

Parte II

ILLUMINOTECNICA

GRANDEZZE FOTOMETRICHE FONDAMENTALI

La doppia natura della luce, ondulatoria e corpuscolare, ha costituito in passato uno degli argomenti maggiormente dibattuti in ambito scientifico. Una delle prime teorie che tentavano di spiegare il fenomeno luminoso fu quella corpuscolare, secondo la quale la luce è costituita da piccolissime particelle che, muovendosi ad elevata velocità, sono in grado di penetrare nell'occhio umano provocando la sensazione della visione. Newton fu uno dei più autorevoli sostenitori della teoria corpuscolare: con essa, egli tentò di spiegare alcuni fenomeni come la riflessione e la rifrazione. Secondo la teoria corpuscolare, quando la luce passa da un mezzo meno denso ad uno più denso, come avviene ad esempio passando dall'aria all'acqua, le particelle vengono attratte dalla superficie di separazione che dà loro un impulso in grado di aumentarne la componente della quantità di moto in direzione perpendicolare alla superficie incrementando così la velocità di propagazione e deviando la traiettoria, in modo tale che la luce rifratta si avvicini alla normale alla superficie di separazione considerata. Con questa teoria, dunque, la velocità della luce risulta maggiore nei mezzi più densi rispetto a quelli meno densi, ipotesi che si rivelò poi falsa, esattamente 200 anni dopo quando Foucault, con un procedimento sperimentale, dimostrò il contrario.

Inoltre, la teoria corpuscolare prevedeva la propagazione della luce unicamente in linea retta e pertanto non era in grado di spiegare alcuni fenomeni, come la diffrazione, che non sono compatibili con tale ipotesi.

Foucault, con i suoi studi, diede un grosso impulso a nuove teorie in grado di spiegare i fenomeni legati alla propagazione dell'energia luminosa. In particolare si fece strada la teoria ondulatoria secondo la quale la luce si propaga per onde elettromagnetiche, perturbazioni periodiche nel tempo e nello spazio del campo elettromagnetico, prodotte da cariche in moto accelerato.

Thomas Young agli inizi del diciannovesimo secolo propose la teoria ondulatoria per spiegare il fenomeno dell'interferenza, mentre Huygens e Hooke furono tra gli scienziati che maggiormente sostennero la natura ondulatoria della luce, spiegando con essa gli stessi fenomeni elementari di riflessione e rifrazione che Newton aveva tentato di spiegare con la teoria corpuscolare, ma fu Augustin Fresnel che diede un grosso impulso all'accettazione della teoria ondulatoria effettuando numerosi esperimenti sulla interferenza e sulla diffrazione e formulando una base matematica per tale teoria.

Nel 1860 Maxwell pubblicò la sua teoria matematica dell'elettromagnetismo che prevedeva l'esistenza di onde elettromagnetiche che si propagano con la stessa velocità della luce (nel vuoto è circa 3×10^8 m/s). Sugerendo che questo accordo non era casuale propose che la natura della luce fosse di tipo ondulatorio.

La natura ondulatoria della luce, sebbene corretta, non è però in grado di spiegare alcuni fenomeni legati alla sua interazione con la materia. Fu proprio l'esperimento di Hertz del 1887, che confermava la teoria ondulatoria di Maxwell, che permise di scoprire l'effetto fotoelettrico, che può essere spiegato solo con un modello corpuscolare della luce, come dimostrò Einstein nel 1905. Fu pertanto reintrodotta la teoria corpuscolare, ipotizzando la doppia natura della luce, universalmente accettata a partire dagli anni 20 quando Davisson, Germer e Thompson dimostrarono che anche gli elettroni ed altre particelle simili hanno una doppia natura.

La teoria della meccanica quantistica, elaborata da illustri studiosi quali Schrödinger, Heisenberg e Dirac, mette d'accordo i due modelli, poiché spiega i fenomeni dell'interferenza e della diffrazione considerando la luce come un'onda, ed altri, quali quelli legati agli scambi energetici, con l'ipotesi della natura corpuscolare della luce, costituita da particelle di dimensioni molto piccole dette fotoni.

In sintesi possiamo affermare che, nello studio delle modalità di propagazione della luce, viene messa in evidenza la sua natura ondulatoria, mentre quella corpuscolare appare nei fenomeni legati all'interazione con la materia e agli scambi di energia. La natura corpuscolare della luce spesso non viene notata poiché il numero di particelle di luce (*fotoni*) presente in un fascio luminoso è molto elevato mentre il loro contenuto energetico è molto piccolo.

Le equazioni di Maxwell permettono di descrivere le modalità di propagazione della luce consentendo di determinare il valore del campo elettromagnetico in coordinate spazio-temporali. Tali equazioni presentano però in molti casi notevoli difficoltà nella loro soluzione e forniscono risultati di precisione addirittura eccessiva rispetto al grado di approssimazione che può essere ritenuto accettabile in molti settori della fisica applicata.

Nel caso di onde luminose, la lunghezza d'onda che le caratterizza è di molto inferiore alle dimensioni medie dei corpi con cui la luce interagisce in natura ($\lambda = 380 \div 780$ nm). In tali condizioni, anziché risolvere le equazioni di Maxwell, per lo studio delle modalità con cui la luce si propaga nello spazio ed interagisce con i corpi che lo occupano, è possibile adottare metodi approssimati, quale ad esempio quello dell'Ottica geometrica, che ipotizza l'approssimazione dei raggi e la propagazione della luce in linea retta.

In accordo con le deduzioni di Maxwell, la luce può dunque essere trattata come un'onda elettromagnetica caratterizzata da una lunghezza d'onda λ (m), un periodo T (s), una frequenza ν ($\text{Hz}=\text{s}^{-1}$), inverso del periodo, ed una velocità c ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

La relazione che esiste tra queste grandezze è quella stessa che vale per tutte le onde elettromagnetiche e meccaniche:

$$\lambda = c \cdot T \quad \Rightarrow \quad c = \lambda \cdot \nu$$

Al modello elettromagnetico, poi, viene accoppiato quello quantistico, secondo il quale l'energia non si trova distribuita in modo continuo ma concentrata in quantità discrete proporzionali alle frequenze:

$$\varepsilon = h \cdot \nu$$

dette *quanti di energia*.

h è la costante di Planck che vale $6,626 \cdot 10^{-34}$ (J⋅s) e ν la frequenza della radiazione.

La frequenza e la lunghezza d'onda di una radiazione sono dunque tra loro strettamente collegate. Al variare della lunghezza d'onda si individuano varie tipologie di onde elettromagnetiche che si differenziano tra di loro per i diversi effetti che producono.

