

# ENERGETICA DEL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTO

## 1- TEORIA DELL'INFORMAZIONE

L'adozione di nuove tecnologie non è implicitamente connessa alla conoscenza, infatti una tecnologia può essere conosciuta da tempo ma non adottata a causa di un ambiente (sociale, politico, economico, culturale) sfavorevole.

Le variazioni dell'entropia termodinamica di un sistema, legate alle irreversibilità dei processi, possono essere espresse come una misura della variazione di entropia negativa (neg-entropia) o informazione. Per i sistemi termodinamici le risorse sono flussi di neg-entropia.

Se si applica la teoria dell'informazione si nota che la sostenibilità energetica può essere misurata in termini di bassa entropia prodotta. Quindi si può utilizzare l'entropia per quantificare gli effetti di alcune soluzioni progettuali di intervento.

Per sostenibilità energetica quindi intendiamo la crescita di informazione complessiva di un sistema dovuto all'adattamento del contenuto informativo di una fonte energetica, al contenuto informativo richiesto dalla sua utilizzazione finale.

La valutazione degli interventi o mix di soluzioni progettuali può essere calcolata con l'ENTROPIA DI SHANNON per ciascuna interazione tra attori (singoli individui, gruppi di persone, istituzioni, utilizzatori...), azioni e fattori. La valutazione viene fatta con la tecnica matriciale ESM, dove ad ogni parametro (azione, attore e fattore) viene associato un peso (che possono anche essere indicatori termodinamici).

Tramite il secondo principio della termodinamica sono stati individuati due parametri adimensionali:

$$ety = \frac{\Delta S_b}{\Delta S_s} \quad ety_F = \frac{\Delta S'_b}{\Delta S_s}$$

Dove  $\Delta S_b$  è la variazione di entropia dovuta alle dispersioni termiche,  $\Delta S_s$  è la variazione di entropia dovuta al guadagno energetico solare,  $\Delta S'_b$  è la variazione di entropia dovuto al sistema di riscaldamento. Questi parametri sono assunti come pesi per le interazioni tra fattori e azioni. Tramite una serie di relazioni che riguardano la Teoria dell'informazione di Shannon, si possono calcolare i valori di Entropia di tutte le azioni e Entropia di tutti i fattori.

Un parametro molto utile come strumento decisionale (soprattutto in ambito energetico) è la Ridondanza R:

$$R = 1 - \frac{H(i,j)}{H_0}$$

Dove  $H(i,j)$  è la probabilità dell'informazione considerata, e  $H_0$  è il valore ottenuto quando tutti i fattori sono equi-probabili.

Un'elevata ridondanza implica un alto valore di incertezza nelle interazioni quindi una bassa probabilità di attuazione.

## 2- BENESSERE TERMO-IGROMETRICO

Il Benessere non è collettivo, cioè corrisponde al soddisfacimento psicofisico di un singolo individuo. Inoltre, il Benessere è globale e non singolare, infatti si sovrappongono diverse sensazioni sensoriali che influiscono l'una sull'altra. Infatti, abbiamo:

- benessere termo-igrometrico, lo stato di NEUTRALITÀ TERMICA, dove il soggetto non sente né caldo né freddo.
- benessere respiratorio olfattivo, lo stato di soddisfazione di un individuo nei confronti dell'aria che respira.
- benessere visivo-illuminotecnico, stato in cui l'individuo può svolgere nel migliore dei modi diversi compiti.
- benessere acustico, cioè in presenza di un campo di pressione sonora, l'individuo dichiara di trovarsi in una situazione di benessere.

### IL BENESSERE TERMICO

Il benessere termico è una condizione mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico.

I parametri, che variando, influenzano il benessere termico sono (5): temperatura a bulbo secco dell'aria, temperatura media radiante, umidità dell'aria e la velocità media relativa dell'aria (il cui controllo è demandato al progettista) e attività fisica svolta e resistenza termica del vestiario (il cui controllo è demandato al soggetto).

TEMPERATURA A BULBO SECCO ( $t_{BS}$ ) E UMIDO ( $t_{BU}$ ): si misurano con uno psicrometro, rispettivamente in corrispondenza del bulbo secco e del bulbo umido. Nel diagramma psicrometrico la scala delle temperature a bulbo secco è indicata sull'asse orizzontale, mentre la temperatura di bulbo umido nel diagramma psicrometrico, si determina conoscendo la temperatura di bulbo secco e la temperatura di saturazione adiabatica, infatti prima si ricava prima l'umidità molare e quindi la temperatura di bulbo umido.

**TEMPERATURA MEDIA RADIANTE:** è la temperatura di un ambiente fittizio, caratterizzato da pareti aventi tutte la stessa temperatura, nel quale un soggetto scambierebbe per irraggiamento lo stesso flusso termico che scambia nell'ambiente reale in cui ogni parete ha una propria temperatura. Lo scambio reale per irraggiamento si ricava conoscendo l'emissività della persona  $\epsilon_p$  (circa 0.98), la sua temperatura superficiale  $T_{ce}$  e la sua area efficace  $A_{eff}$ .

Noti i fattori di vista  $F_{p-i}$  (ricavabili o tramite formula o tramite grafici) e nota a temperatura dell'involucro  $T_i$ , si ha

$$T_{mr}^4 = \sum F_{p-i} T_i^4$$

**TEMPERATURA OPERANTE:** è la temperatura uniforme di una cavità in cui il soggetto scambierebbe per convezione e irraggiamento la stessa energia che effettivamente cambia con l'ambiente reale non uniforme.

Numericamente è la media pesata della temperatura dell'aria e di quella media radiante, in cui le conduttanze unitarie radiative e convettive sono i coefficienti di peso:

$$T_o = \frac{\alpha_c T_a + \alpha_r T_{mr}}{\alpha_c + \alpha_r}$$

Ma in prima approssimazione, per gli ambienti moderati, la posso stimare come la media aritmetica delle due temperature:

$$T_o = \frac{T_a + T_{mr}}{2}$$

### **OMEOTERMIA DEL CORPO UMANO**

L'omeotermia del corpo umano è la necessità di mantenere costante la temperatura del nucleo del corpo a circa 37°C entro il ristretto margine di mezzo grado. L'energia termica prodotta dal corpo umano dalle reazioni chimiche, da luogo al flusso metabolico e viene espresso in un'unità di misura incoerente, il **met**:

$$1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$$

### **IL BILANCIO ENERGETICO SUL CORPO UMANO**

Il corpo umano può essere considerato come un sistema aperto in cui è possibile fare un bilancio energetico.

$$S = M - W - E_{res} - C_{res} - E - C - R - K$$

S = accumulo di energia

M = potenza sviluppata dall'attività metabolica

W = potenza meccanica dissipata per attività lavorativa

E = potenza termica per evaporazione nella traspirazione

$E_{res}$  = potenza termica per evaporazione nella respirazione

$C_{res}$  = potenza termica scambiata per convezione nella respirazione

C = potenza termica scambiata per convezione

R = potenza termica scambiata per irraggiamento

K = potenza termica scambiata per conduzione

L'organismo tende a permanere in condizioni di equilibrio omeotermo, cioè **S = 0**.

**POTENZA ATTIVITÀ METABOLICA M:** L'attività metabolica dell'organismo può essere ricondotta a:

- attività **metabolica basale** (necessaria al mantenimento dell'attività cellulare e delle funzioni vitali)
- attività **metabolica a riposo** (comprende quella basale e altre funzioni come quella digestiva e posturale)
- attività **metabolica lavorativa** (legata al lavoro compiuto).

La valutazione del metabolismo energetico è espressa in met, e alcuni valori sono indicati nella tabella della ISO8996.

**AREA SUPERFICIE CORPOREA  $A_b$ :** per calcolarla si usano relazioni sperimentali, una delle quali è quella di DuBois:

$$A_b = 0.202 \cdot m_b^{0.425} \cdot h_b^{0.725}$$

$m_b$  = massa in kg     $h_b$  = altezza in metri L'uomo standard ha  $A_b = 1.80 \text{ m}^2$

**FLUSSO TERMICO CONDUTTIVO, CONVETTIVO E RADIATIVO K, C e R:** il flusso termico convettivo e radiativo dipendono dalla resistenza termica superficiale e dalla differenza di temperatura tra la pelle, temperatura media radiale e temperatura dell'aria. I meccanismi di scambio termico sono:

- conduzione, tra pelle e vestiario e ambiente.
- convezione, tra vestiario e aria circostante.
- irraggiamento, tra vestiario e pareti circostanti.

dove  $h_c$  = coeff di convezione

$h_r$  = coeff radiativo

$f_{cl}$  =  $A_{cl}/A_b$  fattore di ricevimento corporeo

$T_a$  = temperatura dell'aria

$T_{mr}$  = temperatura media radiante.

$$C = A_b \cdot f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)$$

$$R = A_b \cdot f_{cl} \cdot h_r \cdot (t_{cl} - t_{mr})$$

Combinando le due relazioni ottengo:

$$C + R = A_b \cdot f_{cl} \cdot (h_c + h_r) \cdot (t_{cl} - t_{op})$$

Con  $t_{op}$  temperatura operante

$$t_{op} = \frac{t_a \cdot h_c + t_{mr} \cdot h_r}{h_c + h_r}$$

In condizioni stazionarie la potenza termica (C+R) scambiata per convezione e irraggiamento dalla superficie esterna è uguale a quella scambiata per conduzione tra pelle e abito:

$$f_{cl} \cdot (h_c + h_r) \cdot (t_{cl} - t_{op}) = \frac{(t_{skin} - t_{cl})}{0.155 I_{cl}}$$

La resistenza termica unitaria del vestiario  $I_{cl}$  viene espressa con un'unità di misura incoerente della **clo** ( $1 clo = 0.155 \text{Km}^2/\text{W}$ )

**FLUSSO TERMICO E:** lo scambio termico latente tramite la pelle è innescato dall'evaporazione del sottile film liquido, dovuto alla sudorazione, sia alla traspirazione del vapore acqueo tramite i pori della pelle. La potenza evaporativa E può essere calcolata:

$$E = w \cdot \frac{(p_{skin,s} - p_a)}{R_{e,T}}$$

w = frazione di pelle bagnata

$p_{skin,s}$  = pressione di saturazione del vapore acqueo alla temperatura della pelle

$p_a$  = pressione parziale del vapore acqueo nell'aria

$R_{e,T}$  = resistenza totale degli abiti allo scambio termico evaporativo.

