura 115* e *Figura 116* in varie ipotesi di calcolo e principalmente:

1. Edificio senza alcun intervento i retrofitting (curva D)
2. Edificio con l'inserimento del solo camino solare (curva B)
3. Edificio con camino solare e saturatore adiabatico (curva C)

Come si può osservare dai grafici, la temperatura degli ambienti interni senza alcun intervento di retrofitting si mantiene inferiore rispetto a quella esterna di 4÷5 °C e ciò per il solo effetto dell'involucro edilizio della masseria.



*Figura 114: Andamento della temperatura per l'ambiente 6*

Inserendo il camino solare si ha la ventilazione degli ambienti interni con aria esterna risucchiata attraverso il camino solare. Gli effetti sono visibili nelle stesse figure.

Il risultato è che si ha un incremento della temperatura interna proprio per effetto del camino solare (curve B).

Questo incremento è crescente a mano a mano che ci si sposta dal primo ambiente incontrato dall'aria esterna verso l'ultimo. Questo andamento peggiora con il passare dei giorni, come illustrato in *Figura 117* dove sono visualizzate le tre temperature contemporaneamente.

Come conseguenza di questo intervento si può concludere dicendo che il solo camino solare non può produrre alcun effetto migliorativo delle condizioni climatiche interne. Esso, infatti, non fa altro che portare l'aria calda esterna negli ambienti che, per conseguenza, sono meno isolati dalle variazioni esterne.

E' come se la resistenza media dell'edificio fosse diminuita. Il solo camino solare non può essere accettato come azione di retrofitting.

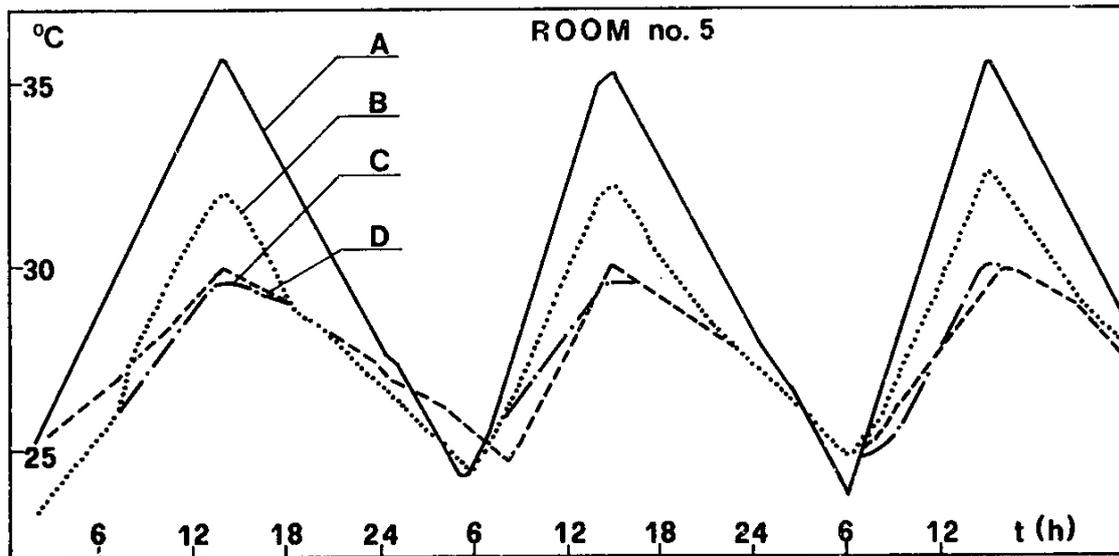


Figura 115: Andamento della temperatura per l'ambiente 5

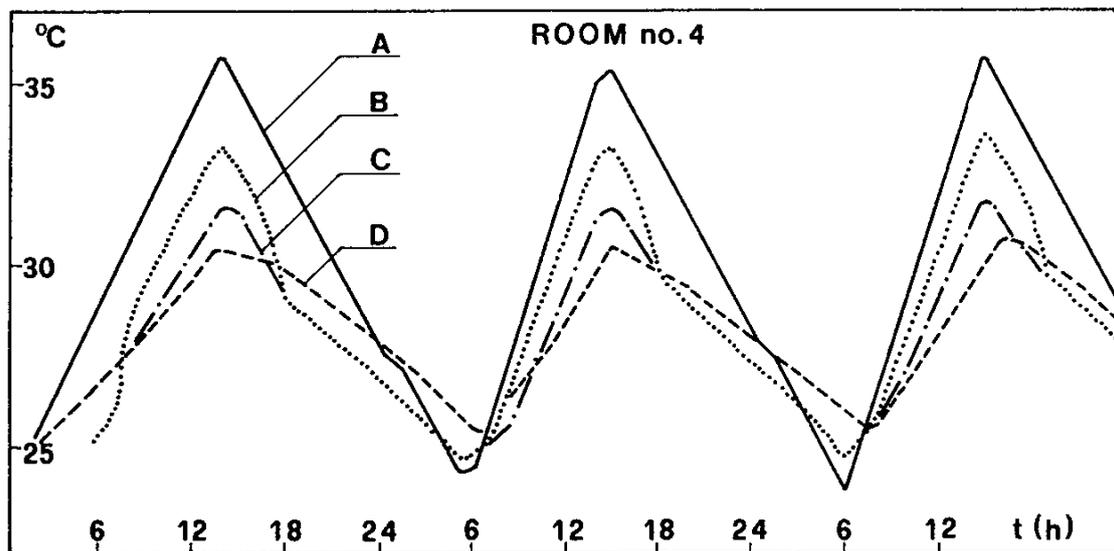


Figura 116: Andamento della temperatura per l'ambiente

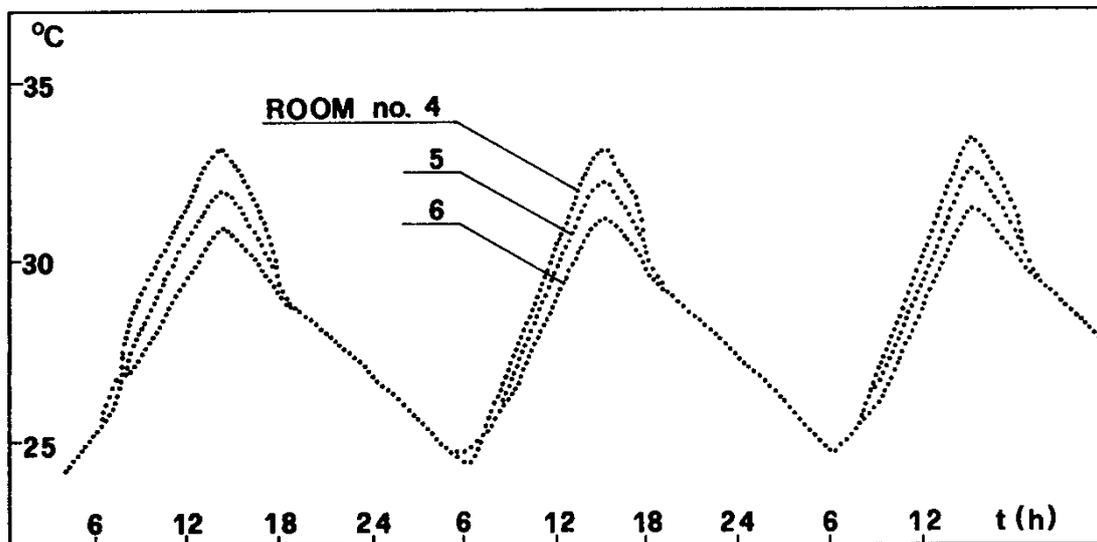


Figura 117: Andamenti delle temperature negli ambienti 4, 5 e 6 con il solo camino solare inserito

