

Illuminotecnica

La luce è un'onda che si muove di moto rettilineo uniforme. Quest'ultimo si esprime con una formula algebrica:

$$v = \frac{\lambda}{T} \Leftrightarrow c = \lambda \cdot f$$

La luce si differenzia in base alla lunghezza d'onda λ , il suono in base a f frequenza. Entrambi tuttavia sono onde.

Vediamo solo la luce visibile con $380 \text{ nm} < \lambda < 780 \text{ nm}$.

I 125 milioni di bastoncelli sono responsabili della visione notturna (scotopica, al buio), i 7 milioni di coni permettono la vista a colori. I primi reagiscono lentamente ai cambiamenti di luce; per questo all'ingresso delle gallerie ci sono, no più lampade!

I coni si adattano più velocemente e sono di tre tipi: S, sensibili alle corte λ (blu), M, sensibili alle medie λ (verde) e L, sensibili alle lunghe λ (arancione). Il verde è molto luminoso ai nostri occhi, che si stancano meno per vederlo (per questo è riposante). Serve più energia per vedere il rosso o il blu e bisogna fornire più potenza perché diventi luminoso come il verde. Lo ha:

$$\phi = \phi_{\text{verde}} \cdot \eta$$

Per 1W di verde ne abbiamo 1W, di 1W di rosso solo il 70%.

Dobbiamo definire alcune grandezze fisiche tipiche dell'illuminotecnica:

- flusso luminoso: indicato con ϕ , è l'energia sparsa nel tempo. L'unità di misura è il lumen (lm). Tuttavia si usa anche la candela;
- intensità luminosa: indicato con i , è la derivata del flusso rispetto all'angolo solido o rapporto tra flusso e angolo solido:

$$i = \frac{d\phi}{d\Omega}, \quad i = \frac{\phi}{\Omega} \left[\frac{\text{lm}}{\text{sterad}} \right]$$

In cui l'angolo solido è:

$$\Omega = \frac{A}{R^2}, \quad d\Omega = 4\pi R^2 \Rightarrow \Omega = 4\pi$$

Una candela è la luce sparsa da 1 cm^2 di platino fuso (emette luce molto stabilmente, come fosse un corpo nero).

Oppure è la luce di un laser verde da 1W con frequenza di 540 THz (o con $\lambda = 0,555 \mu\text{m}$) che dà intensità radiante di $\frac{1}{683} \text{ W/sterad}$.

- illuminamento: flusso luminoso per unità di superficie. Serve per misurare le quantità di luce necessarie in una

superficie: in un banco da disegno ne serve più che sul per-
nimento! Si ha:

$$E = \frac{\Phi}{S_u} \quad \left[\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right] = [\text{lux}]$$

- **luminanza**: dipende dalla posizione dell'osservatore, è il rapporto tra intensità luminosa e area apparente per l'osservatore (proiezione della superficie in direzione dell'osservatore). Si usa nei problemi di abbagliamento:
$$L = \frac{i}{A_{\text{app}}}$$

- **efficienza luminosa**: rapporto tra flusso luminoso e potenza assorbita:

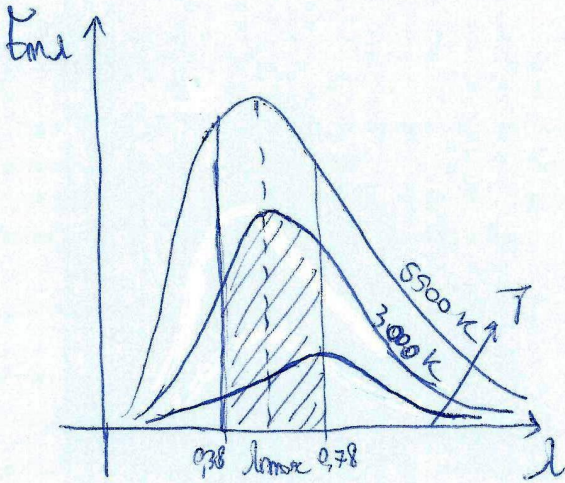
$$e = \frac{\Phi}{P_{\text{el}}} \quad \left[\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right]$$