**FLUSSO TERMICO  $C_{res}$  e  $E_{res}$ :** la differenza di entalpia tra la portata di aria ispirata ed espirata, porta ad una perdita di calore sensibile pari a

$$C_{res} = m_{res} \cdot c_{p,a} \cdot (t_{es} - t_a)$$

$$E_{res} = m_{res} \cdot \Delta h_w \cdot (x_{es} - x_a)$$

sapendo che  $\eta = W/M$  e  $S=0$ , posso riscrivere l'equazione del bilancio per il corpo umano:

$$M \cdot (1 - \eta) = C + R + E$$

I singoli termini vengono espressi in forma estesa abbiamo una funzione di 9 incognite:  $f(M, \eta, I_{cl}, t_{mr}, t_a, UR_a, v_a, t_{skin}, E_{tot})$

Fanger su base statistica e in condizioni di benessere, trovò che la  $t_{skin}$  e la  $E_{tot}$ , sono dipendenti dagli altri fattori, cioè:

$$t_{skin} = f\left(\frac{M}{A_b}, \eta\right) \quad E_{tot} = f\left(\frac{M}{A_b}, \eta\right)$$

quindi ottenne l'EQUAZIONE DEL BENESSERE DI FANGER

$$f(M/A_b, \eta, I_{cl}, t_{mr}, t_a, UR_a, v_a)$$

### **L'EQUAZIONE DEL BENESSERE DI FANGER**

$$f(M/A_b, \eta, I_{cl}, t_{mr}, t_a, UR_a, v_a)$$

L'equazione di Fanger lega tra loro 6 variabili che assicurino la condizione di benessere, anche se le possibili combinazioni sono infinite. Le variabili in gioco nell'equazione sono: attività svolta, rendimento, resistenza termica del vestiario, temperatura media radiante, temperatura dell'aria, umidità relativa e velocità dell'aria. L'eq di Fanger, può essere risolta anche in forma grafica, tramite diagrammi. Un possibile diagramma, per un livello assegnato di attività e di resistenza termica del vestiario, valuta le condizioni di benessere al variare di UR,  $v_a$ ,  $t_a$  (che è supposta pari a la  $T_{mr}$ ); da questo diagramma si nota che nelle condizioni di benessere l'influenza dell'umidità relativi è molto bassa. Un altro diagramma, detto diagramma del benessere di Fanger, sfrutta le correlazioni tra  $v_a$  e  $t_a$ , e si nota che la temperatura dell'ambiente non è influenzata dalla  $v_a$ , per ridotte velocità, dove lo scambio termico avviene in condizioni di convezione naturale.

### **CONFORT TERMICO-NORMATIVA VIGENTE DI RIFERIMENTO**

- UNI EN ISO 7730:1997, per gli ambienti termici moderati e la determinazione di PMV e PPD
- ISO 9920:1995, per la stima dell'isolamento termico e la resistenza evaporata dell'abbigliamento
- D.L.vo 626/1994, per il miglioramento della salute e sicurezza negli ambienti di lavoro
- Dir. EU 89/106 e DPR 246/1993, direttiva europea sui materiali da costruzione e il suo regolamento di attuazione.

Il Benessere Termico (BT o S), in condizioni di omeotermia deve essere  $BT=0$ . Quando il  $BT>0$  la temperatura corporea aumenta, se  $BT<0$ , la temperatura corporea diminuisce. Il corpo umano per cercare di mantenere la neutralità termica, attua dei meccanismi di compenso, che permettono di aumentare o diminuire la quota di calore che viene ceduta.

Per Disconfort termico si intendono quelle condizioni che danno luogo alla sensazione di caldo o di freddo; si parla di Stress termico quando l'organismo non riesce più a mantenere costante la temperatura interna.

### **INDICI DI SINTETICI DI CONFORT GLOBALE O DI SENSAZIONE**

Il documento fondamentale per la valutazione del confort microclimatico è la norma tecnica UNI EN ISO 7730; la procedura descritta in questa norma si fonda sulla relazione biunivoca fra il bilancio energetico del corpo umano e sensazione termica, con associato il confort o il disconfort. In prima approssimazione i termini che compaiono nell'eq del bilancio energetico del corpo umano, possono essere presi in funzione

di 6 parametri, di cui 4 sono quantità fisiche, mentre due sono specifiche caratteristiche dell'individuo e non identificati come parametri individuali.

Si utilizza una quantità PMV (voto medio previsto), che è caratterizzata da una forte correlazione statistica con S (accumulo di energia, visto nel bilancio). Il PMV esprime il giudizio medio di qualità termica relativo alle condizioni microclimatiche in esame, espresso in una scala termica da +3 (molto caldo) a -3 (molto freddo). Il PMV è il miglior indice descrittore statistico del confort microclimatico negli ambienti moderati, però, poiché si tratta di un valore medio, sottintende l'esistenza di una variabilità individuale, infatti per un gruppo di individui non è possibile individuare una situazione ideale valida per tutti. All'indice PMV, risulta direttamente associato il PPD (percentuale di soggetti insoddisfatti).

Gli indici PMV e PPD sono noti come **indici di Fanger**. Questi due indici sono strettamente correlati, infatti si nota che con un  $PMV = 0$ , si ha una percentuale di insoddisfatti del 5%, quindi un ambiente viene definito accettabile per valori di PMV tra -0,5 e +0,5 e con un PPD minore del 10%.

Attualmente non esistono norme precise che prevedano limiti fissi, ma alcune norme UNI EN forniscono elementi di buona tecnica. Per esempio:

- ISO 7730, su ambienti moderati. La norma qualifica la tolleranza con la quale le condizioni non stazionarie possono essere valutate, cioè in caso di fluttuazioni di temperatura, la variazione di picco deve essere inferiore a  $1^{\circ}C$ , e in caso di derive termiche, in gradi non deve superare i  $2^{\circ}C/h$ . Inoltre, l'uso di questi è raccomandato solo quando il valore di PMV risulta compreso tra -2 e +2.
- ASHRAE/ANSI 55-92, che fornisce i requisiti del microclima per il benessere termico delle persone.
- ASHRAE/ANSI 62-89, che fornisce indicazioni sull'apporto di aria del rinnovo e purezza dell'aria immessa.

### **INDICI DI DISCONFORT LOCALE O DI TEMPERATURA**

Numerosi fattori di disconfort locale sono legati alla disomogeneità nel riscaldamento o raffreddamento del corpo umano, in particolare in presenza di correnti d'aria, gradiente verticale di temperature, pavimento con temperatura eccessivamente alta o basse e asimmetria radiante. Questi fattori di disturbo vengono valutati mediante indici di disconfort e la normativa UNI EN ISO 7730 contiene gli intervalli di accettabilità per questi 4 indici, con la relativa percentuale di insoddisfatti massima raccomandata.

## **3- CERTIFICAZIONE ENERGETICA**

### **EFFICACIA**

È il grado di raggiungimento di un obiettivo. Pone in relazione gli obiettivi prefissati con l'accuratezza e completezza dei risultati raggiunti.

### **EFFICIENZA**

È la capacità di fruttare l'energia ad esso fornita per soddisfare il fabbisogno richiesto. Minori sono i consumi relativi al soddisfacimento di un determinato fabbisogno, maggiore è l'efficienza energetica.

### **CERTIFICAZIONE ENERGETICA**

La certificazione energetica degli edifici è una procedura di valutazione volta a promuovere il miglioramento del rendimento energetico degli edifici in termini di efficienza energetica, grazie all'informazione fornita ai proprietari e utilizzatori.

La procedura di certificazione energetica si basa su:

- La Valutazione energetica dell'edificio
- La Definizione dei livelli di prestazione energetica
- La Classificazione energetica dell'edificio
- E la redazione dell'Attestato di Certificazione Energetica

Il procedimento generale di calcolo è il seguente: Definizione dello spazio e delle zone riscaldate e non; Calcolo dei coefficienti di dispersione termica; Definizione della temperatura di progetto; Definizione della durata della stagione di riscaldamento; Calcolare le dispersioni termiche Q; Calcolo degli apporti gratuiti di calore (apporti interni e solari); Calcolo del fattore di utilizzazione; Calcolo del fabbisogno energetico annuale per il riscaldamento e la produzione di a.c.s; Calcolo del contributo delle fonti rinnovabili; Calcolo del fabbisogno energetico necessario considerando il rendimento del generatore.