## 6. PROGETTAZIONE ENERGETICAMENTE CONGRUENTE

Quanto si qui detto ha certamente fatto comprendere come il comportamento termofisico di un edificio non sia facile da prevedere e anche i calcoli semplificati richiedono un uso sempre più frequente e quasi sempre esclusivo di computer. La progettazione di un edificio non può essere affrontata a cuor leggero senza la consapevolezza che le scelte fatte in sede architettonica avranno influenze più o meno buone sul comportamento termico dell'edificio, sui consumi energetici e quindi, indirettamente, sull'inquinamento atmosferico e sulla qualità della vita in genere. Si vuole qui fare un quadro sinottico, che vuole anche essere anche una specie di guida progettuale, di quanto è stato sin qui detto mettendone in risalto gli aspetti progettuali. Si vuole anche spronare il lettore a ben comprendere lo stretto legame fra Architettura ed Energia (non si prendono in esame altri aspetti per semplicità) in ogni aspetto, anche apparentemente futile, del problema.

Oggi si parla, infatti, di *progettazione energeticamente congruente* come quell'insieme di regole d'arte da seguire per una corretta progettazione degli edifici che tenga conto delle esigenze di funzionalità, benessere ambientale e necessità di consumi razionali dell'energia termica. Questa non è, infatti, un bene rinnovabile: l'energia oggi quasi esclusivamente utilizzata è di provenienza da combustibili di tipo fossile e pertanto ciò che si brucia oggi non è più disponibile domani.

Lo stesso meccanismo di combustione porta, in aggiunta a quanto detto, anche seri problemi di qualità della vita: ormai tutti sanno come la combustione dei prodotti fossili porti ad

una continua produzione di CO<sub>2</sub> che, immessa nell'atmosfera, accresce l'effetto serra. Il problema è ormai maturo ed evidente a tutti e la sua soluzione non può più essere differita, come dimostrato anche dall'ultima Conferenza sull'Ambiente di Tokyo (1997).

E allora occorre, per quanto possibile, cercare di risolvere i problemi alla fonte: non si può più progettare gli edifici senza la dovuta attenzione ai problemi energetici che essi pongono. Gli impianti di riscaldamento invernale e di condizionamento estivi sono piuttosto energivori e contribuiscono con una percentuale del 25÷35 % al consumo globale di energia per usi termici nel mondo. Ridurre questi consumi è oggi non solo possibile ma anche civilmente doveroso verso noi stessi e verso le future generazioni. Lo sforzo progettuale deve portare a garantire gli standard qualitativi di benessere ambientale (termo-igrometrico, acustico, visivo, ...) cercando il minimo apporto esterno di energia, rendendo l'edificio un sistema complesso che risponda, per quanto possibile, da solo alle molteplici esigenze funzionali. Non curare questo aspetto conduce ad errori grossolani, oggi non più accettabili e neppure ammessi dalla numerosa e complessa normativa che sempre più condiziona l'iter progettuale.

La progettazione deve sempre perseguire la *regola d'arte*, intesa come aderenza alla *Normativa* vigente, non solamente come cogenza ma anche come stile progettuale. Gli anglosassoni hanno coniato una frase che bene esprime quanto sopra detta: **energy building conscious design**. La progettazione deve quindi essere *cosciente*, prima ancora che costretta dalle norme, per ottenere i migliori risultati. Questa *coscienza* è non solo riferita al concetto di padronanza della propria volontà di progettare bene ma anche alla necessità di una buona *conoscenza* delle problematiche che una buona progettazione pone.

Non si può avere *coscienza* senza *conoscenza* di ciò che si fa e che si deve conoscere per ben progettare.

## 6.1 SCELTA DEI COMPONENTI

E' questa la fase forse più delicata della progettazione, escludendo qui volutamente gli aspetti puramente architettonici (distributivi, sociali, funzionali). E' sempre bene pensare all'edificio come un **sistema complesso** la cui interazione con l'ambiente esterno (mutevole da sito a sito, spesso ostile) è svolta dall'**involucro esterno**. Le interazioni fra edificio ed ambiente esterno sono, per quel che ci interessa nell'ambito di questo Corso, di due tipi:

Scambi di energia attraverso l'involucro esterno per dispersioni;  
Scambi di massa (aria e umidità) per infiltrazione e ventilazione.

In una prima fase possiamo lasciare libera la fantasia di creare le forme architettoniche più rispondenti alle esigenze progettuali. Successivamente, però, occorre anche fare in modo che questa forma sia la migliore possibile e che la scelta dei componenti edilizi (pareti, porte, finestre, ..) sia congruente con l'esigenza del risparmio energetico.

Non si può fornire un decalogo perfetto per la progettazione ma solo regole guida. Del resto il numero di variabili in gioco sono talmente tante che non è neppure possibile immaginare di legarle con relazioni analitiche per ottenere una progettazione unicamente definita (per fortuna!). L'Architetto deve sempre avere libertà creativa altrimenti avremo sempre la stessa forma, con gli stessi materiali, con gli stessi colori, .... Sarebbe davvero triste!

## 6.2 SCELTA DELLE PARETI ESTERNE

Le pareti opache esterne debbono garantire un buon isolamento e questo può essere valutato mediante gli indici globali di disperdimento C<sub>d</sub>, C<sub>v</sub> e C<sub>g</sub> (somma dei due precedenti).

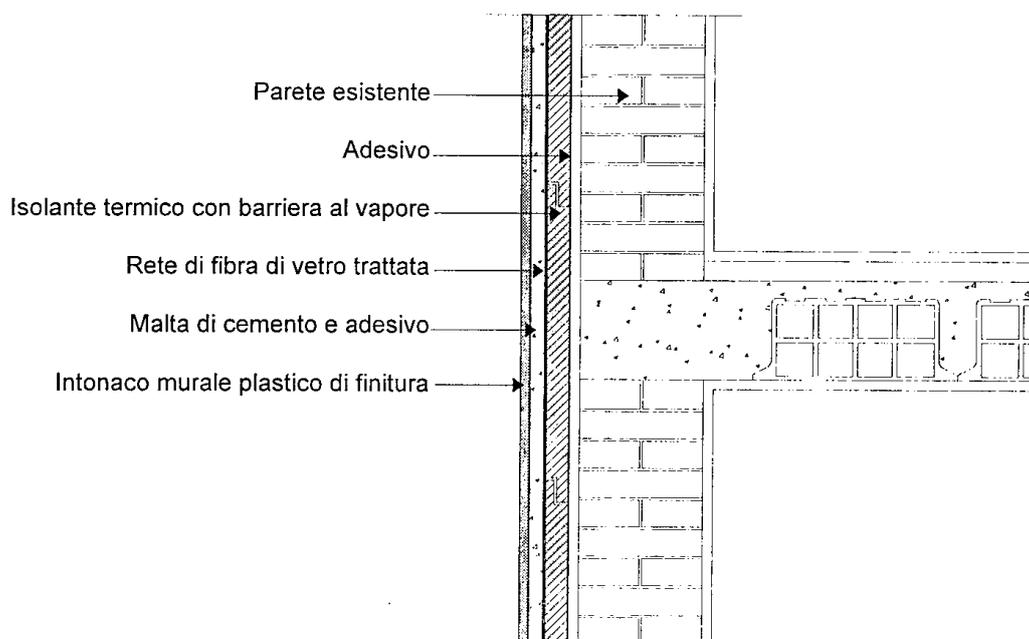
L'isolamento termico (quasi sempre anche isolamento acustico!) deve essere posto con attenzione ricordando che:

Se posto in corrispondenza della superficie esterna si ha una minore efficacia per quanto riguarda l'isolamento termico ma, in compenso, si ha una maggiore capacità termica e pertanto anche una minore oscillazione termica all'interno.