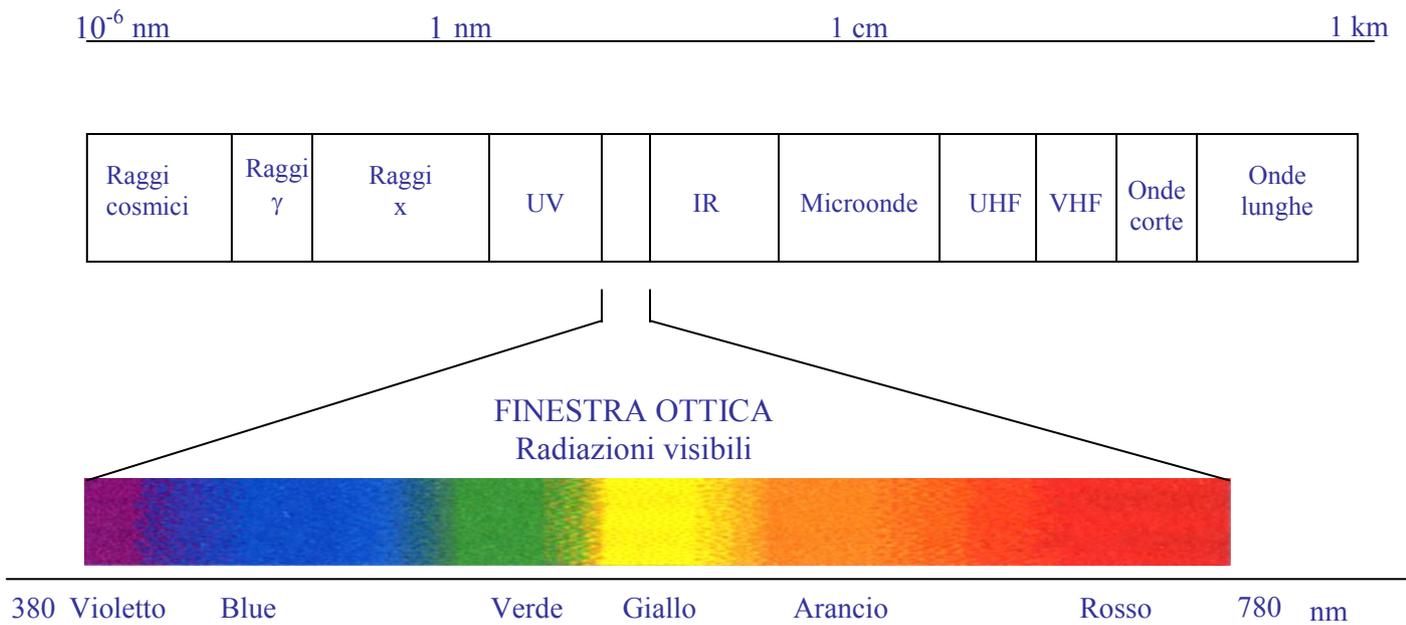
Le radiazioni di lunghezza d'onda compresa tra circa 380 e 780 nm ($0,38 \div 0,78$ μm) appartengono al settore del visibile e innescano nell'occhio il fenomeno della visione.

Per lunghezze d'onda superiori a 780 nm e fino a valori intorno a 10^5 nm si hanno i campi del vicino e del lontano IR, cui appartengono radiazioni elettromagnetiche responsabili del trasporto di energia termica. Al di sotto di 380 nm si hanno invece le radiazioni UV.

Lo spettro del visibile può essere ulteriormente suddiviso in campi che si differenziano tra di loro per la diversa sensazione cromatica provocata dalla luce emessa.

Nella figura seguente vengono evidenziati i vari settori dello spettro elettromagnetico della luce con i relativi colori puri che caratterizzano la luce emessa.

Figura 1: Finestra ottica e Spettro elettromagnetico



Assorbimento, Riflessione e Trasmissione di una superficie

Quando dell'energia radiante incide su una superficie, si suddivide in tre componenti: una riflessa, una assorbita ed una trasmessa. Indicando rispettivamente con E_a ed E_r ed E_t le tre componenti suddette e con E_i l'energia incidente, si può scrivere la seguente relazione:

$$E_a + E_r + E_t = E_i$$

da cui:

$$\frac{E_a}{E_i} + \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_t}{E_i} = \frac{E_i}{E_i} \Rightarrow a + r + t = 1$$

essendo ovviamente:

$$a = \frac{E_a}{E_i}; r = \frac{E_r}{E_i}; t = \frac{E_t}{E_i}$$

a , r e t sono detti, rispettivamente *coefficienti di assorbimento*, *di riflessione* e *di trasmissione* ed indicano *rispettivamente* la percentuale di energia incidente che viene di volta in volta assorbita, riflessa o trasmessa dalla superficie in oggetto.

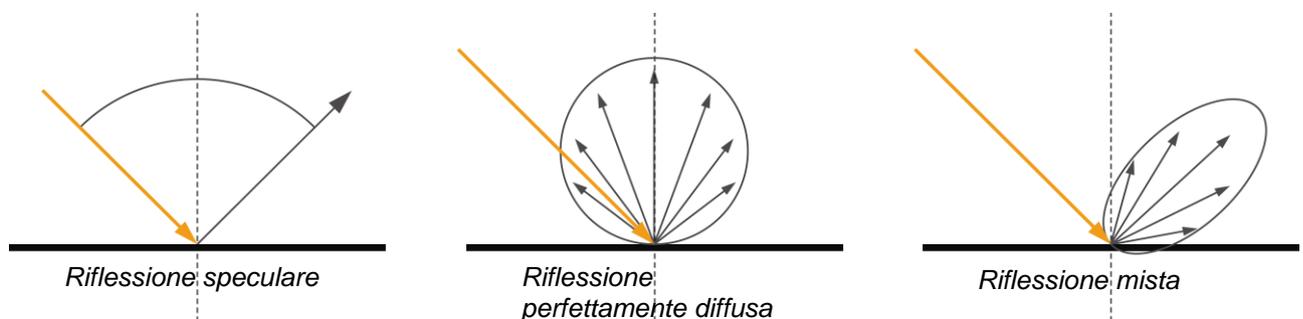
La riflessione può essere speculare o diffusa. La consideriamo speculare se la superficie riflettente è di dimensioni superiori a circa 4 volte la lunghezza d'onda della radiazione incidente e se si può considerare liscia, cioè dotata di asperità molto piccole (di dimensioni medie inferiori ad $1/4$ della lunghezza d'onda della radiazione incidente). Se una superficie dà luogo a riflessione speculare, questa segue le leggi dell'ottica

geometrica, per cui il raggio riflesso forma con la normale alla superficie un angolo uguale a quello formato con la medesima normale dall'angolo incidente.

La riflessione di tipo *diffusa*, al contrario, si presenta come un fenomeno più complesso nel quale l'energia riflessa può distribuirsi nelle varie direzioni intorno al punto di incidenza in maniera non regolare, oppure concentrarsi intorno ad una direzione preferenziale che è quella che caratterizzerebbe l'eventuale riflessione speculare (*riflessione mista*).

Un caso particolare è quello che si verifica quando la riflessione può essere considerata *perfettamente diffusa*, prodotta da una superficie detta "*lambertiana*". Questa presenta la caratteristica di riflettere energia raggiante in tutte le direzioni dello spazio con intensità della radiazione proporzionale al coseno dell'angolo formato con la normale alla superficie. In quest'ultima direzione si ha l'intensità massima della radiazione.

Figura 2: Riflessioni speculari e diffuse



Anche per ciò che riguarda la trasmissione, si può distinguere il comportamento di una superficie trasparente (o diafana), che si lascia attraversare dalla totalità della energia incidente, conservando la direzione di incidenza o deviando da questa in funzione dei valori assunti dagli indici di rifrazione dei due mezzi, oppure di una superficie traslucida in cui la trasmissione avviene in modo che le traiettorie dell'energia che attraversa la superficie assumono angolazioni irregolari nello spazio intorno alla superficie stessa.