### **ISOLAMENTO TERMICO**

I principali parametri caratteristici dell'isolamento termico sono:

- Fattori di resistenza alla diffusione del vapore acqueo (indica quanto la resistenza al passaggio di vapore di un materiale è superiore a quella dell'aria)
- Resistenza alla diffusione del vapore
- Permeabilità al vapore
- Massa volumica
- Calore specifico
- Conducibilità termica (per alcuni materiali dipende dalla temperatura, o dalla pressione per i gas o dalla loro porosità)

Il metodo di calcolo per la resistenza termica e la trasmittanza termica è fornito dalla EN ISO 6946, mentre i singoli dati termici dei materiali (se non indicati dal produttore) sono reperibili nella EN ISO 10456.

Il fabbisogno di energia di un edificio risulta essere:

$$Q_h = (Q_T + Q_V) - \eta(Q_i + Q_s)$$

Dove  $Q_H$  è il fabbisogno totale di energia,  $Q_T$  sono le dispersioni per trasmissione,  $Q_V$  sono le dispersioni per ventilazione,  $Q_i$  sono gli apporti interni,  $Q_s$  sono gli apporti solari e  $\eta$  è il fattore di utilizzazione.

### **PRESTAZIONE E EFFICIENZA ENERGETICA**

Il calcolo dell'indice di prestazione energetica risulta essere:

$$EP_i = \frac{Q}{S_{utile}} \quad \text{per gli edifici residenziali}$$

$$EP_i = \frac{Q}{S_{utile}} \quad \text{per tutti gli altri edifici}$$

La prestazione energetica complessiva dell'edificio è espressa attraverso l'indice di prestazione energetica globale:

$$EP_{gl} = EP_i + EP_{acs} + EP_e + EP_{ill}$$

Dove  $EP_i$  è l'indice che riguarda la climatizzazione invernale,  $EP_{acs}$  riguarda la produzione di acqua calda sanitaria,  $EP_e$  la climatizzazione estiva e  $EP_{ill}$  riguarda l'illuminazione artificiale.

La certificazione energetica è avviata limitando la valutazione dell'indice di prestazione EP ai servizi di climatizzazione invernale e produzione di acqua calda sanitaria, quindi:

$$EP_{gl} = EP_i + EP_{acs}$$

A questi singoli valori si associano delle classi che poi confluiscono nella classe globale, che ci dà la prestazione energetica globale dell'edificio.

## **4- TERMOFISICA EDIFICIO**

La climatizzazione degli edifici, cioè l'inserimento di impianti, capace di mantenere le condizioni di benessere per gli occupanti, comporta la conoscenza della Termofisica dell'edificio. Per poter dimensionare gli impianti, occorre conoscere il comportamento termico degli edifici. Le condizioni climatiche esterne non sono mai stabili durante il giorno, ma variano continuamente; lo studio del comportamento termico degli edifici parte proprio da queste considerazioni e valuta le condizioni transitorie in risposta alle variazioni climatologiche esterne.

### **COMPORTEMENTO IN REGIME STAZIONARIO DEGLI EDIFICI**

In prima approssimazione, possiamo approssimare che l'edificio sia in condizioni stazionarie. Le UNI 11300 ci forniscono le modalità e le verifiche da effettuare in regime stazionario, per far sì di rispettare la legge 10/91. Il calcolo viene effettuato con un calcolo semi-stazionario, cioè fatto con una media mensile dei dati.

La POTENZA DI PICCO è la potenza massima richiesta all'impianto per avere determinate condizioni (condizioni microclimatiche di progetto). Per calcolare la potenza di picco, prendo la temperatura di progetto ( $0^\circ$  per Firenze) e la temperatura interna media da mantenere ( $20^\circ$  con uno scarto di  $2^\circ$ ), quindi il  $\Delta T$  risulta essere circa  $20^\circ$ . La potenza di picco la raggiungo solo pochi giorni l'anno e mi aiuta a dimensionare la misura dell'impianto (es. della caldaia). In regime stazionario, il flusso termico trasmesso da 2 fluidi separati da una parete composita è dato da:

$$Q = U \cdot S \cdot \Delta T \quad \text{dove } U \text{ è la trasmittanza termica. Questa relazione vale solo in regime stazionario}$$

### **TRANSITORIO NEGLI EDIFICI**

Una volta fissati alcuni parametri, come area climatica, posizione e destinazione d'uso, ciò che qualifica la prestazione termica dell'edificio è in massima parte il comportamento dell'involucro murario.

Un caso molto importante per i casi pratici è quando si applica una forzante (temperatura) variabile in modo periodico ad uno strato piano semifinito; si pone che la variazione di temperatura sia sinusoidale. Qualunque forzante periodica può essere scomposta in una serie di Fourier, che me la scompone in termini di seno e coseno, e la sua soluzione generale è data dalla somma delle soluzioni parziali.

Le pareti esterne possono essere considerate strati di spessore tale da considerare valida l'ipotesi di spazio semifinito, l'onda termica si può assimilare alla variazione sinusoidale. L'ampiezza d'onda, passando per la parete, subisce variazione, per cui pareti con grandi spessori e con materiali non conduttori, sfasano molto. Viceversa, una parete con poca massa e con materiali conduttori sfasa poco.

### **TRANSITORIO DI RISCALDAMENTO E RAFFREDDAMENTO DI UN CORPO**

Per meglio comprendere gli effetti del clima esterno per il transitorio di un edificio, si riporta il caso del raffreddamento di un corpo a resistenza termica trascurabile che ha una temperatura iniziale  $T_i$ , che è immerso in un fluido a temperatura  $T_a$ :

$$T = T_a + (T_i - T_a)e^{-\frac{hA}{mc}\tau}$$

$\tau$  = costante di tempo  $m$  = massa,  $c$  = capacità termica e  $h$  = resistenza termica.

Maggiore è la sua capacità termica minore sarà il tempo di riscaldamento e/o raffreddamento e quindi minori saranno le oscillazioni termiche. La costante di tempo la posso scrivere come  $\tau = \left(\frac{V}{A}\right) \cdot \left(\frac{\rho c}{h}\right)$

l'ultimo membro ci dice che la costante di tempo è tanto maggiore quanto maggiore è, a parità di  $(\rho c/h)$ ,  $V/A$  cioè il rapporto di forma dell'oggetto. Architettonicamente sono preferibili le forme più chiuse e compatte rispetto a quelle aperte e movimentate che comportano una maggiore superficie esterna.

### **PARAMETRI CHE INFLUENZANO IL CARICO TERMICO DEGLI EDIFICI**

Per lo studio della termofisica dell'edificio, solitamente si fa riferimento a: la temperatura Aria-Sole, le qualità termofisiche delle finiture, le intercapedini d'aria, le pareti ventilate e opache interne, gli effetti di massa delle pareti e superficiali, l'ottica dei vetri, i serramenti e gli infissi e l'effetto serra.

**LA TEMPERATURA ARIA SOLE:** La Temperatura Aria-Sole è una temperatura fittizia che tiene conto sia dello scambio termico (conduttivo e convettivo) con l'aria esterna, sia che l'irraggiamento solare ricevuto. La temperatura aria-sole è quella temperatura dell'aria esterna che apporterebbe sulla superficie esterna di una parete lo stesso flusso termico che si ha nella realtà per effetto della radiazione solare incidente e della convezione e conduzione con l'aria esterna.

Nei calcoli tecnici è lecito usare l'espressione approssimata:

$$T_{as} = T_e + \frac{aI}{h_{oe}}$$

dove  $a$  è il coefficiente di assorbimento della parete

$I$  è la radiazione solare incidente

$h_{oe}$  è la resistenza termica della parete.

### **QUALITÀ DELLE FINITURE SUPERFICIALI**

Sia la scelta del materiale, sia la scelta del colore, giocano un ruolo fondamentale sul comportamento termofisico della parete.

**COLORI CHIARI:** hanno un fattore di assorbimento piccolo (0,15/0,30), la radiazione solare viene assorbita e viene riemessa per radiazione (radiosità, cioè la capacità del materiale di riflettere la radiazione solare) soprattutto nell'infrarosso con un'emissività pari a 0,9, quindi la temperatura superficiale esterna sale di poco.

**PARETE RICOPERTA DI MATERIALE RIFLETTENTE, ALLUMINIO O VERNICE DI ALLUMINIO:** hanno un fattore di assorbimento (cioè la capacità del materiale di assorbire energia) molto basso (0,1/0,25) e per l'infrarosso è 0,4/0,6. La superficie esterna assorbe poco energia solare e ne riemette altrettanto poca, e ne consegue un leggero aumento della temperatura superficiale.

**PARETE RICOPERTA DA METALLI GENERICI:** hanno un fattore di assorbimento maggiore dell'alluminio, ma nel campo dell'infrarosso hanno un'emissività bassa, per cui la radiazione solare porta ad un incremento della parete maggiore che con l'alluminio.

### **PARETI CON INTERCAPEDINE D'ARIA**

Sono spesso utilizzate pareti esterne con intercapedini d'aria, cioè la successione degli strati viene interrotta da spazi lasciati con aria interna.

**INTERCAPEDINE D'ARIA CON CONVEZIONE INTERNA:** quando l'intercapedine ha uno spessore maggiore a 2 cm, si può avere convezione interna, quindi il calore viene trasmesso sia per convezione dell'aria sia per irraggiamento fra le facce contrapposte degli strati.