Se posto in posizione intermedia (ad esempio nelle intercapedini interne delle pareti) allora si ha un comportamento medio fra buon isolamento e riduzione delle oscillazioni termiche.

Se posto in corrispondenza delle pareti interne si ha il massimo effetto di isolamento ma le maggiori oscillazioni della temperatura interna poiché la capacità termica risulta inferiore.

Un tipo particolare di isolamento esterno è detto *a cappotto* e consiste nell'applicare l'isolante termico all'esterno in modo uniforme e tale, quindi, da eliminare i ponti termici con le strutture in cemento armato, i fenomeni di condensa del vapor d'acqua. La posizione all'esterno dell'isolante comporta anche una maggiore inerzia termica, una minore oscillazione della temperatura interna ed un miglior grado di benessere interno. Si deve porre attenzione alla posa dell'isolante poiché all'esterno delle pareti è possibile avere attacchi degli agenti atmosferici. Sono consigliabili il polistirene espanso (a celle chiuse per evitare l'assorbimento dell'acqua) e la lana minerale in lastre rigide di elevata densità, (vedi *Figura 118*).



*Figura 118: Schema di installazione di isolamento esterno a cappotto*

A seconda delle tipologie costruttive si possono avere pareti esterne a doppio strato con intercapedine interna che può essere parzialmente o interamente utilizzata per installare isolante termico. Una tecnica molto utilizzata (valida anche per edifici già esistenti) per le pareti doppie è detta di *insufflazione* dell'isolante: questo viene insufflato tramite opportuni fori all'interno delle intercapedini ancora allo stato di schiuma che poi solidifica formando una lastra ben rigida interna che sigilla ogni possibile ponte verso l'esterno. Si usano schiume di urea o poliuretaniche in genere. Occorre lasciare fuoriuscire l'umidità iniziale prodotta dalle schiume prima di chiudere del tutto i fori di immissione. In *Figura 119* è data una schematizzazione del tipo di intervento presentato.

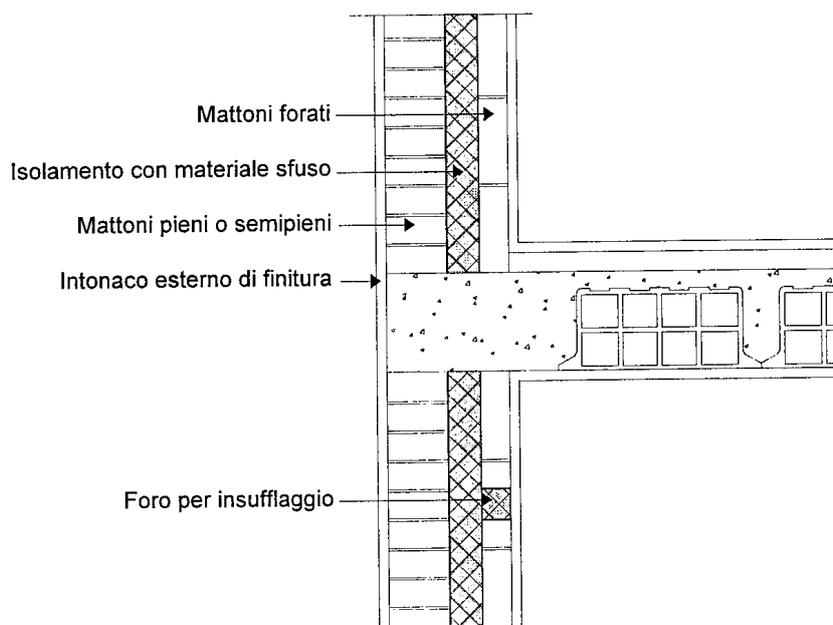


Figura 119: Schema di posa dell'isolante interno mediante insufflazione di schiume nell'intercapedine

Una tecnica che si sta sviluppando in questi ultimi anni e che sembra dare ottimi risultati sul comportamento termico degli edifici è l'utilizzo delle *pareti ventilate*. Esse consistono di una normale parete esterna alla quale si aggiunge una lamina di materiale dello spessore di 1÷2 cm posta ad una distanza di circa 5÷10 cm dalla prima in modo da formare un canale libero fra le due superfici (vedi Figura 120).

Per effetto delle differenze di temperatura fra le superfici e dei gradienti termici verticali si ha una circolazione di aria che produce effetti benefici: riduce il surriscaldamento interno poiché riduce la temperatura aria-sole della parete esterna, evita gli effetti di condensa e, soprattutto in estate, favorisce la ventilazione esterna e quindi il raffrescamento interno.

In inverno la maggiore ventilazione nell'intercapedine fra gli strati favorisce gli scambi termici ma la riduzione dell'isolamento termico viene compensata dagli altri effetti benefici e quindi complessivamente questo tipo di parete risulta conveniente. Oggi sono disponibili pareti esterne prefabbricate (materiale gessoso su rete metallica) che si possono applicare facilmente alle pareti esterne, anche se già costruite, mediante una serie di agganci metallici di facile inserimento.

L'uso di materiali lapidei (ad esempio di pietra bianca di *modica*) può costituire un elemento architettonico di stimolo alla realizzazione delle pareti ventilate. Sullo stesso principio si possono avere anche le *coperture ventilate* costituite da doppi solai con intercapedine d'aria di 10÷20 cm in modo da favorire la ventilazione e, soprattutto in estate, lo smaltimento del calore.

E' da tenere ben presente che le pareti formanti l'intercapedine debbono lasciare due aperture, una in basso ed una in alto, in modo da lasciare circolare l'aria interna per effetto camino. Dette aperture è bene che siano protette da reti metalliche anti topo.

E' importante scegliere bene il colore delle pareti esterne poiché esso influenza l'interazione con la radiazione solare (si ricordi la definizione della temperatura aria-sole) e quindi sulle trasmissioni di energia. Occorre evitare l'uso di pareti esterne leggere poiché si avrebbe una bassa capacità termica dell'edificio che porterebbe ad avere forti oscillazioni termiche all'interno dell'edificio.