ASPETTI FONDAMENTALI DELLA VISIONE

Il fenomeno della visione è legato all'effetto provocato sull'occhio umano dall'energia luminosa da cui è investito. Si tratta perciò di un fenomeno che presenta aspetti oggettivi, valutabili quantitativamente con le grandezze energetiche relative, ed aspetti soggettivi, legati alle modalità ed alle capacità percettive dell'occhio.

L'occhio è dotato, sulla parte anteriore, di una membrana trasparente denominata "*cornea*", sulla quale vanno ad incidere le radiazioni luminose provenienti da qualunque oggetto rientri nel campo visivo. Dietro la cornea si trova il *cristallino*, che è una lente elastica e trasparente la quale, modificando il suo raggio di curvatura, mette a fuoco l'immagine dell'oggetto osservato. Le radiazioni rifratte dalla parte anteriore dell'occhio vengono proiettate verso la zona posteriore dove incidono su una membrana, detta *retina*, sulla quale si forma una immagine rovesciata dell'oggetto. Sulla retina si trovano oltre 126 milioni di cellule nervose fotosensibili: i *coni* ed i *bastoncelli*, chiamati così per la loro forma. I bastoncelli sono molto più numerosi dei coni, sono circa 120 milioni distribuiti su tutta la retina. Essi sono molto sensibili alla luce, ma non sono in grado di distinguere i

colori e sono pertanto preposti alla visione di tipo notturno, detta scotopica. Al contrario i coni, meno numerosi (circa 6,5 milioni) e meno sensibili alla luce, reagiscono solo se stimolati da una energia molto intensa, tipica della visione diurna in cui sono percepibili in maniera distinta i vari colori dello spettro (*visione fotopica*). I coni, più concentrati in una zona della retina detta fovea, possono essere di tre tipi: rossi, blu e verdi. Ciascuno di essi contiene un fotopigmento differente sensibile ad onde luminose di lunghezza d'onda diversa. I coni ed i bastoncelli reagiscono all'energia luminosa entrante trasformando l'immagine rovesciata formata sulla retina in impulsi elettrici che vengono trasmessi al cervello dove i centri encefalici preposti li interpretano raddrizzando l'immagine e mostrandocela nel verso corretto.

Sensibilità dell'occhio

La sensibilità dell'occhio umano alla luce è dipendente non dall'energia raggiante incidente ma dalla potenza. Nell'occhio, infatti, avviene un fenomeno diverso da quello di una lastra fotografica. Questa viene impressionata in misura proporzionale all'energia incidente, data dal prodotto tra la potenza ed il tempo di esposizione. E' noto infatti che una buona fotografia è il risultato del giusto equilibrio tra il grado di apertura del diaframma ed il tempo di esposizione. Un tempo troppo breve può non essere sufficiente a far sì che l'immagine fotografata resti impressionata sulla pellicola, ma allo stesso modo, un tempo troppo lungo può provocare un ingresso eccessivo di luce che rischia di "bruciare" la pellicola producendo un'immagine troppo luminosa. La pellicola fotografica è dunque sensibile all'energia che riceve, per cui per una data potenza incidente, più lungo è il tempo di esposizione e più la pellicola resta impressionata.

L'occhio ha, per fortuna, un comportamento diverso. Infatti, dopo un breve tempo di adattamento, esso raggiunge un certo grado di sensibilizzazione e non modifica nel tempo l'immagine ricevuta sebbene l'energia raggiante aumenti proporzionalmente al tempo di esposizione.

La sensazione percepita dall'occhio investito da radiazioni luminose è influenzata sia qualitativamente che quantitativamente dalle lunghezze d'onda che le caratterizzano. Infatti, a radiazioni di diversa lunghezza d'onda corrispondono reazioni dell'occhio umano qualitativamente diverse, che danno luogo a differenti sensazioni cromatiche. La tabella seguente indica le diverse sensazioni cromatiche dell'occhio umano relative a vari campi di lunghezza d'onda. Questi ultimi sono ovviamente da considerare con limiti non rigidi ma approssimati.

Tabella 1 Colori percepiti dall'occhio umano in funzione della lunghezza d'onda

Colore	Lunghezza d'onda λ (nm)
Violetto lontano	380÷420
Violetto	420÷440
Blue	440÷460
Blue-Verde	460÷510
Verde	510÷560
Giallo	560÷610
Arancio	610÷660
Rosso	660÷780

All'interno dello spettro del visibile, inoltre, la sensazione non è quantitativamente la stessa nei vari settori cromatici. In particolare, l'occhio ha la massima sensibilità al centro dello spettro e minima agli estremi. Ciò significa che una radiazione di colore violetto o

rosso, per produrre la stessa sensazione quantitativa nell'occhio umano, deve avere un contenuto energetico molto più elevato di una radiazione emessa alla lunghezza d'onda del giallo-verde, in corrispondenza della quale la sensibilità dell'occhio è massima. Questo equivale a dire che la stessa potenza radiante appartenente al campo del visibile produce una sensazione più intensa se caratterizzata dalla lunghezza d'onda del giallo-verde e meno intensa se invece appartenente al campo del violetto o del rosso.

In condizioni di visione fotopica, caratterizzata cioè da una luminosità sufficiente a consentire la percezione dei colori, la lunghezza d'onda di massima sensibilità dell'occhio è pari a 555 nm (0,555 μm), mentre in condizioni di visione scotopica, quando cioè la luminosità è insufficiente alla percezione dei colori, questo valore è leggermente inferiore e pari a 510 nm (0,51 μm).

Cerchiamo a questo punto di quantificare la sensazione visiva in termini relativi cioè rapportando le capacità visive dell'occhio alle diverse lunghezze d'onda con quella relativa alla lunghezza d'onda di massima sensibilità.

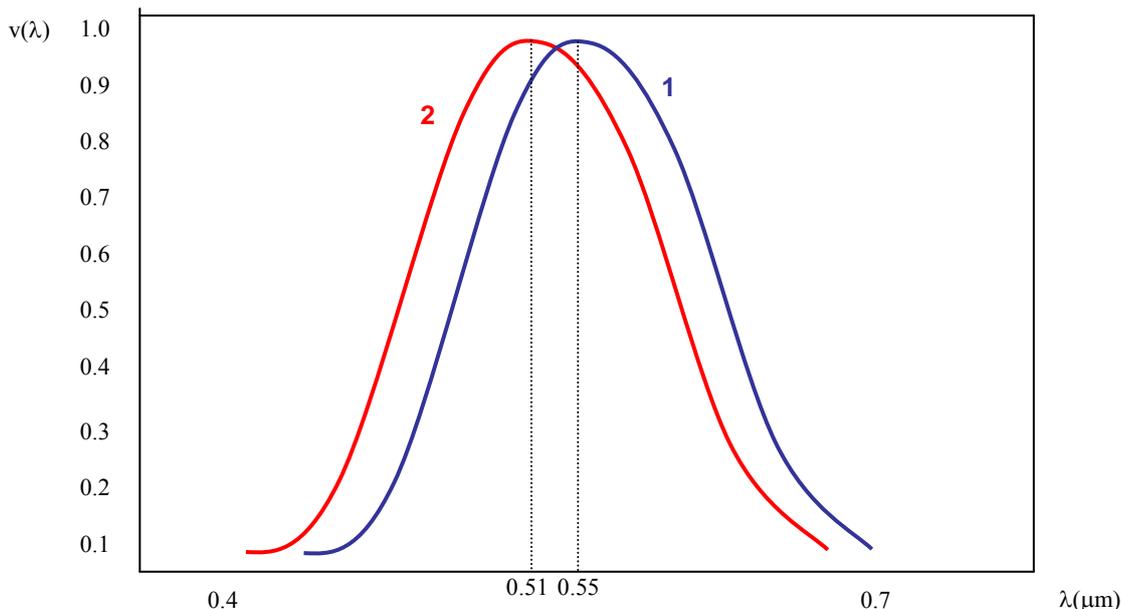
Se indichiamo con $V(\lambda)$ la visibilità rispetto alla generica lunghezza d'onda λ , e con V_{\max} quella relativa alla lunghezza d'onda di massima sensibilità, possiamo definire il coefficiente di visibilità $v(\lambda)$ con l'espressione seguente:

$$v(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{V_{\max}}$$

Poiché la visibilità varia da 0 a V_{\max} il coefficiente di visibilità assume valori variabili tra 0 ed 1: 0 agli estremi del campo ed 1 al centro, in corrispondenza della lunghezza d'onda di massima visibilità.

La figura 3 seguente riporta le curve di *visibilità fotopica* (1) e *scotopica* (2), in cui in ordinate sono riportati i valori del coefficiente di visibilità ed in ascisse le lunghezze d'onda.

Figura 3: *Visibilità fotopica* (1) e *scotopica* (2)



GRANDEZZE FOTOMETRICHE

Le grandezze energetiche radianti non sono sufficienti a quantificare gli effetti dovuti a fenomeni luminosi, poiché, come abbiamo visto, l'esperienza visiva è dovuta alle caratteristiche oggettive di una radiazione luminosa e contemporaneamente alle capacità visive dell'occhio, che sono efficaci solo all'interno del campo compreso tra 380 e 780 nm e che dipendono dalla lunghezza d'onda all'interno di questo stesso range. Vanno pertanto introdotte delle grandezze, dette "fotometriche", che conservando l'informazione del contenuto energetico di una radiazione, siano in grado di quantificare al contempo gli effetti provocati da tale energia sull'occhio in termini di sensazione visiva.

Flusso luminoso

Il flusso luminoso misura la potenza radiante emessa da una sorgente pesata dalla curva di visibilità in modo da tenere conto della risposta dell'occhio umano alla sollecitazione ricevuta e della composizione spettrale della radiazione. Tale grandezza si misura in *lumen* (lm).

Supponiamo che una sorgente emetta una potenza radiante pari a $W(\lambda)$ in corrispondenza della lunghezza d'onda λ . Se λ coincide con la lunghezza d'onda di massima sensibilità dell'occhio, ad ogni Watt di potenza radiante emessa corrisponde un valore costante del flusso luminoso, convenzionalmente posto pari a 683 lm; per cui il flusso luminoso prodotto da una potenza radiante qualsiasi in corrispondenza della λ di massima sensibilità dell'occhio vale il prodotto tra la potenza espressa in Watt e la costante K , che vale 683 lm/W.

Se invece la potenza monocromatica considerata è emessa a diversi valori della lunghezza d'onda, il flusso luminoso prodotto sarà proporzionale alla costante K in funzione del coefficiente di visibilità. Possiamo in sintesi scrivere quanto segue:

- *Flusso monocromatico emesso per $\lambda = 555$ nm:*

$$\Phi = K \cdot W(\lambda) \quad \text{con } K = 683 \text{ lm/W}$$

essendo unitario il coefficiente di visibilità $v(\lambda = 555 \text{ nm})$.

- *Flusso monocromatico emesso alla generica lunghezza d'onda λ :*

$$\Phi = K \cdot v(\lambda) \cdot W(\lambda)$$

Solitamente un'energia luminosa viene emessa non in corrispondenza di un solo valore di lunghezza d'onda, ma all'interno di un intervallo di lunghezze d'onda, in cui può avere una distribuzione discreta o continua. In questi casi possiamo definire la grandezza fotometrica in oggetto nel modo seguente:

- *Flusso policromatico con distribuzione discreta della potenza radiante articolata in n valori a diverse lunghezze d'onda:*

$$\Phi = \sum_{i=1}^n K \cdot v(\lambda_i) \cdot W(\lambda_i)$$

- *Flusso con distribuzione continua della potenza radiante tra λ_1 e λ_2 :*

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K \cdot v(\lambda) \cdot W(\lambda) \cdot d\lambda = K \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v(\lambda) \cdot W(\lambda) \cdot d\lambda$$

Se il campo di emissione è esteso all'intero campo di visibilità (380 ÷ 780 nm) allora l'integrale suddetto diventa:

$$\Phi = K \cdot \int_{380}^{780} v(\lambda) \cdot W(\lambda) \cdot d\lambda$$

Intensità luminosa

Il flusso luminoso emesso da una sorgente si ripartisce in genere nelle varie direzioni dello spazio in maniera non uniforme. E' molto importante determinare la distribuzione spaziale del flusso luminoso nelle varie direzioni ai fini della previsione degli effetti che tale ripartizione avrà sull'efficacia minore o maggiore con cui le superfici colpite verranno illuminate.

Per far questo si introduce una grandezza fotometrica, detta "*Intensità luminosa*" che, nell'ipotesi di sorgente puntiforme, si definisce proprio come il rapporto tra il flusso luminoso infinitesimo e l'angolo solido all'interno del quale tale flusso è contenuto nella generica direzione intorno alla sorgente stessa.

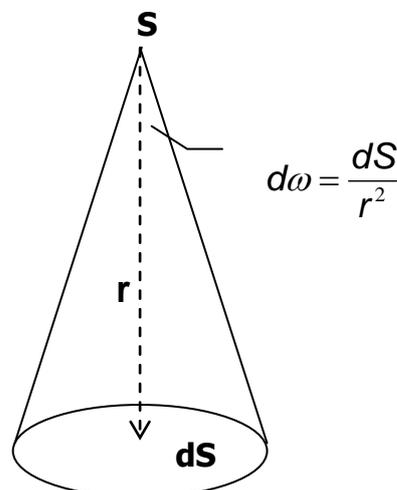
Indicando, con riferimento alla figura 4, con I l'intensità luminosa, con $d\omega$ l'angolo solido infinitesimo considerato e con $d\Phi$ il flusso luminoso in esso contenuto, si ha:

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

Inoltre, se dS è la superficie infinitesima intercettata dall'angolo solido $d\omega$ ad una distanza r dalla sorgente, si ha:

$$d\omega = \frac{dS}{r^2}$$

Figura 4: Angolo solido



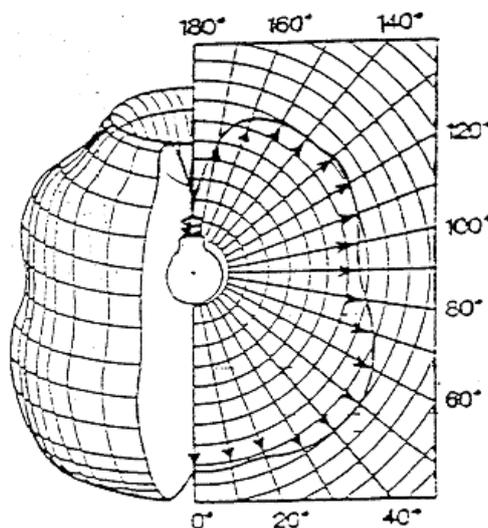
L'intensità luminosa si misura dunque in $\text{lm/sr} = \text{candele (cd)}$ e può essere definita anche come la *densità spaziale angolare* del flusso luminoso.