**INTERCAPEDINE D'ARIA SENZA CONVEZIONE INTERNA:** sotto ai 2 cm di spessore si ha solo conduzione termica, essendo il coefficiente conduttivo dell'aria molto basso, il termine convettivo è molto basso.

### **PARETI VENTILATE**

Il principio delle facciate ventilate a doppia pelle è quello di posizionare i sistemi di schermatura fra due spessori vetrati intercettando nella cavità l'irraggiamento solare. L'energia che si accumula nella cavità viene estratta con la ventilazione e recuperata nel periodo invernale o semplicemente espulsa durante la stagione estiva, riducendo la potenza a carico dell'impianto di climatizzazione.

**ACTIVE WALL:** ha un vetro-camera esterno, un vetro singolo interno, schermature solari nella cavità, ha un'immissione di aria dalla base della facciata e un'estrazione della sommità mediante un impianto di condizionamento.

**INTERACTIVE WALL:** ha un vetro singolo esterno, un vetro-camera interno, una schermatura solare nell'intercapedine, una ventilazione forzata e un'estrazione della sommità dell'intercapedine.

**FACCIATA A VENTILAZIONE NATURALE:** ha una protezione con sistemi di schermatura, e ha la ventilazione naturale (indicata per i climi del nord-Europa).

### **PARETI TRASPARENTI**

Le pareti trasparenti sono superfici vetrate che, oltre a piacevoli effetti visivi, producono anche importanti effetti sul comportamento termico dell'edificio.

Il vetro è un materiale solido trasparente alla luce solare ma non alle radiazioni infrarosse (la radiazione che incide sul vetro per l'8% è riflessa, per il 9% è assorbita e per il rimanente 83% è trasmessa agli ambienti interni).

L'effetto serra negli edifici è generato dalla non simmetrica trasparenza dei vetri, infatti lascia passare quasi tutta la totalità della radiazione solare ma impedisce alla radiazione infrarossa provenire dall'interno di passare.

## **PROBLEMI IGROMETRICI DEGLI EDIFICI**

I problemi igrometrici hanno uno sviluppo più lento nel tempo rispetto ai fenomeni termici, anche se vi è un'analogia tra distribuzione della temperatura e pressione parziale. Il trasporto di vapore è determinato da differenze di pressione del vapore (non si prendono in considerazione la risalita capillare...). La produzione di vapore in un ambiente è causata sia dalla presenza degli abitanti, sia dalle loro attività (cucinare, igiene personale, lavaggio...).

## **BILANCIO IGROMETRICO DI UN AMBIENTE**

$$\Delta P_v = \frac{G}{nV} Rv T$$

dove  $\Delta P_v$  è la differenza tra pressione del vapore interna e pressione del vapore esterna, G è la quantità di vapore, V è il volume dell'ambiente, n è il numero di ricambi.

## **LA LEGGE DI FICK**

Due specie chimiche A e B, non reagenti fra loro, possono migrare l'una rispetto all'altra nel tempo, e questo è dato dalla differenza di frazione molare, cioè il gradiente di concentrazione, cioè la differenza di pressione parziale.

Se A è immobile, assimilandolo alla parete, e B migra, assimilandolo all'aria; B migra verso A per gradinate di concentrazione tra la parte a destra di A e la parte alla sua sinistra.

Si può applicare la legge di Fick anche alle pareti per via grafica; la legge è valida se il mezzo è omogeneo e in condizioni stazionarie o semi-stazionarie (altrimenti uso il CFD)

La pressione parziale del vapore è il prodotto dell'umidità relativa per la pressione di saturazione.

Per evitare la formazione di condensa, si deve avere che la pressione di saturazione sia maggiore della pressione di vapore

(rivedere formule fisica tecnica per pressione di saturazione, pressione di vapore, entalpia, entalpia dell'acqua, cp...)

## **4-BIS IMPIANTI TERMOTECNICI**

Gli impianti di climatizzazione possono essere diversi a seconda della destinazione d'uso, del flusso utilizzato e dal costo e qualità che si desiderano avere. Gli impianti di riscaldamento/raffrescamento sono composti da 3 sezioni fondamentali: Produzione di energia, Trasporto di energia, Scambio di energia e Controllo.

## **GENERATORI TERMICI**

**CALDAIE A MODULAZIONE DI FIAMMA:** In queste caldaie si agisce sul bruciatore modulandone la potenza in vari modi:

- Modulazione in regime monostadio di tipo on-off
- Regime bi-stadio 50-100%
- Regime modulante fra 50-100

**CALDAIE A CONDENSAZIONE:** si recupera il calore latente del vapore acqueo contenuto nei fumi. Questo meccanismo consente di abbassare la temperatura dei fumi a 50-70 °C recuperando il calore latente di condensazione dell'acqua. Le caldaie a condensazione sono sempre dotate di ventilatore di estrazione dei fumi per poter vincere le resistenze fluidodinamiche create dal condensatore e migliorarne il rendimento.

**CALDAIE A TEMPERATURA SCORREVOLE:** in cui la temperatura di mandata è regolata in funzione del carico dell'impianto; hanno un elevato rendimento medio stagionale. Gli elementi scaldanti non sono a diretto contatto con i fumi in modo da evitare la condensazione.

**CALDAIA A PIÙ PASSAGGI DI FUMI:** si ottimizzano gli scambi convettivi dei fumi, ma anche la fase di inversione che viene realizzata non più in camera di combustione ma in un volume diverso posto al disopra di questa.

## **IMPIANTI A TUTTA ARIA**

In questo tipo di impianto il controllo di tutte le grandezze microclimatiche è effettuato mediante l'immissione di aria

Questi impianti si dividono in:

- **IMPIANTI A PORTATA COSTANTE,** sono sistemi semplici dove si fa variare la temperatura dell'aria immessa; possono lavorare anche in regime di Free Cooling.
- **IMPIANTI A PORTATA VARIABILE (VAV),** sono sistemi che richiedono un trattamento di portate d'aria ridotte; la portata è regolata da un ventilatore che ha il numero di giri regolabile.

## **IMPIANTI ARIA-ACQUA**

Questi sistemi hanno un ingombro minore per quanto riguarda i canali di distribuzione. Ma occorre fare attenzione se siamo in presenza di elevati carichi latenti.

Questi impianti si dividono in:

- VENTILCONVETTORI, si impone all'aria in uscita valori costanti di temperatura e umidità relativa. La ventola di distribuzione può essere rumorosa e necessita di un'accurata regolazione e manutenzione.
- TRAVI FREDDE, sono in grado di raffreddare e riscaldare un ambiente controllando il ricambio d'aria e l'umidità, ma hanno una scarsa capacità di contrastare gli elevati carichi latenti. Possono essere ATTIVE (ha un sistema di mandata e ripresa dell'aria) o PASSIVE (non ha un sistema di mandata e ripresa dell'aria, ma sfrutta la naturale circolazione dell'aria).
- INDUZIONE
- PANNELLI RADIANTI

### **CENTRALI DI TRATTAMENTO DELL'ARIA: UTA**

L'unità di trattamento aria (UTA) è una macchina complessa che può essere assemblata in base alle caratteristiche del progetto, ed è costituita da un grosso cassonetto dove sono presenti varie sezioni:

- Filtro
- Batteria di riscaldamento, aumenta la temperatura mantenendo l'umidità assoluta costante
- Batteria di raffreddamento, raffredda l'aria in ingresso e la deumidifica
- Sezione umidificante
- Sezione di post-riscaldamento
- Sezione di lavaggio
- Sezione ventilante

## **5- EDIFICI STORICI**

Parlare di efficienza energetica in edifici storici è molto difficile, in quanto spesso hanno cambiato destinazione d'uso rispetto a quella storica. Per trattare di edifici storici è molto importante conoscere i vari richiami normativi, le tecniche costruttive storiche e gli strumenti e le procedure di certificazione. Alcune linee guida sul miglioramento del comportamento energetico degli edifici storici ce lo fornisce il MIBAC (Ministero dei Beni e Attività Culturali).

### **VINCOLI PER I BENI PUBBLICI**

I beni proprietà dello stato (regioni, ecc....) realizzati da più di 70 anni sono sottoposti a tutela.

Se il soggetto pubblico vuole porre in vendita l'immobile, e sovrintendenze devono verificare la sussistenza dell'interesse culturale dei beni con un iter che può durare al massimo 120 giorni.

Sui beni esistono anche dei vincoli indiretti e riguardano tutti i beni che si trovano nell'immediate vicinanze del bene sotto vincolo diretto.

### **SOSTENIBILITÀ**

REFURBISHMENT: adeguamento rivolto all'involucro

RETROFITTING: adeguamento rivolto all'impianto

La sostenibilità energetica del patrimonio culturale si pone di migliorare le caratteristiche termiche dell'edificio, compatibilmente con la conservazione dei valori materiali e costruttivi e dell'autenticità del costruito.