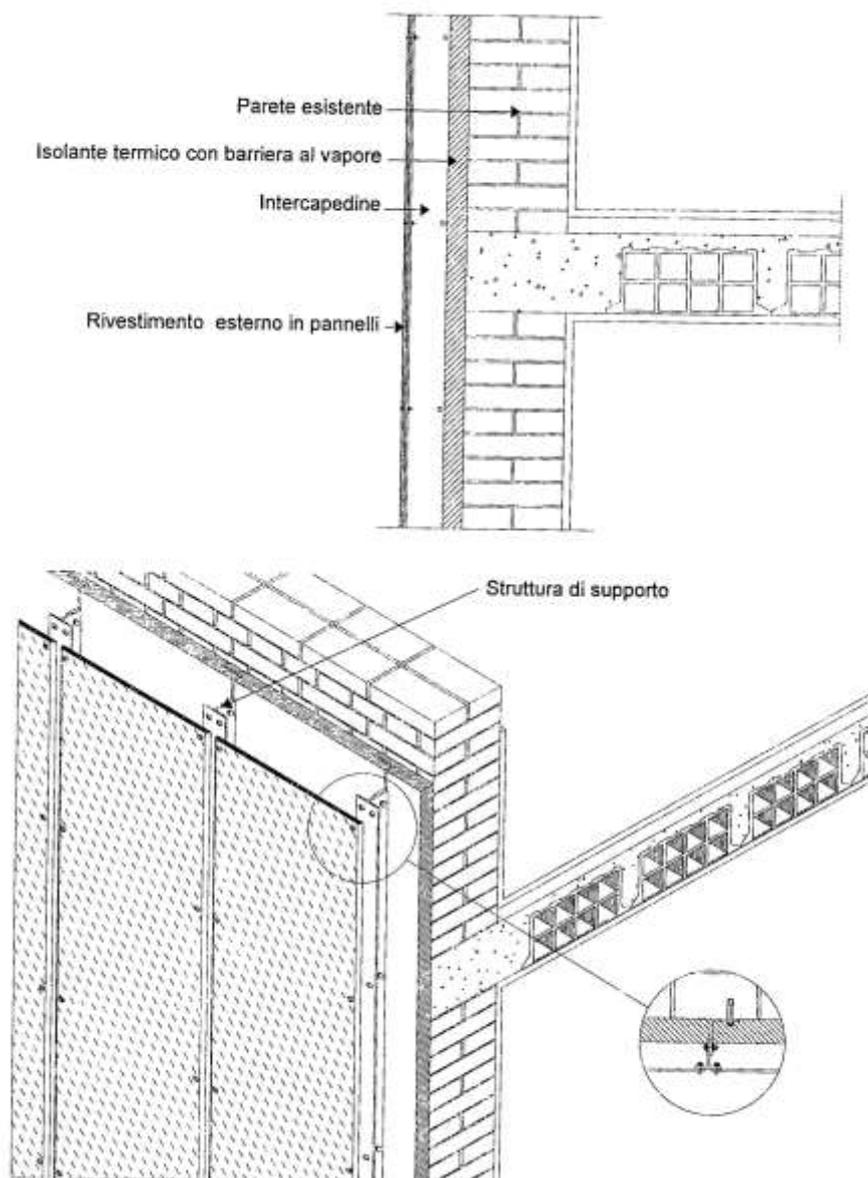


Figura 120: Schema di installazione di una parete ventilata

Evitare l'uso di grandi superfici in calcestruzzo armato a faccia vista: questo conduce bene il calore e per conseguenza si avrebbero forti dispersioni termiche e non buone condizioni ambientali di benessere. Le pareti esterne debbono anche essere verificate per la diffusione dell'umidità (metodo di Glaser) onde evitare danneggiamenti per la condensa del vapore acqueo.

### 6.3 SCELTA DELLE PARETI INTERNE

Anche le pareti interne hanno una funzione importante, oltre a quella di dividere gli spazi: esse contribuiscono molto all'accumulo termico. Evitare, dove possibile, di usare pareti eccessivamente sottili e troppo leggere perché questo va contro la necessità di avere una buona capacità termica interna.

L'effetto di accumulo termico viene espresso soprattutto per le radiazioni solari che entrano all'interno degli ambienti attraverso le superfici vetrate e quindi occorre fare in modo che queste non siano eccessivamente distanti dalle pareti interne.

## 6.4 SCELTA DELLE COPERTURE

Le coperture sono elemento importantissimo di un edificio. Esse hanno sempre caratterizzato le tipologie costruttive tipiche dell'architettura vernacolare (si pensi ai *dammusi* di Pantelleria, ai *trulli* della Puglia, ...). Attraverso le coperture si hanno forti disperdimenti che debbono essere adeguatamente contrastati con l'utilizzo di isolanti termici o di tecnologie costruttive particolari. Esse debbono anche assicurare un corretto smaltimento delle acque meteoriche. Le tipologie di isolamento maggiormente utilizzate sono le seguenti.

### ISOLAMENTO POSTO SULL'ESTRADOSSO A TETTO CALDO

In questo caso l'isolante termico è posto all'esterno esternamente al solaio, immediatamente al di sotto dello strato di impermeabilizzazione. Le coperture piane (molto utilizzate alle nostre latitudini) soffrono anche di forti irraggiamenti solari e quindi di ciclaggi termici che provocano fessurazioni dannose. Per evitare questi effetti si possono usare varie tecniche. Ad esempio si può ricoprire il soffitto con pietrisco o ghiaia a grossa granulometria sparsa uniformemente in modo che vi si possa camminare sopra o anche si può utilizzare uno strato pedonale esterno, come indicato in *Figura 121*.

### ISOLAMENTO POSTO SULL'ESTRADOSSO A TETTO ROVESCIO

Il materiale isolante è posto all'esterno dello strato impermeabilizzante e pertanto le radiazioni solari lo colpiscono direttamente. Per evitare danni dovuti ai ciclaggi termici e alle infiltrazioni di acqua, gli isolamenti termici debbono essere densi e non assorbenti (a celle chiuse). Questi isolanti fungono anche da barriere al vapore. In *Figura 122* si ha una rappresentazione di *tetto rovescio* con strato esterno zavorra.

### CONTROSOFFITTO INTERNO

L'isolante termico è posto sulla parte interna del solaio, possibilmente opportunamente distanziato da questo. Questa disposizione annulla la capacità termica del solaio e può interferire con l'impiantistica sovrastante (tubi, canali d'aria, canaline elettriche, impianti di illuminazione). L'isolante può essere installato in pannelli rigidi con intelaiatura portante del tipo controsoffitto addossato alla superficie del solaio oppure con la creazione di un'opportuna intercapedine che può essere a sua volta utilizzata come volume tecnico di passaggio degli impianti.

### COPERTURA A FALDE

Si possono isolare le falde oppure creare un solaio di sottotetto interno ed isolare quest'ultimo. Se si isolano le falde si può porre l'isolante sotto le tegole, immediatamente al di sopra della barriera di vapore. Nel caso di solaio di sottotetto si può porre l'isolante immediatamente al di sopra della superficie esterna. L'isolante può essere a lastre o anche feltri di lana di roccia in sacchetti protettivi o anche in granuli dispersi uniformemente sulla superficie.

### SOLAI SU PILOTIS

Anche in questo caso occorre porre molta attenzione a ben isolare questi solai per ridurre i disperdimenti termici. Quasi sempre la posizione dell'isolante è esterna al solaio in modo da lasciare libero il pavimento calpestabile. Per evitare attacchi degli agenti atmosferici occorre anche prevedere intonaci esterni adeguatamente resistenti (intonaci plastici).