Le grandezze elencate servono direttamente nella progettazione dell'im-
pianto. Eccone i passaggi:

- **destinazione d'uso**: a seconda dell'uso dell'ambiente (aula da disegno, biblioteca, ecc) le tabelle forniscono l'illuminamento E da fornire. In caso di incendio devono esserci almeno 5 lux nel punto più lontano dalle fonti di luce. Nei corridoi devono esserci 20-50 lux; 80-150 lux nelle abitazioni; 200-400 lux negli uffici, nelle aule, sui tavoli da disegno; 600-1500 lux per orologi, dentisti, sale operatorie. Queste ultime sono zone urbane, dove si lavora (si usa una lampada da tavolo, non si illumina tutto l'ambiente a 400 o 600 lux). La luce solare varia da 3000 a 30000 lux. Si usano anche solar tube, che permettono l'ingresso della luce solare;
- **flusso**: conoscendo l'illuminamento e la superficie da illuminare ricaviamo il flusso necessario $\Phi_u = E \cdot S_u$
- ogni lampada da un flusso installato Φ_i che non è (notare bene: non è) da porre uguale a Φ_u . Infatti Φ_i comprende tutti i raggi di luce, anche quelli dispersi, che non vanno sulla superficie da illuminare. Quindi Φ_i deve essere maggiore di Φ_u per fornire Φ_u stesso sulle superfici;
- **potenza elettrica**: non serve $P_{\text{el}} = \frac{\Phi_u}{e}$. In tal caso si sottovaluta. Bisogna usare il corretto valore di e $\Phi_i > \Phi_u$ e di conseguenza ottenere una maggiore potenza necessaria, P_{el} .

Legende di luce (tipi di lampade)

Riprendiamo il diagramma già introdotto parlando dell'immaginamento:



Legge di Wien: $\lambda_{max} \cdot T = 2898 \mu m \cdot K$

$$T_{appale} = 5500 \div 5800 \text{ K}$$

Inserendo nella legge di Wien le T_{appale} si ottiene il λ_{max} indicato nel diagramma, al centro dello spettro del visibile. Comparso da alla luce verde, quella per cui i nostri occhi sono ottimizzati!

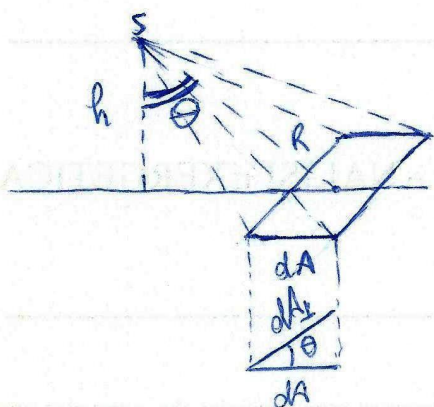
Ecco i vari tipi di lampade disponibili:

- lampadine a incandescenza: anche se il bulbo è sottomorto, il tungsteno di cui è fatto il filamento sublima e si deposita sul fondo del bulbo stesso, cioè alle temperature di 2000-3000 K. Non si può aumentare troppo tale temperatura perché i materiali non resisterebbero. Solo il 10% della potenza forma di luce visibile;
- lampade alogene: ridotti una forma differente al bulbo e lo riempie di un alogeno (ad esempio lo iodio). In tal modo i depositi di tungsteno non allontanati dalle correnti convettive di iodio. Il 15% della potenza diventa luce visibile;
- telecomere a infrarossi: riferendosi al grafico, la curva a 3000 K rappresenta le lampade a filamento di tungsteno, quella soltanto le telecomere a infrarossi. Queste ultime funzionano con pochissima luce e potenziano la vista umana al buio. Tuttavia vediamo tutto di un solo colore! Anche le lampadine emettono prevalentemente luce rossa, ma vediamo tutti i colori perché i nostri occhi selezionano la luce (siamo nello spettro del visibile, non nell'infrarosso);
- lampade a luminescenza (comunemente dette "neon"): consiste di un tubo contenente un gas rarefatto. Ai capi del tubo viene prodotta una differenza di potenziale, come accade tra le armature di un condensatore. Lo starter riscalda gli elettrodi e provoca una scarica tra i due estremi. Se essa