Per conoscere il comportamento termofisico di un edificio storico si devono osservare:

- Inerzia termica
- Traspirazione al vapore
- Ventilazione naturale

## **6- FONTI RINNOVABILI**

Le fonti rinnovabili sono caratterizzate da:

- basso impatto ambientale: le emissioni di gas-serra e di inquinanti sono contenute, ma resta da valutare l'impatto paesaggistico
- inesauribilità

Le principali fonti rinnovabili sono:

- **SOLARE TERMICO**: consiste nella conversione dell'energia solare in riscaldamento dell'acqua o dell'aria nell'utilizzo domestico e produttivo. L'elemento fondamentale è il Collettore Solare Termico che è una copertura trasparente con una piastra assorbente. Questo tipo di impianto si divide in:
  - A Bassa Temperatura: il pannello solare riscalda un liquido o l'aria per produrre acqua calda o refrigerare gli edifici (raggiungono temperature massime di 100°C).
  - A Media Temperatura: sono utilizzati per processi industriali e prendono il nome di forni solari (raggiungono temperature di 250°C). Servono per generare vapore per impianti di potenza.
- **SOLARE FOTOVOLTAICO**: la tecnologia fotovoltaica consente di trasformare direttamente la luce solare in energia elettrica. Il Sistema Fotovoltaico è composto dal Campo Fotovoltaico più i componenti meccanici, elettrici e elettronici necessari. A sua volta il Campo Fotovoltaico è

composto da una serie di Stringhe connesse in parallelo. Le Stringhe sono composte da più Moduli in serie. I Moduli sono Celle Fotovoltaiche assemblate in serie. Le Celle Fotovoltaiche sono l'elemento più piccolo dell'impianto ed è quello che trasforma l'energia solare in energia elettrica. Il Sistema Fotovoltaico può essere suddiviso in:

- Sistemi Autonomi (Stand-alone): che hanno delle batterie di accumulo
  - Sistemi collegati alla rete (grid-connected): non hanno un sistema di accumulo, ma immettono energia nel sistema
- **EOLICO**: i generatori eolici convertono direttamente l'energia cinetica del vento in energia meccanica, che può essere quindi utilizzata anche per la generazione di energia elettrica. La tipica configurazione di un generatore eolico ad asse orizzontale è: traliccio di sostegno, gondola o navicella, albero di trasmissione lento, moltiplicatore di giri, albero veloce e generatore elettrico.
  - **BIOMASSA**: la biomassa utilizzabile ai fini energetici consiste in tutti quei materiali organici che possono essere utilizzati direttamente come combustibili ovvero trasformati in combustibili solidi, liquidi o gassosi. Alcuni esempi sono: residui agricoli, residui forestali, scarti di attività industriali, rifiuti urbani.
  - **GEOTERMICO**: l'energia geotermica è rappresentata dal calore posseduto dal manto terrestre. Lo sfruttamento di tale fonte è legato alla condizione che si concentrino in una stessa area sia la fonte di calore, che la copertura impermeabile e che in quella zona si instauri anche una circolazione profonda di acqua meteorica.

## 9- LCA

Il LIFE CYCLE ASSESSMENT è un metodo per l'identificazione e la valutazione degli impatti ambientali di un prodotto o un servizio.

### **IL PROBLEMA AMBIENTALE**

Il problema ambientale ha diverse sfaccettature:

- Impatto ambientale: che può essere Locale (come smog o uso eccessivo di fertilizzanti) oppure Globale (come l'effetto serra, il buco nell'ozono o le piogge acide).
- Consumo di risorse: ad esempio l'acqua (dove soltanto il 3 % dell'acqua sulla Terra è potabile).

Tra le varie possibilità per ridurre l'impatti ambientali ci sono:

- Trattamenti allo scarico: cioè ridurre gli impatti inserendo filtri.
- Uso di tecnologie "pulite"
- Soluzioni orientate al prodotto: infatti i principali impatti non derivano solo dalla fase produttiva, ma occorre agire sull'intero ciclo di vita del prodotto.

### **LCA**

Il Life Cycle Assessment è un metodo per la valutazione del ciclo di vita dei prodotti. Studia gli aspetti ambientali di un prodotto attraverso le varie fasi della sua vita (dalla culla alla tomba). Gli impatti ambientali da valutare non sono solo quelli durante la fase di produzione del prodotto, ma sono anche quelli che riguardano il suo smaltimento e le fasi pregresse alla sua produzione (Estrazione materie prime, produzione, uso e mantenimento e smaltimento).

Gli impatti vengono valutati con l'identificazione e la quantificazione di:

- Consumi di materia
- Consumi di energia
- Produzione di rifiuti
- Emissioni

La Valutazione del Ciclo di Vita può essere fatta seguendo la ISO 14040 e la ISO14044.

La realizzazione del LCA si divide in 4 fasi:

1. **Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione** (occorre definire le applicazioni previste e i destinatari).  
Quindi si devono definire i processi che fanno parte del ciclo di vita, cioè: Cradle to gate (estrazione e lavorazione materie prime), Gate to gate (produzione e assemblaggio), Cradle to grave (uso manutenzione e smaltimento).
2. **Analisi di inventario**: è una lista di tutti i flussi materiali in ingresso e in uscita delle unità di processo di cui è composto il sistema.
3. **Valutazione degli impatti**: valuta la portata dei potenziali impatti ambientali.
4. **Interpretazione dei risultati**.

LCA serve anche per il confronto tra prodotti, lo sviluppo e il miglioramento del prodotto, per ottenere una certificazione o un'etichetta al prodotto.

## 8- LUCE

La luce si propaga in forma di onde elettromagnetiche alla velocità di circa 300.000 Km/s nel vuoto, con una lunghezza d'onda compresa 0,38  $\mu\text{m}$  e 0,78  $\mu\text{m}$  (cioè il campo di sensibilità dell'occhio umano).

### LEGGI DEL CORPO NERO

La potenza emessa da un corpo nero è fornita dalla **legge di distribuzione di Planck**, in funzione della temperatura e della lunghezza d'onda. La legge di distribuzione di Planck afferma che l'energia associata ad una radiazione elettromagnetica è trasmessa in pacchetti discreti, chiamati quanti, ciascuno dei quali è associato ad un singolo fotone. L'energia  $E$ , di un fotone, dipende dalla frequenza  $\nu$  e dalla costante di Planck  $h$  :

$$E = h\nu$$

La **legge dello spostamento di Wien** fornisce la lunghezza d'onda di massima emissione del corpo nero. Tale legge consente di individuare per quale lunghezza d'onda  $\lambda$  è massima l'emissione radioattiva di un corpo nero di massa generica posto ad una certa temperatura  $T$ .

$$T \cdot \lambda_{\max} = b$$

dove  $T$  è la temperatura,  $\lambda_{\max}$  è la lunghezza d'onda in cui è massima l'emissione radioattiva e  $b$  è la costante di spostamento di Wien.

La **legge di Stefan** fornisce il potere emissivo integrale del corpo nero. Tale legge ci dice che l'emittanza (cioè la potenza emessa per unità di superficie) di un corpo nero è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura.

$$q = \sigma T^4$$

dove  $q$  è l'emittanza termica,  $T$  è la temperatura e  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzman.

### LE GRANDEZZE FONDAMENTALI DELL'ILLUMINOTECNICA

**FLUSSO LUMINOSO ( $\Phi$ ):** [lumen, lm] Quantità di energia luminosa (percepita dal corpo umano) emessa nell'unità di tempo da una sorgente entro un angolo solido  $\omega$ . Si misura in lumen.

**INTENSITÀ LUMINOSA ( $I$ ):** [candela, cd] Rapporto tra il flusso luminoso  $d\Phi$  emesso da una sorgente in una data direzione e l'angolo solido infinitesimo  $d\omega$  di apertura del cono che ha per asse la linea rappresentativa della direzione

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

Data una sorgente che emette uniformemente in tutte le direzioni con intensità di 1 cd, racchiusa in una sfera di raggio unitario, il flusso luminoso totale risulterà pari a: 1 cd x  $4\pi$  = 12,56 lumen

Se la sorgente emette un flusso non uniforme in tutte le direzioni, anche l'intensità luminosa varierà con la direzione.

Il Solido Fotometrico è la rappresentazione polare delle mappe tridimensionali delle intensità luminose.

**ILLUMINAMENTO ( $E$ ):** [lux, lx] Rapporto tra il flusso luminoso misurato in lumen e la superficie misurata in  $\text{m}^2$

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

Se  $n$  sorgenti generano ciascuna un illuminamento  $E_i$ , su un medesimo piano di lavoro, l'illuminamento risultante è dato dalla somma dei singoli illuminamenti. L'illuminamento di una superficie si riduce proporzionalmente al quadrato della distanza.

**LUMINANZA ( $L$ ):** [candela/metri<sup>2</sup>] La luminanza in un punto di una certa superficie in una certa direzione, è il rapporto fra l'intensità luminosa  $I$  emessa in quella direzione e l'area della superficie emittente apparente.

### UNITÀ DI GRANDEZZE FOTOMETRICHE

**CANDELA:** (cd) è l'unità di misura della intensità luminosa. Una candela è pari a l'intensità luminosa di una sorgente emettente una radiazione monocromatica di frequenza pari a  $540 \cdot 10^{12}$  hertz e di intensità radiante di 1/683 W per steradiante.

**LUMEN:** (lm) è l'unità di misura dal flusso luminoso. Equivale al flusso luminoso rilevabile in un angolo solido di 1 steradiante emesso da una sorgente isotropa con intensità luminosa di 1 cd.

**LUX:** (lx) è l'unità di misura dell'illuminamento. Un lux è pari a 1 lumen diviso un metro quadrato.

### LA VISIONE

L'occhio umano è simile a un rivelatore di luce: risponde a fotoni con lunghezza d'onda di 370-730 nm. I fotoni incidenti sono focalizzati sulla retina. La regione di messa a fuoco della retina è la fovea che è responsabile del riconoscimento dei dettagli di oggetti ad alta luminosità. La fovea contiene numerose cellule (detti coni e bastoncelli) che convertono il fotone assorbito in attività neurale.