## 6.5 SCELTA DELLE SUPERFICI VETRATE

E' una delle scelte più importanti. Le superfici vetrate contribuiscono in due modi al bilancio energetico dell'edificio: per effetto dei disperdimenti termici e per effetto delle radiazioni solari trasmesse. Essendo i vetri normali buoni conduttori del calore avere grandi superfici vetrate comporta avere anche grandi disperdimenti energetici e quindi problemi di verifica con la L. 10/91. I guadagni solari possono avere un duplice comportamento: sono positivi in inverno perché costituiscono contributi gratuiti di energia e quindi riducono il carico termico istantaneo; sono negativi in estate perché aumentano il carico termico e quindi appesantiscono gli impianti di condizionamento.

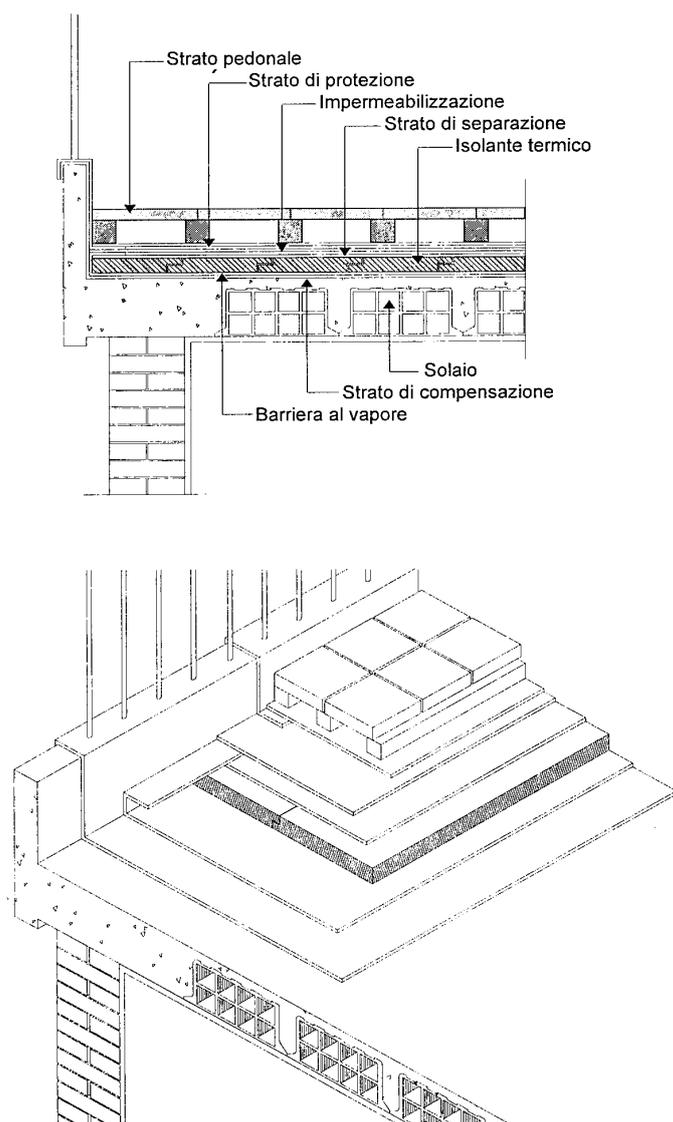


Figura 121: Schema di isolamento sull'estradosso del soffitto.

La scelta migliore del rapporto fra superficie vetrata e superficie opaca può essere fatta osservando le abitazioni tipiche del luogo. In Sicilia, ad esempio, non si hanno mai, nelle abitazioni vernacolari, grandi vetrate, anzi queste sono sempre limitate e schermate con veneziane e tende. In Sicilia, infatti, abbiamo un forte soleggiamento e quindi grandi vetrate comportano anche grandi rientrate termiche estive e quindi necessità di avere un impianto di condizionamento.

Un altro aspetto importante delle finestre (come pure delle porte) è la tenuta degli infissi. E' proprio attraverso questi, infatti, che si hanno le infiltrazioni d'aria che portano ad un maggiore

carico termico invernale ed estivo. Solo nelle mezze stagioni si può avere beneficio dalle infiltrazioni d'aria perché la temperatura dell'aria esterna è prossima a quella di maggior comfort. In alcuni paesi (ad esempio in Francia) è obbligatorio collegare alle finestre e alle porte esterne un sistema di rilevazione automatica dell'apertura che provvede a spegnere temporaneamente gli impianti se queste sono aperte.

Del resto, che senso ha avere il riscaldamento o il condizionamento in funzione se si tengono aperte le finestre! Nelle nuove costruzioni è sempre bene prevedere infissi con vetro-camera e nelle vecchie costruzioni si può pensare di operare interventi di riduzione del carico termico sostituendo gli infissi con vetri normali con nuovi infissi a tenuta e vetri doppi.

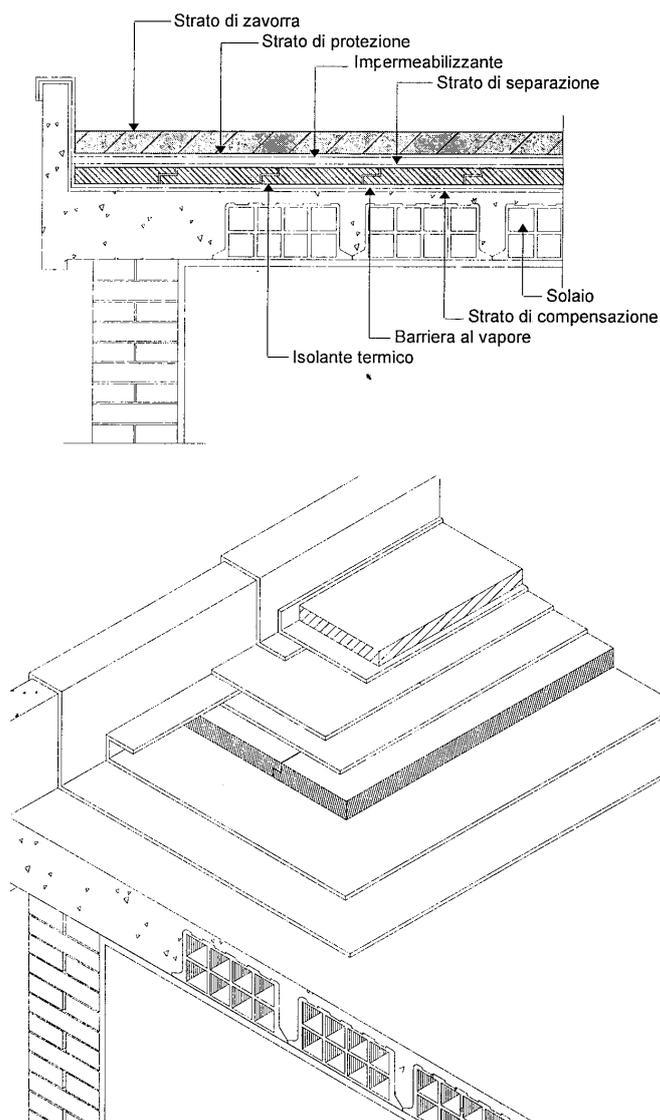


Figura 122: Esempio di tetto rovescio

### SCelta DELLE PORTE

Le porte possono essere opache o anche vetrate. Per quest'ultimo tipo vale quanto detto per le vetrate. Per le porte opache occorre fare attenzione alla tenuta degli infissi per evitare le infiltrazioni d'aria esterna. L'uso quasi esclusivo del legno rende le porte ottimi componenti esterni.