è troppo forte gli elettroni strappati al neon non tornano più agli atomi di partenza. Altrimenti, se la scarica non è eccessiva, gli elettroni si allontano, ma tornano nella posizione originale emettendo un quanto di luce (modello atomico di Bohr). Lo spettro della luce emessa non è continuo, ma si concentra solo su alcune λ , a seconda del gas. Si aggiunge allora l'ossigeno al gas contenuto in modo da recuperare alcune lunghezze d'onda migliorando lo spettro. Si usano anche altre sostanze come iodio, vapori di mercurio, sodio, ecc. La tensione a cui è soggetta la lampada deve essere stabile poiché il dispositivo è delicato. Le lampade stradali (lampioni) sono spesso ai vapori di sodio, lampade a led: sono costruite con gli stessi elementi dei pannelli fotovoltaici, cioè con silicio drogato con boro o con fosforo (drogaggi p o n). Il B ha un elettrone in meno rispetto al Si, il P uno in più (nell'ultimo orbitale, il più esterno). Una parte di Si viene drogata con B, una con P. La giunzione p-n mette a contatto le due parti diversamente drogate. Essendo differenza di elettroni si genera corrente. Tuttavia solo il 40% della luce solare viene assorbita e solo il 17% diventa effettivamente energia utile. Il led funziona al contrario: usa l'elettricità per produrre luce, con vari drogaggi. Maque per primo il led rosso, poi il verde, poi l'arancione e infine il blu. Sono monocromatici e combinati danno il bianco. Il costo di installazione è uguale a quello delle lampade a incandescenza, ma con 7 W si ottengono 400 lm contro i 40 lm delle lampade a incandescenza. Bisogna tuttavia introdurre un trasformatore che ripartisca la differenza di potenziale sui led, poiché ogni colore richiede una diversa. Il singolo led ha due "gambe", una più lunga e una più corta per non confondere + e - (altrimenti si brucia). La luce prodotta si apre poco o poco e può ferire le retina. Per questo sono meglio i led con vetro satinato.

Illuminamento da sorgente puntiforme

Andiamo per concludere l'illuminamento nel caso di sorgente puntiforme!



dA è l'area colpita dai raggi, $dA \cos \theta$ è pari a $dA \cos \theta$ ed è la proiezione dell'area tale che i raggi la colpiscono perpendicolarmente. Si hanno:

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad I_0 = \frac{d\phi}{d\Omega}$$

L'intensità luminosa non è uniforme in tutte le direzioni

In direzione θ :

$$d\Omega = \frac{dA \cos \theta}{R^2} \Rightarrow d\Omega = \frac{dA \cos \theta}{R^2}$$

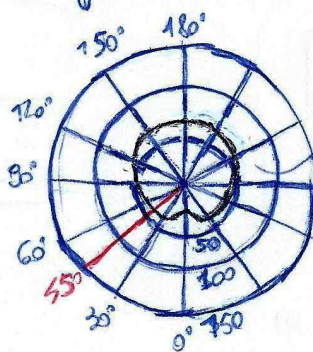
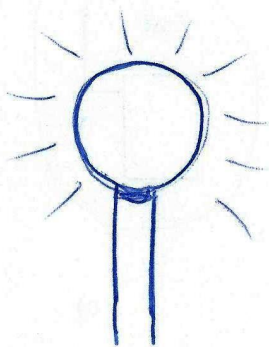
$$\Rightarrow I_0 = \frac{E dA R^2}{dA \cos \theta} = \frac{E R^2}{\cos^3 \theta} \quad \text{infatti } R = \frac{h}{\cos \theta}$$

$$\Rightarrow E = \frac{I_0 \cos^3 \theta}{R^2}$$

Nel caso isotropo si ha $E_{\max}$ se:

- $\theta = 0 \Rightarrow \cos \theta = 1$;
- h è minimo (per questo le lampade da tavolo hanno il braccio regolabile; si va col quadrato dell'altezza)

Sperimentalmente si ottiene la curva fotometrica, che mostra dove va più luce a seconda di lampada e porta lampada. Per un lampadario da giardino:



la distribuzione è una sfera leggermente scavata in corrispondenza del portelampada (il palette).

La curva fotometrica si costruisce partendo dalla distribuzione della luce sui piani trasversali, perpendicolari a 45° rispetto alla lampada

Determiniamo l'illuminante per un angolo di 45° (in rosso nel disegno precedente). I cerchi concentrici rappresentano le candele prima di bulbo adobbato che!

$$E = 40 \text{ lm/lx}, \quad I = \frac{\phi}{\Omega} = \frac{e \cdot \rho_{ee}}{4\pi}, \quad 4\pi \approx 12$$

$$\Rightarrow \text{approssimando } e \approx 12 \text{ lm/lx} \Rightarrow I \approx 1 \rho_{ee} \\ \Rightarrow 1 \text{ cd} \approx 1 \text{ W}$$

A 45° si ha $I_c = 40 \text{ cd} / \frac{1000 \text{ lm}}{1000 \text{ lm}}$. Il 1000 lm è denominatore indica che il grafico è normalizzato a 1000 lm . Si ottiene intersecando il raggio dei 45° con la curva fotometrica. Per il punto trovato passa la circonferenza che dà il valore 40 cd . Se abbiamo una lampada con $P = 36 \text{ W}$ ed $e = 80,5 \text{ lm/lx}$ otteniamo!

$$\phi = 80,5 \text{ lm/lx} \cdot 36 \text{ W} = 2898 \text{ lm} \Rightarrow I = I_c \cdot \phi = \frac{40 \text{ cd}}{1000 \text{ lm}} \cdot 2898 \text{ lm} = 115,92 \text{ cd}$$

$$\Rightarrow E = 115,92 \text{ cd} \cdot \frac{\cos^3(45^\circ)}{(1,7 \text{ m})^2} = 14,2 \text{ lux}$$

Se mi servono 40 lux devo cambiare lampada o ridurre l'altezza.

Le curve fotometriche derivano dal solido fotometrico (estensione dell'analisi fotometrica allo spazio). Le lampade vengono costruite anche in base alla direzione da illuminare: lampade stradali, led a goccia o a globo, faretti, ecc.

Aggiungiamo qualche considerazione al progetto dell'impianto di illuminazione. La parte da un conto di massima delle lampade da mettere e ci si affida al computer. Invece per la verifica si discretizza l'area da illuminare (e la lampada è isotropa basta dividerla in 4 parti). Si calcola poi la distanza in pianta dal centro di ogni area della proiezione delle lampade sul pavimento. Determinato l'angolo α si ottiene la I e quindi si calcola E . Facendo la media aritmetica sull'area da illuminare si ottiene un valore elevato di E , ma non rappresentativo poiché tanti punti rimarrebbero bui. In questi casi si introduce generalmente la gaussiana e si chiede un fattore 95. Per l'illuminotecnica non si fuffa

la gaussiana, ma si dice operativamente che non deve esserci una differenza maggiore del 20% tra valore medio e massimo o tra minimo e massimo di E . Quindi i rapporti non devono superare lo 0,8.