Conoscere il valore della I per le varie direzioni intorno alla sorgente consente di costruire il cosiddetto "solido fotometrico", in cui, attraverso una rappresentazione vettoriale delle intensità luminose si descrive la ripartizione spaziale del flusso luminoso intorno alla sorgente.

Nella figura 5 viene rappresentato il solido fotometrico di una lampada ad incandescenza in coordinate polari con centro nel punto in cui è posizionata la sorgente; l'angolo indica la direzione di emissione e la lunghezza del raggio il valore dell'intensità in candele.

Solitamente i dati fotometrici sono forniti dalle ditte costruttrici in relazione a ciascun apparecchio illuminante. Per semplicità, vengono fornite delle curve fotometriche ottenute sezionando il solido fotometrico secondo piani notevoli.

Figura 5: Solido fotometrico di una sorgente ad incandescenza



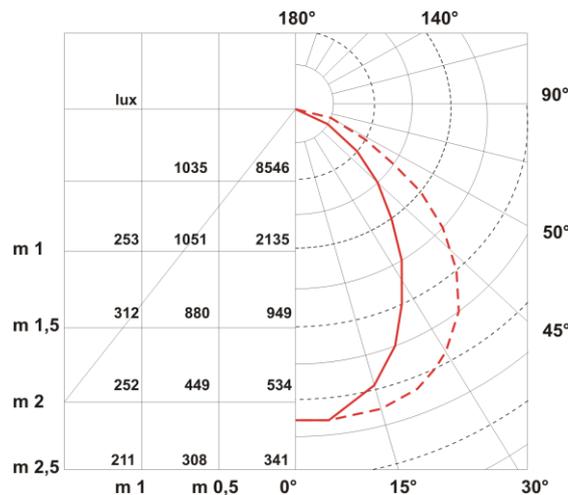
Se la sorgente produce una emissione assialsimmetrica, come quella della figura precedente, è sufficiente un unico piano di sezionamento per fornire la rappresentazione piana dei dati fotometrici, poiché l'emissione ha le stesse caratteristiche in tutti i piani di sezionamento del solido fotometrico.

Più comunemente l'emissione non è simmetrica, per cui vengono individuate due o più direzioni particolarmente rappresentative (es. longitudinale e trasversale) e i dati fotometrici sono rappresentati in due dimensioni secondo questi piani di sezionamento (cfr. Figura 6).

Spesso capita che un corpo illuminante possa ospitare lampade di diversa potenza con valori di intensità emessa ovviamente diversi, proporzionali al valore della potenza installata. Risulta comodo allora fornire i dati fotometrici riferiti all'unità di valore del flusso luminoso in modo da poter utilizzare gli stessi dati per le diverse soluzioni semplicemente moltiplicando per il valore del flusso effettivo emesso di volta in volta dal corpo illuminante in oggetto.

In questo caso i dati sono espressi in cd/klm .

Figura 6: Curve fotometriche



Dalla definizione di I possiamo ricavare l'espressione del flusso emesso in tutto lo spazio circondante la sorgente:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad \Rightarrow \quad d\Phi = I \cdot d\omega \quad \Rightarrow \quad \Phi = \int_{\Omega} I \cdot d\omega$$

essendo Ω l'angolo solido all'interno del quale troviamo il flusso luminoso emesso dalla sorgente.

Se l'emissione avviene nell'intero spazio che circonda la sorgente l'integrale diventa:

$$\Phi = \int_0^{4\pi} I \cdot d\omega$$

E' ovvio che la determinazione del flusso dalla relazione scritta è possibile solo se risulta nota la relazione tra I ed ω . Il caso più semplice è quello che prevede un'intensità luminosa costante in tutte le direzioni. In tale situazione, se è interessato tutto lo spazio che circonda la sorgente, si ha:

$$\Phi = \int_0^{4\pi} I \cdot d\omega = I \cdot \int_0^{4\pi} d\omega = 4\pi \cdot I$$

Nel caso in cui sia Ω l'angolo solido in cui avviene l'emissione e l'intensità risulta costante in tutte le direzioni, la relazione diventa:

$$\Phi = I \cdot \Omega$$

che ci permette di definire il *lumen* come il *flusso luminoso emesso da una sorgente di intensità luminosa uniforme e unitaria in un angolo solido di 1 sr.*

Illuminamento

L'illuminamento è la grandezza fotometrica che descrive quantitativamente gli effetti che il flusso luminoso emesso da una sorgente provoca sulla superficie illuminata, detta piano di lavoro.

Consideriamo una superficie S qualsiasi su cui incide il flusso luminoso proveniente da una sorgente. Qualunque sia la sorgente e la posizione reciproca tra essa e la superficie illuminata, il flusso non si distribuisce mai in maniera completamente uniforme sulla superficie stessa, pertanto sarà necessario individuare una porzione infinitesima dS della superficie sulla quale poter ipotizzare una incidenza uniforme del flusso luminoso.

In questa ipotesi definiamo "Illuminamento" E il rapporto tra il flusso luminoso incidente dΦ e la superficie illuminata dS:

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

L'illuminamento E si misura in lux e si ha, ovviamente: $lux = 1 \frac{lm}{m^2}$

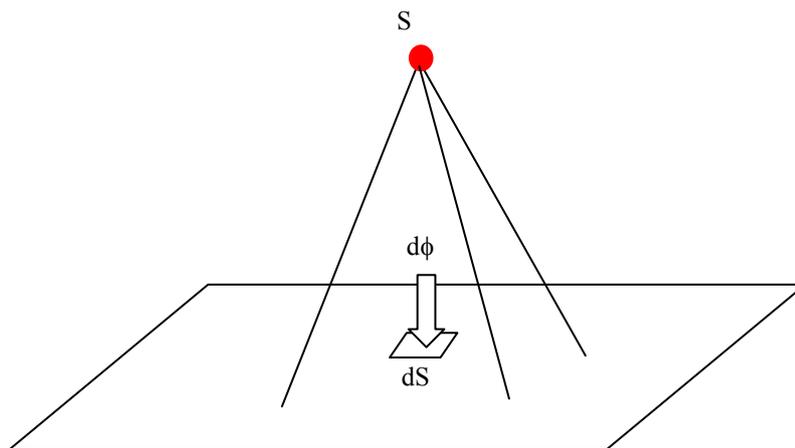
Si ha naturalmente:

$$d\Phi = E \cdot dS \quad \Rightarrow \quad \Phi = \int_S E \cdot dS$$

Nel caso particolare in cui si possa considerare E uniforme sull'intera superficie S, allora si può scrivere:

$$\Phi = E \cdot \int_S dS = E \cdot S$$

Figura 7: Illuminamento

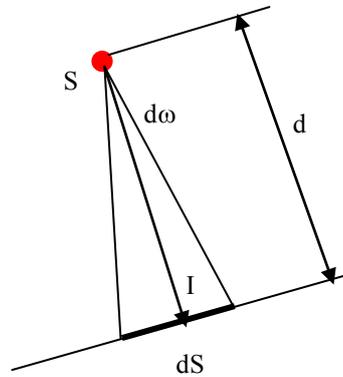


Il valore di E sul piano di lavoro è di solito il dato quantitativo di progetto nel dimensionamento di un impianto di illuminazione e il suo valore ottimale viene indicato dalle norme in funzione della destinazione d'uso dell'ambiente in cui deve essere realizzato l'impianto stesso.