## BIBLIOGRAFIA

1. B. GIVONI: "Man Climate and Architecture". Elsevier. 1977.
2. M JACOB: "Heat Transfer", Vol. 1, N.Y., 1949.  
B. GIVONI, M. HOFFMAN, "Prediction of the thermal behaviour of full scale buildings", Report to U.S. NBS, Technion, Haifa, Israel, 1972.
3. ASHRAE: "Fundamentals", cap. 26. 1981 e seguenti: 1985,1989,1993
4. CADZOW. MARTENS: "Discrete time and computer control systems", Prentice Hall, 1970.
5. G. OLJAY : Design with climate, N.Y., 1977
6. A. SACCHI – G. CAGLIERIS: Climatizzazione, UTET 1977
7. G. GUGLIELMINI – C. PISONI: Elementi di trasmissione del calore, Veschi, 1990
8. G. CHIESA – G. DALL’O: Risparmio energetico in edilizia, Masson, 1996
9. A. BADAGLIACCA: Fondamenti di trasmissione del calore, ARACNE, 1997
10. J.A. DUFFIE – W.A. BECKMAN : Solar Engineering of thermal processes, J. Wiley, 1991
11. F. M. BUTERA: Architettura e Ambiente, ETASLIBRI, 1995
12. AA.VV. Manuale di Progettazione Edilizia, HOEPLI 1994, Vol. II
13. ENARCH '83: Architettura Bioclimatica, De Luca Editore, 1983
14. G. CAMMARATA. Et alii: "Ecological Architecture. Correct environmental insertion and energy saving. Bioclimatic research in the Etna area. First report. Calculation methodology", Atti del Seminario Internazionale di Progettazione Bioclimatica, Catania, 1981.
15. CAMMARATA G., MARLETTA L.: "Un codice di calcolo multi-room a parametri distribuiti - DPM", Atti Congresso ATI 1987.
16. CAMMARATA G., FICHERA A., FORGIA F., MARLETTA L.: "Riduzione del modello matematico delle traiettorie di stato: fondamenti teorici". 47° Convegno ATI, Parma Settembre 1992.
17. G. CAMMARATA et alii, "Analisi Energetica dei Processi dell'Aria Umida", 47° Congresso Nazionale ATI, Parma, 16-18 Settembre, 1992.
18. G. CAMMARATA: Previsione e controllo microclimatico ambientale nei musei, Assessorato Regionale Siciliano Beni Culturali ed Ambientali, 1992.
19. G. CAMMARATA et alii, "Valutazione Spazio-Temporale del Discomfort in Ambienti Termicamente Non Uniformi", Condizionamento dell'Aria Riscaldamento e Refrigerazione, CDA, n° 5 Maggio 1992, pag. 743-751.
20. G. CAMMARATA et alii, "Thermodynamic Effects of the Thermal Conductivity Dependence upon Temperature in Two-Dimensional Heat Conduction" High Temperatures-High Pressures, vol. 25, pag. 599-606, 1993
21. G. CAMMARATA et alii, "Comfort Termico negli Ambienti Termicamente Severi", 48° Congresso Nazionale ATI, Taormina, 28 Settembre 1 Ottobre, 1993.
22. G. CAMMARATA: Rapporto finale su: Controllo fisico-tecnico degli ambienti di lavoro: Innovazione tecnologica, MURST – 40% Anno 1993.

**INDICE GENERALE**

<b>1. INTRODUZIONE ALLA CLIMATOLOGIA</b>	<b>1</b>
<b>1.1 IMPORTANZA DELLA TERMOFISICA DELL'EDIFICIO</b>	<b>16</b>
<b>1.2 SCOPO DEL VOLUME</b>	<b>17</b>
<b>2. IL CLIMA: FATTORI FISICI</b>	<b>18</b>
<b>2.1 ELEMENTI DI CLIMATOLOGIA TERRESTRE</b>	<b>19</b>
2.1.1 LA RADIAZIONE SOLARE E L'ATMOSFERA DELLA TERRA	19
2.1.2 INFLUENZE DELLE SUPERFICI DI TERRA E DI MARE.	20
2.1.3 INFLUENZA DELLE MASSE OCEANICHE.	21
2.1.4 CONTINENTALITÀ DEL CLIMA	21
2.1.5 INFLUENZA DELLE CORRENTI ATMOSFERICHE E OCEANICHE.	22
2.1.6 RELAZIONI CON LA PRESSIONE ATMOSFERICA E I VENTI.	22
2.1.7 INFLUENZE MARINE SULL'ATMOSFERA.	24
2.1.8 TIPI DI PRECIPITAZIONE CONTINENTALE.	25
2.1.9 REGIONI CLIMATICHE	26
2.1.10 CAMBIAMENTI CLIMATICI	27
<b>2.2 L'IRRADIAZIONE SOLARE DIRETTA</b>	<b>28</b>
2.2.1 RAPPORTO FRA RADIAZIONE DIRETTA SU UNA SUPERFICIE INCLINATA RISPETTO A QUELLA SU SUPERFICIE ORIZZONTALE 30	30
2.2.2 RADIAZIONE TOTALE SU UNA SUPERFICIE INCLINATA CON CIELO ISOTROPICO	31
2.2.3 LA TRASMITTANZA O TRASPARENZA ATMOSFERICA	32
2.2.4 FENOMENI CHE MODIFICANO LA TRASPARENZA ATMOSFERICA	35
2.2.5 RADIAZIONE EMESSA DALLA TERRA	36
2.2.6 LA TEMPERATURA ARIA-SOLE	37
2.2.7 LE CARTE SOLARI – DIAGRAMMA ELIODIADROMICO	41
2.2.8 UTILIZZO DEI DIAGRAMMI ELIODIADROMICI	43
<b>3. IL CLIMA E LA PROGETTAZIONE</b>	<b>50</b>
<b>3.1 IL CLIMA RISPETTO ALLE SCALE GEOGRAFICHE</b>	<b>52</b>
<b>3.2 FATTORI CLIMATICI</b>	<b>53</b>
3.2.1 RADIAZIONE SOLARE	53
3.2.2 ANALISI STATISTICA DELLA RADIAZIONE SOLARE	7
3.2.3 NUVOLOSITÀ	13
3.2.4 TEMPERATURA DELL'ARIA	13
3.2.5 MOVIMENTI D'ARIA	14
3.2.6 UMIDITÀ DELL'ARIA	14
<b>3.3 INFLUENZA DEL SITO SULLA PROGETTAZIONE</b>	<b>15</b>
3.3.1 EFFETTI DELL'ALTITUDINE	15
3.3.2 EFFETTI DI CORPI D'ACQUA	16
3.3.3 EFFETTI DELLA VEGETAZIONE	16
3.3.4 EFFETTI DELL'EDIFICATO URBANO	17
3.3.5 INFLUENZA DEL RAPPORTO DI FORMA E DEL RAPPORTO SUPERFICIE-VOLUME	18
3.3.6 INFLUENZA DEL CLIMA SULLA DENSITÀ URBANA	21
<b>3.4 CARATTERIZZAZIONE CLIMATICA DEL TERRITORIO</b>	<b>21</b>
3.4.1 VELOCITÀ DEL VENTO	22
3.4.2 UMIDITÀ RELATIVA	30
3.4.3 RADIAZIONE SOLARE E TEMPERATURA ESTERNA	30
3.4.4 METODO DEI GRADI-GIORNO	31
<b>4. ARCHITETTURA BIOCLIMATICA: STATO DELL'ARTE</b>	<b>34</b>
<b>4.1 IL FUNZIONAMENTO ENERGETICO DEGLI EDIFICI</b>	<b>36</b>
<b>4.2 LE RISPOSTE AL PROBLEMA RIFERITA AL CONTESTO INTERNAZIONALE.</b>	<b>37</b>