I coni sono divisi in tre tipi di cellule sensibili a differenti range di luce visibile, corrispondenti alle lunghezze d'onda del rosso, blu e verde. Le cellule bastoncelli sono la componente principale della regione periferica della fovea, percepiscono solo il bianco e il nero, ma sono molto sensibili alla luminanza e al movimento. Quando ci muoviamo modifichiamo l'illuminazione, cambiano le dimensioni, la forma e la luminosità delle immagini retiniche, ciò nonostante la nostra percezione dell'oggetto non cambia.

### IL COLORE DELLA LUCE

La temperatura di colore ( $T_c$ , K) è la temperatura di un corpo nero espressa in Kelvin, che emette una luce avente lo stesso colore della luce emessa dalla lampada.

La Tc individua in modo oggettivo il colore della luce di una sorgente luminosa confronta con una sorgente campione (corpo nero). Il corpo nero a temperatura ambiente sarà nero, a 800K rosso, a 3000K giallo, a 4000K bianca caldo, a 5000K bianco freddo e a 8000K azzurro.

### **INDICI CROMATICI**

**INDICE DI DISCRIMINAZIONE DEL COLORE (CDI):** misura la capacità di una luce di far distinguere il maggior numero di sfumature diverse dello stesso colore.

**INDICE DI PREFERENZA DEL COLORE (CPI):** misura in modo statistico la preferenza di gruppi campione nei riguardi della fedeltà di un colore riferito a determinati oggetti, ossia la risposta cromatica aderente ai colori preferiti della maggior parte delle persone: nel caso dei cibi si preferisce quello colore che è ritenuto espressione di freschezza

### **IL METAMERISMO**

Il metamerismo consiste nella possibilità di ottenere un effetto ottico tale che l'occhio percepisca la stessa sensazione di colore in presenza di luce con distribuzione spettrale diversa del colore puro in questione. Il fenomeno del metamerismo si ha quando colori che all'occhio appaiono identici sotto una stessa luce, ma mostrano tonalità diverse se illuminati con una luce diversa. C'è metamerismo quando due colori si equivalgono tutto una fonte di luce, ma risultano differenti ad altre esposizioni.

### **DIAGRAMMA DI KRUIHOF**

Tale diagramma mette in relazione la Temperatura di colore e i Livelli di illuminamento (lux). All'aumentare del colore della luce, aumenta la zona di confort visivo. Per alti livelli di illuminamento si ha maggior confort visivo a temperature di colore più alte.

### **INDICE DI RESA CROMATICA DEL COLORE**

L'INDICE DI RESA CROMATICA è l'indicazione di quanto "naturale" appaia il colore di un oggetto. Il colore di un oggetto dipende dalle sue caratteristiche e dal colore della luce che lo illumina. Si assume che la resa cromatica degli oggetti è ottima quando sono osservati sotto la luce diurna o con lampade a incandescenza, perché l'occhio si adatta bene a questi tipi di luce. Le lampade a scarica invece danno luogo a numerose alterazioni dei colori.

La Commissione Internazionale di Illuminazione (CIE) ha definito per tanto l'indice di resa dei colori RA che varia tra più di 90 e 20.

## **8-BIS LUCE NATURALE**

Si indica come luce naturale la radiazione luminosa che proviene dalle sorgenti naturali, cioè il sole e il cielo; anche se l'unica vera sorgente di luce è il sole, infatti noi ciò che chiamiamo cielo non è altro che la diffusione della luce da parte dell'atmosfera. Il cielo è una sorgente estesa che emette un flusso luminoso variabile nel tempo e nello spazio e che pertanto deve essere rappresentato mediante modelli matematici; la luminanza di questa sorgente è sempre variabile nel tempo e nello spazio. L'efficienza luminosa del cielo è sempre superiore a quella del sole.

In condizioni di cielo sereno la suddivisione tra la quota di radiazione diretta proveniente da sole e diffusa proveniente dal cielo dipende dall'altezza del sole sull'orizzonte e dalle condizioni atmosferiche. I modelli che valutano l'illuminamento dovuto a cielo e al sole permettono di conoscere il valore assoluto (lux) dell'illuminamento sul piano orizzontale, valore fortemente influenzato dalle condizioni locali, vengono perciò indicati come LEIM (local external illuminance models). Si consiglia di confrontare il LEIM con dati rilevati localmente, perché per esempio i LEIM sviluppati in paesi nordici, sottostimano il clima luminoso italiano. Un alto valore dell'efficienza luminosa della luce naturale, rispetto a quello delle sorgenti artificiali, comporta che a parità di illuminamento ottenuto, con la luce naturale entra in ambiente meno calore che con la luce artificiale.

### **MODELLI DI LUMINANZA DEL CIELO**

Il modello adottato per descrivere la luminanza del cielo determina la distribuzione dell'illuminazione naturale negli interni e gli effetti legati alla direzionalità della luce. Con il cielo coperto lo zenit è più luminoso dell'orizzonte; con il cielo sereno la distribuzione della radiazione è in funzione dell'angolo di altitudine del sole.

Il modello di cielo coperto CIE prevede una distribuzione di luminanza crescente dall'orizzontale allo zenit, secondo la legge sinusoidale di Moon e Spencer, che rappresenta le condizioni meteorologiche tipiche di un'atmosfera limpida e secca con cielo coperto che impedisce la percezione diretta del sole. Le curve di luminanza sono circolari con centro lo zenit.

Il modello di cielo sereno CIE prevede una distribuzione della luminanza variabile nel tempo che segue il moto apparente di sole. La CIE ha adottato il modello di luminanza di Kittler, che definisce la luminanza del punto generico P della volta celeste in funzione della distanza angolare di P dal sole e dallo zenit e dall'altezza del sole sull'orizzonte.

La valutazione della luce naturale che penetra in un ambiente chiuso è un problema che dovrebbe essere di fondamentale importanza nella progettazione architettonica. A causa dell'aleatorietà del flusso

luminoso messo da cielo e sole, in tutte le valutazioni relative alla LUCE NATURALE, si esprimono le prestazioni luminose dell'ambiente facendo ricorso a fattori anziché alle grandezze fisiche. La normativa italiana, su l'illuminazione naturale degli ambienti utilizza il fattore medio di luce diurna.

### **IL FATTORE DI LUCE DIURNA**

Il fattore di luce diurna è il rapporto fra il livello di illuminamento in un punto posto sul piano orizzontale all'interno del locale ( $E_{int}$ ) e il livello di illuminamento in un punto posto su di un piano orizzontale sotto l'emisfero celeste in assenza di ostruzioni e di irraggiamento solare diretto ( $E_0$ ) con misure fatte nello stesso momento:

$$FLD = \frac{E_{int}}{E_0} \cdot 100$$

Il calcolo del fattore puntuale di luce diurna prevede la stima di tre componenti:

- **CALCOLO DELLA COMPONENTE CIELO:** IL suo calcolo può avvenire tramite due metodi: il diagramma di Waldram e il metodo dei goniometri BRE. Il diagramma di Waldram è facilmente interpretabile: è una rappresentazione rettangolare della volta celeste, la scala verticale dell'altitudine e la scala orizzontale sono pensate per far sì che uguali aree sul diagramma rappresentino uguali contributi di illuminamento proveniente dal cielo; la rappresentazione del bordo di una finestra sul Waldram è possibile con una serie di linee che mostrano la linea di colmo di altezza costante. Esiste anche un diagramma di Waldram modificato che consente di considerare anche altitudini più basse con una maggiore accuratezza, infatti sul bordo viene indicato un fattore di scala che dovrà modificare.
- **CALCOLO DELLA COMPONENTE RIFLESSE ESTERNAMENTE:** il metodo di calcolo è simile alla componente cielo, ma si deve considerare la superficie delle ostruzioni come porzione di cielo a radiazione ridotta.
- **CALCOLO DELLA COMPONENTE RIFLESSA INTERNAMENTE:** può essere fatto mediante il metodo dei monogrammi BRE,

Il calcolo del fattore medio di luce diurna si effettua mediante la formula:  $FLD_m = \frac{A_f \cdot t \cdot \varepsilon \cdot \psi}{A_{tot}(1-r_m)}$

dove  $A_f$  è l'area della superficie della finestra,  $t$  è il fattore di trasmissione luminosa del vetro,  $A_{tot}$  è l'area totale delle superfici che delimitano l'ambiente,  $r_m$  è il fattore medio di riflessione luminosa delle superfici dell'ambiente,  $\varepsilon$  è il fattore finestra (varia a seconda del tipo di ostruzione e dall'angolo che formano con la finestra) e  $\psi$  è il fattore di riduzione del fattore finestra (varia a seconda delle dimensioni e dalla profondità della finestra).

### **FATTORI CONDIZIONANTI IL CONFORT VISIVO**

- **luminanza:** intensità della luce riflessa o emessa dalla superficie stessa verso chi guarda
- **contrast di luminanza:** rapporto di luminanza tra l'oggetto da visualizzare e il suo sfondo
- **acuità visiva:** capacità dell'occhio di percepire i dettagli di un oggetto; cresce rapidamente fino ai 20/30 lux e poi lentamente fino a circa 100 lux, e al disopra di 100 l'incremento è minimo.
- **tempo di visione:** tempo che occorre per vedere, dato che la visione non è istantanea.
- **direzionalità della luce:** la presenza di una fonte luminosa concentrata e con direzione prevalente può causare ombre dure e nette tali da rendere difficoltoso il normale svolgimento delle attività
- **resa colorimetrica:** misura quanto il colore degli oggetti possa essere percepito correttamente
- **attività svolta:** ambienti che prevedono una collocazione fissa degli utenti necessitano di elevati livelli di luce e di adeguata distinzione della luce.