Rivediamo ora i passaggi per la determinazione del numero di lampade da installare:

- dalla conoscenza di $E_{ed 5}$ si ricava φ_u (pubile);
- si determina φ_i ponendo $\varphi_i = \varphi_u$, ma ($\varphi_{installato}$):
$$\varphi_u = k \varphi_i, \quad 0 \leq k \leq 1$$

- partendo da $e = \frac{\varphi_i}{P_{el}}$ si ottiene $P_e = \frac{\varphi_i}{e}$.

Definiamo meglio k . È dato da $k = f \cdot g$ in cui:

a) g rappresenta le condizioni di manutenzione:

- durata delle lampade;
- facilità/difficoltà di manutenzione;
- frequenza dei guasti;
- possibilità di pulizia (chiusure stagni o meno);
- invecchiamento;

b) f rappresenta la topologia dell'ambiente:

- forma delle stanze: quadrata, rettangolare, ecc;
- colore delle stanze; SCPP: S soffitto, C cornice, P pareti e P piano di lavoro. Ricordando il coefficiente ρ della legge di Grassmann ($\alpha + \rho + \tau = 1$) corpo opaco $\tau = 0$, corpo bianco $\alpha = 0$ e $\rho = 1$, corpo nero $\alpha = 1$, $\rho = 0$. ρ dipende da chiaro/scuro, lucido/matto, lucido/opaco. I valori SCPP (ad esempio $S = 8$, $C = 8$, $P = 6$, $P = 6$) determinano ρ insieme alle altre caratteristiche.

In base alle condizioni di manutenzione si sceglie un g solitamente compreso tra 0,5 e 0,8. Migliori sono i valori tra 0,4 e 0,8. Infatti se $f = 1$ e $g = 0,5$ bisogna mettere il doppio delle lampadine ($\varphi_i = \frac{\varphi_u}{k} = \frac{\varphi_u}{0,5}$). In realtà f non è mai > 0,5. Inoltre si tiene conto della differenza di altezza tra piano di lavoro e pavimento nel coefficiente di forma L (che contempla anche le dimensioni delle stanze $a+b$).

Dalle bolle si ricavano f.e.g. Alcune vengono pure combinate dell'attacco svolto.

Finora non abbiamo considerato la luce naturale, quella che è sempre da preferire. Tuttavia il Sole non deve entrare direttamente per evitare abbagliamento e surriscaldamento. Alcuni dispositivi vengono installati per proteggersi dai raggi diretti.

Si considera il rapporto tra luce entrante e luce che vi è all'esterno (in termini di illuminamento):

$$\eta = \frac{E}{E_0}$$

$$0 < \eta < 1$$

Si deve ripartire sulla base delle finestre. La norma prevede l'introduzione della costante $\frac{1}{8}$ come rapporto tra superficie muraria e vetrata. Più precisamente si deve determinare η_m come rapporto seguente:

$$\eta_m = \frac{\sum_{i=1}^N A_{fi} \cdot \tau_{vi} \cdot q_v \cdot \psi_i}{S_{tot} \cdot (1 - \rho_m)}$$

In cui:

- N numero delle finestre;
- A_{fi} area delle finestre (senza intelaiatura);
- τ_{vi} fattore di trasmissione del vetro (il vetro è selettivo e causa l'effetto serra);
- q_v fattore finestra (posizione rispetto a ostacoli esterni);
- ψ_i fattore riduzione finestra (lo spessore delle pareti riduce la luce entrante);
- S_{tot} area totale;
- ρ_m coefficiente medio di riflessione superficiale, $\rho_m = \frac{\sum_i S_i \rho_i}{S_{tot}}$.

q_v vale 1 a cielo aperto, 0,5 se dalla finestra si vede metà cielo e metà altri edifici, meno di 0,5 se si vede poco cielo.

Il valore di ψ_i si ricava da un grafico entrando con h/p (altezza su spessore del muro) intersecando la curva L/p (coefficiente di forma su spessore del muro).