LEGGE DELL'INVERSO DEL QUADRATO DELLA DISTANZA

Consideriamo una sorgente luminosa puntiforme S ed indichiamo con I l'intensità luminosa da essa emessa nella generica direzione nello spazio intorno alla sorgente (cfr. Figura 8).

Figura 8



Indichiamo con $d\omega$ l'angolo solido infinitesimo intorno alla direzione di I e con dS la superficie infinitesima che esso sottende perpendicolarmente alla medesima direzione. Se d è la distanza tra la sorgente e la superficie considerata, si può scrivere:

$$dS = d^2 \cdot d\omega \Rightarrow d\omega = \frac{dS}{d^2}$$

L'illuminamento E prodotto sulla dS sarà dato dalla:

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

Essendo $d\Phi$ il flusso emesso dalla sorgente all'interno dell'angolo $d\omega$.

Si ha pertanto:

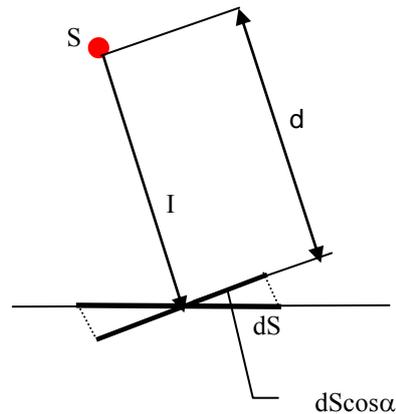
$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} = \frac{d\Phi}{dS} \cdot d^2 = E \cdot d^2 \quad \Rightarrow \quad E = \frac{I}{d^2}$$

che è l'espressione analitica della legge dell'inverso del quadrato della distanza, la quale afferma che: *l'illuminamento prodotto da una sorgente puntiforme che emette con una intensità luminosa I in una certa direzione su una superficie piana perpendicolare alla direzione medesima è direttamente proporzionale al valore della intensità ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra la sorgente e la superficie considerata.*

Se l'incidenza rispetto alla superficie illuminata è obliqua, si può applicare la legge dell'inverso del quadrato della distanza considerando la proiezione della superficie infinitesima dS in direzione perpendicolare a quella dell'intensità luminosa. In questo modo, facendo riferimento alla figura 9, possiamo scrivere:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I \cdot d\omega}{dS} = \frac{I \cdot \frac{dS \cdot \cos \alpha}{d^2}}{dS} = \frac{I}{d^2} \cdot \cos \alpha$$

Figura 9: Legge dell'inverso del quadrato della distanza con incidenza obliqua



Per cui l'illuminamento prodotto da una intensità luminosa I su una superficie inclinata di un angolo α rispetto a quella ad essa perpendicolare (incidenza obliqua) è direttamente proporzionale all'intensità luminosa ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra la sorgente e la superficie, attraverso il coseno dell'angolo α che definisce la direzione di incidenza sulla superficie.

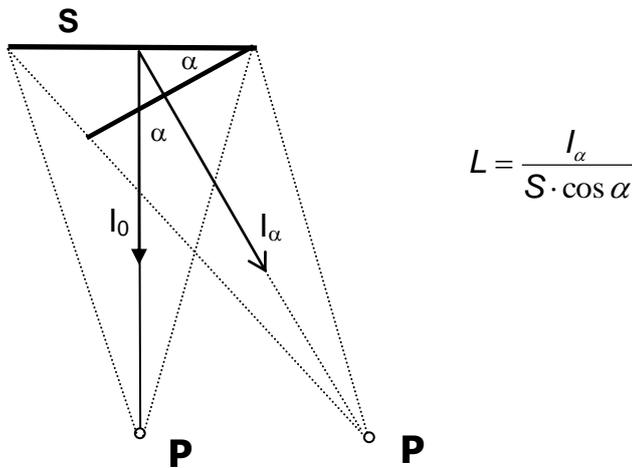
Luminanza

Una superficie illuminata riflette una certa parte del flusso luminoso che su di essa incide in misura tanto maggiore quanto più chiara è la tinta da cui è caratterizzata. La riflessione può essere poi tanto più di tipo speculare quanto più piccole sono le asperità della superficie, cioè quanto più liscia è la superficie stessa. Al contrario, una superficie ruvida riflette diffusamente interessando più direzioni nello spazio. La diffusione è tanto più uniforme quanto più numerose sono le direzioni nello spazio interessate dalla riflessione. Il tipo di riflessione rende la superficie illuminata più o meno brillante all'occhio umano, ma è chiaro che alla determinazione di questo effetto concorrono sia la quantità di flusso luminoso che esce dalla superficie considerata sia le dimensioni della superficie stessa. A parità di flusso riflesso una superficie piccola appare più brillante di una di maggiori dimensioni. La sensazione di brillantezza, tipica di una superficie riflettente, può anche essere attribuita ad una sorgente estesa che emette un certo flusso luminoso. Tale flusso può considerarsi emanato non da un punto ma da una superficie. Appartengono a questa tipologia praticamente tutte le sorgenti se osservate da piccole distanze, in particolare gli apparecchi illuminanti che ospitano lampade di grosse dimensioni, quali ad esempio le lampade fluorescenti tubolari. In prima approssimazione, una sorgente di dimensioni finite può essere ritenuta puntiforme, ai fini del calcolo delle grandezze fotometriche, se osservata da una distanza superiore a cinque volte la sua dimensione prevalente. E' invece da ritenersi estesa in tutti gli altri casi.

Per descrivere meglio la sensazione provocata sull'occhio umano da una superficie brillante, sia essa emittente o riflettente, introduciamo la grandezza fotometrica "Luminanza" L che si definisce come il rapporto tra l'intensità luminosa nella direzione di osservazione e la proiezione della superficie in oggetto perpendicolarmente alla direzione di vista.

$$L = \frac{I_{\alpha}}{S \cdot \cos \alpha}$$

Figura 10: Luminanza di una superficie



Tale grandezza si misura in $\text{cd/m}^2 = \text{nit}$.

Se la superficie S viene vista in direzione perpendicolare, si ha dunque:

$$\alpha = 0 \Rightarrow L_0 = \frac{I_0}{S}$$

Legge di Lambert o del coseno

Un caso particolare si verifica quando una superficie riflettente o emittente (sorgente riflessa o diretta) si presenta con una luminanza uniforme, indipendente cioè dalla direzione di vista. Tale superficie viene detta *lambertiana* ed è da considerarsi perfettamente diffondente.