I colori raccomandati di luce artificiale per gli ambienti sono regolati dalla UNI EN 12464-1

## **8-BIS SIMULAZIONE DELLA LUCE NATURALE**

### **COLORIMETRIA**

I colori di un oggetto percepiti dall'osservatore dipendono dalla natura della sorgente luminosa e dalle caratteristiche di riflessione degli oggetti.

**RAPPRESENTAZIONE DEL COLORE:** in base alla visione umana, ogni colore può essere visto come una combinazione variabile di tre colori: blu, rosso e verde. La CIE nel 1931 ha fornito una standardizzazione, associando tre lunghezze d'onda ai tre colori primari: blu 435,8nm, verde 546,1 nm e rosso 700nm. I colori primari possono essere sommati per ottenere i colori secondari: Magenta (rosso+blu), Ciano (verde+blu) e Giallo (rosso+verde); invece sommando i tre primari o un secondario e un primario si ottiene la luce bianca.

**SINTESI ADDITIVA:** Consiste nella somma di onde fondamentali, con l'ottenimento di un'onda complessa. In particolare, è la somma di stimoli di colore separati (nello spazio e/o nel tempo) che provoca la sensazione visiva dovuta alla combinazione cromatica, pur senza avere nessuna interazione tra i due fasci cromatici. Le combinazioni descritte si producono sovrapponendo radiazioni luminose di diverso colore, questo tipo di combinazione si definisce sintesi additiva ed è la tecnica che si impiega per riprodurre i colori sul monitor.

**SINTESI SOTTRATTIVA:** Si ha la sintesi sottrattiva quando si combinano pigmenti di diverso colore. Primari, sono i pigmenti che assorbono la radiazione luminosa di un colore primario, riflettendo le altre due. Per esempio, il magenta assorbe il verde, il ciano assorbe il rosso e il giallo assorbe il blu.

### **CARATTERISTICHE DESCRITTIVE DEL COLORE**

**LUMINOSITÀ:** (brightness) attributo che si riferisce alla quantità di luce presente

**TINTA:** (hue) attributo legato alla lunghezza d'onda dominante. Rappresenta ciò che un osservatore definisce "il colore dominante"

**SATURAZIONE:** (saturation) attributo che si riferisce alla purezza della tinta; si ha una bassa saturazione quando nel colore è presente un'elevata quantità di luce bianca mescolata alla tinta.

L'insieme della tinta e della saturazione definisce la cromaticità, cioè ciò che caratterizza il colore in modo indipendente dall'intensità luminosa presente

Per definire univocamente un colore è necessario specificare 3 valori x, y e z.

Si possono specificare solo i coefficienti x e y, in quanto il terzo si ricava dalla relazione  $x+y+z=1$ . Sul bordo del grafico vi sono i colori pienamente saturi, man mano che si procede verso il centro al colore viene aggiunta sempre più luce bianca. La curva (linea nera) è la curva di corpo nero, quindi luce completamente bianca.

### **MODELLI DI COLORE**

Un modello di colore è uno strumento con il quale si può specificare, creare e visualizzare un colore.

**MODELLO RGB:** ogni colore è rappresentato dalle sue componenti spettrali di rosso, verde e blu. Si basa su un sistema di coordinate cartesiane.

**MODELLO CMY:** assume come colori primari il magenta, il ciano e il giallo; questi sono i colori primari impiegati in sintesi sottrattiva.

Sia il modello RGB e il CMY hanno dei problemi, cioè non corrispondono alla tipologia di descrizione dei colori propria dell'uomo e rispetto alle caratteristiche di interesse (per esempio la luminosità) le singole componenti risultano essere correlate.

**MODELLO HS:** sono modelli basati sulle caratteristiche con cui l'uomo definisce un colore cioè: tinta, saturazione e luminosità. Permettono all'utente di specificare i colori in modo intuitivo. Esistono vari modelli di questo tipo, che si differenziano per le regole di conversione da e verso il modello RGB.

**Il modello HSI:** le tre coordinate del modello sono tinta (hue), saturazione (saturation) e intensità (intensity).

**Il modello HSV:** è simile al HSI, ma invece dell'intensità, utilizza il valore V della luminosità (Brightness).

## **9- LUCE NEI LUOGHI DI LAVORO**

In illuminotecnica i disturbi vengono definiti da abbagliamento o di disagio o disturbo da luce. La CIE definisce:

- abbagliamento molesto, causa discomfort senza impedire la visione di oggetti e dettagli.
- abbagliamento perturbatore, che impedisce la visione di oggetti e dettagli, senza necessariamente comportare discomfort.

Poi vengono definite:

- superfici speculari, dove l'angolo del raggio incidente e di riflessione sono uguali.
- superfici diffuse o semi-diffuse, dove la riflessione dà origine a più raggi con direzioni diverse.

La UNI 10530, accanto ai parametri tradizionali fornisce altri parametri: la tipologia di compito visivo, la capacità e caratteristiche visive del soggetto, alcune proprietà (non illuminotecniche) dell'ambiente.

### **DISTURBI ASTENOPICI O OCULO VISIVI**

Sono disturbi che si originano quando l'apparato visivo cerca di conseguire risultati funzionali eccedenti alle proprie possibilità fisiologiche. I sintomi sono: bruciore e lacrimazione, senso di corpo estraneo, ammiccamento frequente, fastidio alla luce, ecc...

I disturbi astenopici sono causati da sovraccarico di accomodazione (il cristallino modifica il suo potere rifrattivo per mettere a fuoco oggetti oltre i 5 metri) e convergenza (connesse alla visione da vicino), e sono anche causati da un sovraccarico della mobilità pupillare e dall'adattamento retinico (connessi alle condizioni illuminotecniche del posto di lavoro).

### **UNI EN ISO 12464**

In particolare, la EN 12464 definisce i valori limite dei seguenti parametri:

- illuminamento medio mantenuto (em), relativo alla superficie di riferimento da considerare in base al tipo di ambiente.
- uniformità di illuminamento, inteso come rapporto tra l'illuminamento delle aree nelle immediate vicinanze e l'illuminamento del compito visivo
- grado unificato di abbagliamento (UGR), introdotto dalle CIE nel 1995, come l'indice rappresentativo dell'abbagliamento derivante direttamente dagli apparecchi di un impianto di illuminazione di interni.

$$UGR = 8 \log_{10} \left( \frac{0,25}{L_b} \sum_i \frac{L_i^2 \omega_i}{p_i^2} \right)$$

Dove  $L_b$  è la luminanza di sfondo,  $L_i$  è la luminanza delle parti luminose di ogni apparecchio nella direzione dell'occhio dell'osservatore,  $\omega_i$  l'angolo solido della sorgente e  $\rho_i$  è l'indice di posizione di Guth (che è in funzione della distanza tra occhio e la sorgente).

- **indice di resa cromatica ( $R_a$ )**, indicazione oggettiva proprietà di rappresentazione cromatica di una sorgente, il valore massimo è 100 e diminuisce con la diminuzione della capacità di restituzione del colore da parte della sorgente.

## **STRUMENTI DI MISURA**

I principali strumenti sono:

- **LUXOMETRO**, con il quale è possibile determinare il livello di illuminamento puntuale medio, l'uniformità di illuminamento, il fattore puntuale e medio di luce diurna.
- **LUMINANZOMETRO**, con il quale è possibile determinare la distribuzione delle luminanze, i contrasti di luminanza e gli indici di abbagliamento
- **COLORIMETRO**, con il quale si determinano le coordinate tricromatiche e la temperatura di colore corretta.

## **10- LUCE ARTIFICIALE**

### **SORGENTI A INCANDESCENZA**

**LAMPADE A INCANDESCENZA:** temperatura di colore da 2700 a 2900 K. All'interno c'è un filamento di tungsteno inserito in un bulbo di vetro con il vuoto. Il bulbo può essere trasparente, diffondente o con un riflettore incorporato.

**LAMPADE A INCANDESCENZA CON ALOGENI:** temperatura di colore da 2900 a 3100 K. Gli alogeni contenuti all'interno del bulbo evitano la perdita di efficienza causata dall'evaporazione del tungsteno, infatti il gas alogeno si unisce al tungsteno evaporato e torna a depositarlo sul filamento (durata maggiore).

### **SORGENTI A SCARICA**

**LAMPADE A VAPORI DI MERCURIO A BASSA PRESSIONE:** emettono nello spettro ultravioletta; la luce emessa è ionizzante e dannosa per esposizione diretta. Se al suo interno viene rivestita con materiale fluorescente in grado di assorbire l'energia ultravioletta e rimettere nello spettro vivibile, si ottiene una lampada fluorescente.

**LAMPADE A VAPORI DI MERCURIO AD ALTA PRESSIONE:** con l'aumento di pressione la luce si sposta nello spettro bianco-azzurro, che rendono la luce utilizzabile per l'illuminazione. Questa luce ha una bassa efficienza luminosa (meno di 60 lumen), una bassa durata e un'alta onerosità nello smaltimento per l'elevata presenza di mercurio. La direttiva comunitaria 2002/95/CE-2003 introduce delle restrizioni al loro uso. La vendita e l'installazione di queste lampade è stata vietata dal 1° luglio 2006.