CLIMATOLOGIA DELL'AMBIENTE COSTRUITO

<b>4.3</b>	<b>L'ARCHITETTURA DELL'EVOLUZIONE</b>	<b>38</b>
<b>4.4</b>	<b>ADATTAMENTO DEI RAPPORTI UOMO-AMBIENTE</b>	<b>39</b>
<b>4.5</b>	<b>CLIMATIZZAZIONE E SISTEMA DI CONTROLLO</b>	<b>42</b>
<b>4.6</b>	<b>CONCILIAZIONE TRA AMBIENTE ARTIFICIALE ED NATURALE</b>	<b>45</b>
4.6.1	DIMENSIONE CLIMATICA DELL'AMBIENTE	45
4.6.2	ARCHITETTURA BIOCLIMATICA	46
4.6.3	MODELLI TIPOLOGICI DI ARCHITETTURA BIOCLIMATICA	49
<b>4.7</b>	<b>APPROCCIO ALLA PROGETTAZIONE BIOCLIMATICA</b>	<b>50</b>
4.7.1	IL PROBLEMA GENERALE	50
4.7.2	UN'ARCHITETTURA ENERGETICAMENTE CONGRUENTE	51
4.7.3	SISTEMA TECNOLOGICO	52
4.7.4	RIDEFINIZIONE DEL SISTEMA EDILIZIO	54
<b>4.8</b>	<b>IL CLIMA E LA TRADIZIONE COSTRUTTIVA</b>	<b>55</b>
4.8.1	RIDUZIONE DELLE SUPERFICI ESPOSTE AI RAGGI SOLARI RISPETTO AL VOLUME COSTRUITO	55
4.8.2	CONTROLLO DELLA QUANTITÀ DI CALORE TRASMESSA DALL'INVOLUCRO.	56
4.8.3	CREAZIONE DI AMBIENTI A DIFFERENTE TEMPERATURA.	56
4.8.4	CREAZIONE DI ZONE D'OMBRA ATTRAVERSO SCHERMATURE FISSE O MOBILI.	57
<b>4.9</b>	<b>I COMPONENTI FONDAMENTALI PER L'ARCHITETTURA BIOCLIMATICA</b>	<b>58</b>
4.9.1	SISTEMI PASSIVI	60
4.9.2	SISTEMI SOLARI ATTIVI	73
<b>5.</b>	<b>ESEMPI DI ARCHITETTURA BIOCLIMATICA</b>	<b>77</b>
<b>5.1</b>	<b>PRINCIPI GENERALI</b>	<b>77</b>
<b>5.2</b>	<b>INFLUENZA DEL CLIMA</b>	<b>78</b>
5.2.1	INSEDIAMENTO INDIANO DI MESA VERDE IN COLORADO	79
5.2.2	CITTÀ DI GHARDAIA, ALGERIA	81
5.2.3	I SASSI DI MATERA	83
5.2.4	I DAMMUSI DI PANTELLERIA	84
5.2.5	LE TORRI IRANIANE	86
<b>5.3</b>	<b>ESEMPIO DI RETROFITTING DI UNA MASSERIA</b>	<b>92</b>
5.3.1	FUNZIONAMENTO DEL CAMINO SOLARE ( <i>SOLAR CHIMNEY</i> )	93
<b>6.</b>	<b>PROGETTAZIONE ENERGETICAMENTE CONGRUENTE</b>	<b>96</b>
<b>6.1</b>	<b>SCELTA DEI COMPONENTI</b>	<b>97</b>
<b>6.2</b>	<b>SCELTA DELLE PARETI ESTERNE</b>	<b>97</b>
<b>6.3</b>	<b>SCELTA DELLE PARETI INTERNE</b>	<b>100</b>
<b>6.4</b>	<b>SCELTA DELLE COPERTURE</b>	<b>101</b>
<b>6.5</b>	<b>SCELTA DELLE SUPERFICI VETRATE</b>	<b>102</b>

**ELENCO DELLE FIGURE**

Figura 1: Esempio di architettura primitiva: la capanna.	2
Figura 2: Capanna più evoluta e plurifamiliare.	3
Figura 3: Esempio di capanna più evoluta rispetto alla figura 1.	3
Figura 4: Esempio di architettura funzionale: l'igloo eschimese	4
Figura 5. Palazzo di Cnosso- Costruzione a più livelli.	5
Figura 6: Esempio di caseggiato romano	6
Figura 7: Esempio di bagno babilonese.	6
Figura 8: Un bagno moderno per handicappati.	7
Figura 9: Esempio di costruzione araba (Granada)	8
Figura 10: Centro Pompidou a Parigi.	9
Figura 11: La città del futuro.	9
Figura 12: Esempio di casa solarizzata con collettori piani	10
Figura 13: Centro di ricerca di climatologia Jule Verne.	11
Figura 14: Esempio di impiantistica in un moderno edificio.	12
Figura 15: Esempio di canalizzazioni per la distribuzione dell'aria in un appartamento.	13
Figura 16: Livelli di radiazione solare sulla Terra	19
Figura 17: Guadagni solari netti sulla Terra secondo Simpson.	20
Figura 18: Temperature medie al livello del mare nel mese di gennaio.	23
Figura 19: Temperature medie a livello del mare nel mese di luglio.	23
Figura 20: Pressione atmosferica media al suolo nel mese di gennaio.	24
Figura 21: Pressione atmosferica media al suolo nel mese di luglio.	24
Figura 22: Distribuzione delle regioni climatiche secondo Köppen.	26
Figura 23	29
Figura 24 bis: Andamento della declinazione solare	29
Figura 25: Angoli fondamentali per l'irradiazione solare.	29
Figura 26: Radiazione solare fuori dell'atmosfera e al suolo.	36
Figura 27: Effetti della massa d'aria sulla radiazione al suolo	37
Figura 28: Emissione terrestre - atmosferica (curva a) e del corpo nero (curva b)	37
Figura 29: Scambi termici di una parete esterna soleggiata.	38
Figura 30: Andamento della temperatura aria-sole per $a=0.2$ e $a=0.9$ per un dato irraggiamento.	39
Figura 31: Temperatura aria-sole per $a=0.2$ e $a=0.9$ ed esposizione Sud, Est ed Ovest.	40
Figura 32: Percorso apparente del sole per alcuni giorni dell'anno	41
Figura 33: Diagramma eliadiadromico per latitudine di $38^\circ$	42
Figura 34: Determinazione delle ore di soleggiamento su una parete comunque orientata.	43
Figura 35 Determinazione della direzione solare proiettata su un piano orizzontale	44
Figura 36: Determinazione della direzione dei raggi solari proiettata su un piano verticale	45
Figura 37: Determinazione della traccia dell'ombra proiettata dal balcone sul piano orizzontale	46
Figura 38: Determinazione della traccia dell'ombra proiettata dal balcone sul piano verticale.	47
Figura 39: Radiazione solare in dicembre – gennaio – febbraio in $\text{kcal/m}^2$	48