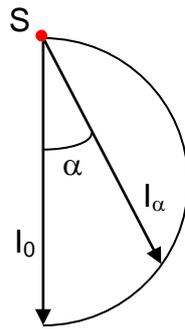
Considerata una superficie lambertiana ed indicate, rispettivamente, con L_0 e con L_α le luminanze in direzione perpendicolare e nella generica direzione di osservazione α , per quanto detto si ha:

$$L_0 = L_\alpha \Rightarrow \frac{I_0}{S} = \frac{I_\alpha}{S \cdot \cos \alpha} \Rightarrow I_0 \cdot S \cdot \cos \alpha = I_\alpha \cdot S \Rightarrow I_\alpha = I_0 \cdot \cos \alpha$$

che è l'espressione analitica delle legge di Lambert la quale afferma che: *L'intensità luminosa emessa da una superficie lambertiana (a luminanza indipendente dalla direzione di vista) nella generica direzione α è proporzionale alla intensità in direzione perpendicolare I_0 secondo il coseno dell'angolo α formato dalle due direzioni.*

L'andamento delle intensità luminose prodotte da una superficie lambertiana è dunque tale da dar luogo ad una curva fotometrica semicircolare; infatti la relazione scritta è quella esistente tra l'ipotenusa ed il cateto di un triangolo rettangolo ed ogni triangolo inscritto in una semicirconferenza è rettangolo (cfr. Figura 11)

Figura 11: Curva fotometrica semicircolare di una sorgente lambertiana



Le formule scritte possono essere utilizzate per calcolare la luminanza di un corpo illuminante nelle varie direzioni di vista quando questa non viene esplicitamente fornita dal costruttore. Se indichiamo con S_{lum} la luminanza di un corpo illuminante in direzione verticale verso il basso ed I_0 l'intensità emessa in quella stessa direzione, si ha:

$$L_0 = \frac{I_0}{S_{lum}}$$

Allo stesso modo la luminanza del corpo illuminante nella direzione α va calcolata considerando la superficie apparente dello stesso, cioè la proiezione di quella reale in direzione perpendicolare alla direzione di vista $S_{lum} \cdot \cos \alpha$

$$L_\alpha = \frac{I_\alpha}{S_{lum} \cdot \cos \alpha}$$

SORGENTI LUMINOSE

Note storiche introduttive

Fino al 19° secolo l'illuminazione artificiale è stata affidata esclusivamente alla luce della fiamma ottenuta bruciando dapprima legna ed altri combustibili fossili sotto forma di torce e, successivamente, pece, grassi ed oli animali, oli vegetali e cera. Nell'antichità tanto era il rispetto per il fuoco, indispensabile non soltanto per l'illuminazione, che ad esso vennero associate divinità importanti, al cui culto si votarono completamente sacerdoti e sacerdotesse con il compito di alimentarlo e mantenerlo sempre acceso sotto la minaccia di pene severissime: accendere il fuoco non era così agevole come al giorno d'oggi¹.

Le prime vere lampade che illuminavano le notti degli uomini preistorici erano ricavate da grosse conchiglie o da pietre scavate. La parte concava fungeva da serbatoio per il grasso o l'olio ove erano immersi arbusti o ramoscelli di giunco, precursori dei più moderni stoppini o lucignoli, sulla cui punta si sviluppava la fiamma. L'uso dei rametti di giunco sopravvisse fino a tutto il XIX secolo ad illuminare le modeste abitazioni disperse nelle nebbie della campagna inglese.

Gli Egiziani usavano lampade in pietra munite di stoppini di cotone: novità importante è stato l'artificio semplice ma intelligente dello stoppino di tessuto che, oltre a fissare il punto di sviluppo della fiamma ottenendo notevoli miglioramenti nell'illuminazione, consentiva di alimentare con regolarità la combustione mediante la risalita per capillarità del combustibile liquido.

I Greci ed i Romani usavano lampade di bronzo o di materiale fittile quale il coccio e la ceramica. Le lampade dei Greci dapprima erano dei semplici piatti ove bruciava olio vegetale di oliva, di lino, di palma, di noci o di altre piante mentre lo stoppino galleggiava libero sulla superficie dell'olio. Successivamente apparvero lampade dotate di una semplice scanalatura sul bordo che, trattenendo lo stoppino, aveva la funzione di localizzare la fiamma.

Più tardi apparvero le prime candele confezionate con la tecnica del rivestimento a più riprese di uno stoppino con cera di api e pece. Le comuni candele moderne, dette candele steariche, sono confezionate mediante fusione e colatura, in uno stampo cilindrico coassiale allo stoppino, di una miscela di acido palmitico ed acido stearico² che alla temperatura ordinaria si presentano allo stato solido con bianche e lucide superfici untuose al tatto ma che al calore della fiamma si liquefanno. Lo stoppino è di cotone o di lino puro imbevuto di una soluzione di acido bórico (H_3BO_3) e di tetraborato di sodio ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) comunemente chiamato *borace*³.

Data la fragilità delle candele steariche la miscela è stata successivamente rinforzata con l'aggiunta del 50% di paraffina, derivato del petrolio utilizzato anche nella produzione dei cerini. La cera a base di paraffina fonde tra 66 °C e 85 °C.

Attualmente le candele sono usate soltanto per scopi decorativi, per creare atmosfere soffuse, piacevoli e talora complici e, ovviamente, abbondano soprattutto nei luoghi di culto legati alla devozione ed alla fede religiosa.

Nel corso dei secoli apparvero poche novità importanti nel settore dell'illuminazione riguardanti esclusivamente le tecniche artigiane di produzione delle lampade e la diversificazione delle fonti del combustibile attingendo a quanto più disponibile nel

¹ La prima fabbrica di fiammiferi fu avviata nel 1844 dallo svedese J.E. Lindstrom.

² L'acido stearico ($\sigma\tau\epsilon\alpha\rho$, stéar = sego), la cui formula è $CH_3(CH_2)_{16}COOH$, è preparato commercialmente trattando grassi animali, principalmente di montoni e di buoi, con acqua ad alta temperatura ed alta pressione. La temperatura di fusione dell'acido stearico è 70 °C.

³ Dall'arabo buràq o da bauràq del Maghreb = *bianco*.

territorio: grasso di bue, strutto o sugna di maiale, grasso di montone o di altro animale, il sego ottenuto da grasso animale, vari oli vegetali ed animali e tra questi, oltre a quelli già citati, l'olio di colza, l'olio di balena o di altri pesci e, dalla metà del 1800 con lo sviluppo dell'industria del petrolio, il cherosene.

Quindi, a parte la fantasiosa novità della lampada di Aladino e del suo Genio che non illuminava ma, e non è poco, esaudiva desideri, purtroppo solo per il fortunato possessore, pochissime sono state le novità di un certo interesse, tra le quali è da citare l'accorgimento di contenere la fiamma entro spazi limitati da superfici diffondenti che miglioravano la distribuzione della luce o da superfici riflettenti per convogliare e concentrare il fascio luminoso su aree limitate come, per esempio, per ottenere particolari effetti scenografici nelle rappresentazioni teatrali; ma nulla sostanzialmente di nuovo fino alla comparsa della lampada ad olio di Argand⁴ messa a punto nel 1874.

La lampada ad olio di Argand era dotata di uno stoppino sistemato tra due tubi metallici cilindrici coassiali. Il tubo più interno fungeva da condotto dell'aria che per convezione saliva proprio nel mezzo della fiamma. Il flusso d'aria ascendente poteva essere regolato manualmente per ottimizzare la combustione. Un assistente di Argand ebbe l'idea di proteggere la fiamma con un camino di vetro chiaro trasparente per aumentare il tiraggio e per assicurare una completa combustione dell'olio. Il flusso luminoso di una lampada di Argand risultava circa dieci volte superiore a quello di una lampada ad olio tradizionale di pari grandezza, era di luce più bianca ma il consumo d'olio era più elevato.