**LAMPADE A LUCE MISCELATA:** sono lampade al mercurio ad alta pressione in cui il reattore di alimentazione è sostituito da un filamento, collocato insieme alla lampada in un tubo secondario. Durante il funzionamento il filamento divenne incandescente ed emette luce come in una lampada a incandescenza, che miscelata con quella del mercurio, permette di avere una tonalità di luce più naturale.

**LAMPADE AI VAPORI DI SODIO A BASSA PRESSIONE:** la loro emissione è monocromatica gialla. È usata nell'illuminazione stradale in incroci soggetti a nebbia. Hanno una lunghezza di emissione ottimale per l'occhio umano e hanno un'efficienza luminosa elevata.

**LAMPADE AI VAPORI DI SODIO AD ALTA PRESSIONE:** aumentando la pressione il vapore di sodio si allontana dallo stato di gas ideale e il suo spettro di emissione si allarga. La luce prodotta è di colore bianco tendente al giallo (2000-2500K), e ciò le rende adatte solo per applicazioni in cui la resa dei colori non è importante.

**SISTEMI AD INDUZIONE:** sono basate sulla scarica di gas, però la ionizzazione avviene senza la presenza di elettrodi, ma grazie ad un circuito alimentato da un generatore elettronico ad alta frequenza. Hanno un'accensione rapida, eliminano il fenomeno dello sfarfallamento e hanno una durata elevatissima. Però hanno un costo elevato e una bassa efficienza.

### **LED (LIGHT EMITTING DIODE)**

Questo dispositivo sfrutta le proprietà ottiche di alcuni materiali semiconduttori, per produrre fotoni, a partire dalla ricombinazione di coppie elettrone-lacune. Gli elettroni e le lacune vengono iniettati in una zona di ricombinazione attraverso due regioni del diodo drogato con alcune impurità di tipo diverso, e cioè di tipo n per gli elettroni e p per le lacune. Il colore della radiazione emessa è definito dalla distanza in energia tra i livelli energetici di elettroni e lacune.

I LED sono uno speciale tipo di diodi a giunzione p-n. Quando sono sottoposti ad una tensione diretta, gli elettroni della banda del semiconduttore si ricombinano con le lacune della banda di valenza rilasciando energia sufficiente da produrre fotoni, che a causa dello spessore del chip, lo abbandonano e vengono emessi come luce.

I LED hanno un'elevata affidabilità, una lunga durata, bassi consumi ed un'elevata efficienza luminosa.

## 10 BIS- ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE

### **ABBAGLIAMENTO**

Il fenomeno dell'abbagliamento si presenta come una sensazione molto fastidiosa, perché l'occhio viene sollecitato da valori di luminosità che superano quelli limite di adattamento fisiologico. L'abbagliamento prodotto da una sorgente è funzione della sua luminanza, della sua dimensione e dalla sua posizione nel campo visivo. L'abbagliamento può essere diviso in: abbagliamento debilitante e abbagliamento fastidioso.

**ABBAGLIAMENTO DEBILITANTE:** è di tipo fisiologico, riduce la visibilità e la prestazione visiva, e può essere di tipo indiretto o diretto

**ABBAGLIAMENTO FASTIDIOSO:** è di tipo psicologico e non compromette la visione, è causato da frequenti processi di adattamento.

I metodi di stima dell'abbagliamento possono essere fatti mediante: curve limite di luminanza o tramite l'indice di abbagliamento o tramite il visual comfort probability.

**CURVE DI LUMINANZA A e B:** sono influenzate dalla distribuzione spaziale, dalla geometria del sistema, dall'illuminamento medio orizzontale e dal tipo di sorgente. La curva di luminanza A è valida per apparecchi senza bordi laterali, illuminazioni lineari e bordi luminosi paralleli alla direzione dell'osservatore. La curva di luminanza B è valida per apparecchi con bordi laterali. **INDICE DI ABBAGLIAMENTO (CGI):** l'abbagliamento cresce in funzione del numero e delle dimensioni di sorgenti.

L'indice varia da 8 a 30 (con valori consigliati che vanno da 15 a 30), ed è in funzione del numero di apparecchi, dell'angolo solito della sorgente, dal livello di illuminamento diretto e indiretto sul piano verticale e la luminanza degli apparecchi.

**VISUAL COMFORT PROBABILITY (VPC):** valuta a % di popolazione che giudica il limite tra il benessere visivo ed il fastidio.

### **INDICE DI RESA CROMATICA(RA)**

L'INDICE DI RESA CROMATICA è l'indicazione di quanto "naturale" appaia il colore di un oggetto. Il colore di un oggetto dipende dalle sue caratteristiche e dal colore della luce che lo illumina. Si assume che la resa cromatica degli oggetti è ottima quando sono osservati sotto la luce diurna o con lampade a incandescenza, perché l'occhio si adatta bene a questi tipi di luce. Le lampade a scarica invece danno luogo a numerose alterazioni dei colori. La Commissione Internazionale di Illuminazione (CIE) ha definito per tanto l'indice di resa dei colori RA che varia tra più di 90 e 20. La norma UNI EN 12464-1:2004 riporta il valore limite di Ra per diversi ambienti, compiti e attività. In nessun ambiente di lavoro vanno utilizzate lampade con Ra inferiore ad 80.

### **CONTRASTO**

La percezione di un oggetto è funzione del contrasto luminanza e di colore dell'oggetto e dello sfondo. La relazione per ricavare il valore C del contrasto è:

$$C = \frac{(L_{oggetto} - L_{sfondo})}{L_{sfondo}}$$

Il contrasto però è anche un parametro soggettivo, infatti si definisce una sensibilità al contrasto dell'osservatore come rapporto tra luminanza dello sfondo e minima luminanza percepibile dall'occhio.

Il fattore di resa del contrasto è il rapporto tra il contrasto C in condizione di illuminazione reali ed il contrasto CR in condizioni di riferimento. Il valore ottimale del fattore di resa del contrasto è inferiore a 0,7.

### **PRESTAZIONE VISIVA**

La prestazione visiva può essere definita come il rapporto tra il lavoro svolto con un dato illuminamento ed il lavoro svolto nella condizione di illuminamento ideale. La prestazione visiva è condizionata da tre aspetti: capacità visive del soggetto in termini di acuità visiva, caratteristiche del compito visivo e caratteristiche dell'ambiente.

Le caratteristiche da considerare quando si parla di COMPITO VISIVO sono: la luminanza e il contrasto di luminanza, colore e contrasto di colore, posizione del dettaglio del campo visivo, movimento e tempo di osservazione e dalla durata della prestazione legata al compito visivo.

L'influenza dell'ambiente sulla percezione visiva si manifesta con l'aspetto delle superfici degli oggetti principali, dal suo interno e dalle sorgenti di luce naturale e artificiale, in particolare la distribuzione delle luminanze, l'illuminamento, abbagliamento, direzione della luce e aspetti del colore.

### **METODO DEL FLUSSO TOTALE**

Il progetto di massima viene eseguito con il METODO DEL FLUSSO TOTALE; le normative specificano i requisiti minimi, per esempio dei valori di illuminamento in funzione della destinazione d'uso, e tale illuminamento è il valor che deve assumere sul piano di lavoro.

Il flusso che deve essere fornito dalle lampade è dato dalla relazione:

$$\Phi_T = \frac{E_m \cdot S}{u \cdot D}$$

dove  $\Phi_T$  è il flusso totale,  $E_m$  è l'illuminamento medio mantenuto,  $S$  è la superficie da illuminare,  $u$  è il coefficiente di utilizzazione e  $D$  è il fattore di decadimento.

**COEFFICIENTE DI UTILIZZAZIONE  $u$ :** è il rapporto tra il flusso utile ricevuto sul piano di lavoro e il flusso emesso dal corpo illuminante. Tale coefficiente è tabellato in funzione del tipo di lampada, del tipo di illuminazione. La determinazione del coefficiente di utilizzazione richiede il calcolo dell'indice del locale  $i$ , che tiene conto delle dimensioni geometriche:

$$i = \frac{a \cdot b}{h(a + b)}$$

dove  $a$  e  $b$  sono le dimensioni in pianta e  $h$  è l'altezza del corpo illuminante.

**FATTORE DI DECADIMENTO:** è il rapporto tra il flusso luminoso che raggiunge il piano di lavoro in condizioni medie di esercizio e quello iniziale. Tale fattore è il prodotto dei seguenti fattori: il fattore di decadimento delle lampade, il fattore di decadimento dell'apparecchio e il fattore di decadimento delle superfici del locale.

### **CURVA FOTOMETRICA**

Per caratterizzare in modo completo un apparecchio, si deve avere una visione precisa e si deve conoscere l'intensità uscente in tutte le direzioni. Ma molto più efficacemente usiamo le curve fotometriche, che esprimono in forma grafica i valori di intensità associati ad ogni direzione. Le curve fotometriche solitamente sono rappresentate da diagrammi polari, che sono grafici riportati su una porzione di piano, con un centro e un asse di riferimento che parte dal centro, quindi qualsiasi punto sul piano può essere individuato indicando l'angolo e la distanza dall'origine. Ogni apparecchio ha la sua curva fotometrica caratteristica. La forma della curva fotometrica è importante per capire in modo intuitivo il comportamento dell'apparecchio.