Figura 40: Radiazione solare in primavera-autunno: Marzo – aprile – maggio – settembre – ottobre- novembre	48
Figura 41: Determinazione dell'energia solare incidente su una facciata esposta a NW, azimut 315°	49
Figura 42: Classificazione delle zone climatiche sulla Terra.	51
Figura 43: Regioni climatiche europee.	51
Figura 44: Località per le quali si hanno stazioni climatiche in Italia.	52
Figura 45: Irradiazione giornaliera media mensile (MJ/m <sup>2</sup> /giorno) a gennaio	1
Figura 46b: Irradiazione giornaliera media mensile (MJ/m <sup>2</sup> /giorno) a febbraio	1
Figura 47: Irradiazione giornaliera media mensile (MJ/m <sup>2</sup> /giorno) a marzo	2
Figura 48: Irradiazione giornaliera media mensile (MJ/m <sup>2</sup> /giorno) ad aprile	2
Figura 49: Irradiazione giornaliera media mensile (MJ/m <sup>2</sup> /giorno) a maggio	3
Figura 50: Irradiazione giornaliera media mensile (MJ/m <sup>2</sup> /giorno) a giugno	3
Figura 51: Irradiazione giornaliera media mensile (MJ/m <sup>2</sup> /giorno) a luglio	4
Figura 52: Irradiazione giornaliera media mensile (MJ/m <sup>2</sup> /giorno) ad agosto	4
Figura 53i: Irradiazione giornaliera media mensile (MJ/m <sup>2</sup> /giorno) a settembre	5
Figura 54: Irradiazione giornaliera media mensile (MJ/m <sup>2</sup> /giorno) ad ottobre	5
Figura 55: Irradiazione giornaliera media mensile (MJ/m <sup>2</sup> /giorno) a novembre	6
Figura 56: Irradiazione giornaliera media mensile (MJ/m <sup>2</sup> /giorno) a dicembre	6
Figura 57: Trasparenze storiche nella varie stagioni a Catania	8
Figura 58: Trasparenze in varie località	9
Figura 59: Analisi delle frequenze di soglia nelle varie stagioni a Catania	10
Figura 60: Frequenze di soglia storiche a Catania	10
Figura 61: Frequenze di soglia simulate a Catania	10
Figura 62: Analisi dei dati simulati - Frequenze di soglia nelle varie stagioni a Catania.	11
Figura 63: Funzioni di densità di probabilità della trasmittanza	13
Figura 64: Andamento del profilo di velocità del vento.	15
Figura 65: Rapporti di forma ottimali per le quattro zone climatiche.	20
Figura 66: Influenza dei rapporti di superficie e volume sui disperdimenti termici	20
Figura 67: Effetti del clima caldo torrido sulla densità urbana	21
Figura 68: Profili di velocità in zone urbane. Effetti provocati dagli edifici.	24
Figura 69: Effetti sul microclima provocati da edifici alti rispetto al tessuto urbano circostante	24
Figura 70: Effetti Venturi e di canalizzazione provocati dagli edifici	25
Figura 71: Circolazione dell'aria nei continenti. Brezze marine	26
Figura 72: Effetti degli edifici- Isole di Calore e Pozzi termici.	27
Figura 73: Formazione delle zone di sopra e sotto pressione	28
Figura 74: Effetti di schermatura provocati dagli edifici	29
Figura 75: Temperature medie mensili in alcune località della Sicilia	33
Figura 76: Rapporto fra uomo ed ambiente	40
<i>Figura 77: Contatto fra l'uomo e la natura</i>	41
<i>Figura 78: Schematizzazione di un sistema a guadagno diretto</i>	61
<i>Figura 79: Esempio di solarizzazione nella Biblioteca della facoltà di storia di Cambridge</i>	62
<i>Figura 80 Schema a guadagno solare indiretto.</i>	64

<i>Figura 81: Esempio di casa solare a guadagno diretto- Santa Fè – New Mexico</i>	65
<i>Figura 82: Sistemi a guadagno termico misto</i>	66
<i>Figura 83: Esempio di edificio estesamente vetrato – Garden Grove – California</i>	67
<i>Figura 84: Schema del camino del sistema a massa assorbitrice trascurabile</i>	68
<i>Figura 85: Particolare dell'assorbitore alettato</i>	69
<i>Figura 86: Particolare delle canalizzazioni dell'aria</i>	69
<i>Figura 87: Particolare di installazione del sistema Barra – Costantini</i>	70
<i>Figura 88: Fotografia di un prospetto con il sistema BC</i>	70
<i>Figura 89: Sistema BC in funzionamento invernale di giorno</i>	71
<i>Figura 90: Sistema BC in funzionamento invernale notturno per evitare l'inversione di flusso</i>	71
<i>Figura 91: Sistema BC in funzionamento estivo diurno con raffrescamento interno.</i>	72
<i>Figura 92: Sistema BC in funzionamento estivo notturno</i>	72
<i>Figura 93: Esempio di edificio solarizzato con impianti attivi. Scuola di Scoli Piceno</i>	73
<i>Figura 94: Esempio di sistema solare attivo</i>	74
<i>Figura 95: Insediamento di Mesa Verde in Colorado – Esterno e particolare del kiva.</i>	79
<i>Figura 96 : Funzionamento invernale ed estivo per Mesa Verde</i>	80
<i>Figura 97: Vista all'interno di Mesa Verde</i>	80
<i>Figura 98: Città di Ghardaia in Algeria – Tessuto urbano</i>	81
<i>Figura 99: Interno tipico delle abitazioni di Ghardaia</i>	82
<i>Figura 100: Sassi di Matera</i>	83
<i>Figura 101: I Dammusi di Pantelleria</i>	84
<i>Figura 102: Schema di funzionamento di un Dammuso di Pantelleria</i>	85
<i>Figura 103: Schematizzazione del Dammuso</i>	85
<i>Figura 104: Dammuso di Pantelleria</i>	85
<i>Figura 105: Effetti del vento e modificazioni apportate dagli edifici</i>	86
<i>Figura 106: Zone sopra e sotto vento</i>	87
<i>Figura 107: Effetti di canalizzazione e Venturi provocati dagli edifici</i>	89
<i>Figura 108: Uso di schermi naturali per ripararsi dal vento (Giappone)</i>	89
<i>Figura 109: Esempio di Torri Iraniane</i>	90
<i>Figura 110: Schema di funzionamento delle Torri Iraniane</i>	90
<i>Figura 111: Effetti delle Torri Iraniane</i>	91
<i>Figura 112: Pianta della Masseria equipaggiata con camino solare</i>	92
<i>Figura 113: prospetti ad ovest (sopra) e a sud (sotto) della Masseria.</i>	93
<i>Figura 114: Andamento della temperatura per l'ambiente 6</i>	94
<i>Figura 115: Andamento della temperatura per l'ambiente 5</i>	95
<i>Figura 116: Andamento della temperatura per l'ambiente</i>	95
<i>Figura 117: Andamenti delle temperature negli ambienti 4, 5 e 6 con il solo camino solare inserito</i>	95
<i>Figura 118: Schema di installazione di isolamento esterno a cappotto</i>	98
<i>Figura 119: Schema di posa dell'isolante interno mediante insufflazione di schiume nell'intercapedine</i>	99
<i>Figura 120: Schema di installazione di una parete ventilata</i>	100
<i>Figura 121: Schema di isolamento sull'estradosso del soffitto.</i>	102

*Figura 122: Esempio di tetto rovescio*