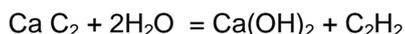
Nei primi anni del XIX secolo si diffuse l'uso di lampade a gas che presentavano il pregio notevole di un più esteso sviluppo della fiamma potendo disporre di più ugelli vicini. I gas più usati sono stati l'acetilene⁵, il butano, il gas di carbone, il gas naturale, il gas d'acqua⁶ ed il gas illuminante altrimenti detto gas luce⁷.

Risalgono a questo periodo l'avvio della produzione a livello industriale e la razionalizzazione della distribuzione del gas da carbone limitatamente, però, a beneficio dei grandi centri urbani con l'esclusione totale dei piccoli centri e delle abitazioni isolate.

Fu William Murdock, ingegnere ed inventore scozzese (1754-1839), a sviluppare e commercializzare le prime lampade a gas. Nel 1792, ben conscio del rischio di esplosioni e, si può supporre, senza la copertura di una qualche polizza assicurativa, illuminò con successo la sua abitazione con il gas di carbone. Nel 1802 illuminò l'esterno di una fabbrica, nel 1803 ne illuminò l'interno e via via illuminò ben 900 cotonifici. Dai primi del 1800 le lampade a gas illuminarono le strade di Londra e quelle di molte altre città europee ed americane. A Londra venne illuminato a gas anche il luogo ove veniva praticato, sin dal XVI secolo, il gioco, precursore del croquet, noto con il nome italiano di Palla a Maglio o con il nome francese Pale-Maille (da cui il nome contaminato in inglese

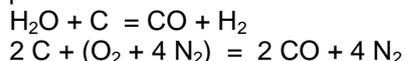
⁴ Francois Pierre Aimé Argand fisico di Ginevra (1755-1803).

⁵ L'acetilene (C₂H₂) può essere prodotta anche localmente e, quindi, ebbe largo uso nei paesi, nei villaggi e nelle aree rurali, dove la rete di distribuzione del gas non arrivava. Può essere prodotta trattando con acqua il *carburo di calcio*:



A livello industriale può essere prodotta secondo il metodo più recente della combustione incompleta del metano. L'acetilene rilascia un odore sgradevole che richiede un continuo rinnovo d'aria nelle case. La fiamma ha una elevata efficienza luminosa ed emette una luce quasi uguale a quella naturale del sole con alta resa dei colori.

⁶ Il "gas d'acqua" è una miscela di idrogeno, ossido di carbonio, anidride carbonica ed azoto ottenuta insufflando vapore d'acqua ed aria su coke rovente al colore bianco:



dove (O₂ + 4 N₂) è praticamente l'aria, 2 CO + 4 N₂ è il cosiddetto "gas d'aria".

Il gas d'acqua è detto anche gas blu per la colorazione bluastra della fiamma.

⁷ Il gas luce è una miscela di idrogeno, ossido di carbonio, metano ed idrocarburi vari ottenuta distillando il litantrace.

Pall Mall, oggi famoso viale). Nel 1854 venne completata a Roma la sostituzione delle lampade ad olio con quelle a gas ad opera della Società Anglo Romana.

In questo periodo entrarono a far parte delle scenografie dei marciapiedi delle grandi città i caratteristici fanali che avevano la funzione di proteggere la fiamma delle lampade, ad olio prima e a gas poi, entro involucri in vetro sostenuti alla sommità di colonnine o all'estremità di mensole in ferro ispirate ad una certa grazia floreale o ad una briosa fantasia geometrica.

La luce della fiamma delle lampade a gas era piuttosto giallognola e risultava di un pallore spiacevolmente cadaverico sul viso delle persone. Inoltre, il grosso problema non solo delle lampade a gas ma di tutte le lampade a fiamma libera era il fastidio agli occhi provocato dal tremolio della luce diffusa a sprazzi con movimenti repentini e casuali di luci ed ombre. Il camino di vetro di Argand in parte aveva risolto tale problema proteggendo la fiamma dai capricci delle correnti d'aria, mentre la reticella incandescente di Auer⁸, con la sua elevata inerzia termica, lo risolse definitivamente: la incandescenza della reticella non risente degli istantanei tremolii della fiamma fungendo da "volano stabilizzatore".

La reticella di forma sferica o cilindrica è un tessuto di cotone impregnato da una soluzione al 90 % di nitrato di torio⁹ e 10% di trinitrato di Cerio¹⁰. Con il calore della fiamma la soluzione si ossida e diventa incandescente emettendo una luce molto intensa con una elevata emissione nel visibile. Il supporto di tessuto brucia e scompare alle prime accensioni lasciando la struttura estremamente fragile agli urti meccanici. Ciononostante, ad Auer va riconosciuto il merito di aver trovato un materiale molto resistente al calore in grado di sopportare i ripetuti cicli di accensioni e spegnimenti. La reticella di Auer aumentò e migliorò la qualità della luce rispetto a quella delle lampade a gas tradizionali ma irradiava luce alquanto verdastra che, tipica della emissione dei sali usati, dava colorazioni niente affatto gradevoli al contrario dell'effetto piacevole e caldo prodotto dalla luce delle candele: questo confronto non derivava soltanto dal vezzo critico dell'immane "laudator temporis acti" (nostalgico del tempo che fu) ma era il risultato reale del confronto qualitativo della resa dei colori che fece rimpiangere per un certo periodo la luce tremula della vecchia candela.

Anche al giorno d'oggi sono usate lampade a reticella incandescente con tessuto di supporto di rayon (seta artificiale) soprattutto per scopi decorativi o in luoghi di campeggio o di pernottamento provvisorio come nelle tende o nei campers.

Con la scoperta delle leggi della elettricità le tecniche di illuminazione hanno avuto un notevole impulso che ha rivoluzionato completamente i modi di produzione della luce fino ai nostri giorni con una notevole molteplicità delle tipologie delle sorgenti luminose come si può notare nelle descrizioni riportate con dovizia di particolari nei cataloghi illustrativi delle ditte produttrici: varie sono le forme e le dimensioni ideate per la giusta integrazione negli ambienti, varie sono le rese dei colori per la produzione di effetti particolari, varia è la restituzione dei colori delle superfici illuminate. Le molteplici tipologie di sorgenti luminose sono però riconducibili ai seguenti meccanismi fondamentali di emissione della luce, in base ai quali è possibile catalogare tutte le lampade esistenti in: lampade elettriche ad incandescenza, lampade elettriche a scarica nei gas, lampade a tecnologia LED (Light Emitting Diode).

⁸ Carl Auer Barone di Welsbach, nato a Vienna l'1.9.1858 e morto a Treibach l'8.4.1929.

⁹ Il Torio deriva il suo nome da Thor, figlio del dio Odino ed a sua volta dio del tuono e del fulmine nella mitologia scandinava.

¹⁰ Il cerio fu scoperto nel 1803 dal chimico svedese Jons Berzelius e dal geologo svedese Wilhelm von Hisinger ed indipendentemente dal chimico tedesco Martin Klaproth. Il Cerio deriva il suo nome da Ceres (Cerere, dea della fertilità) in onore al nome dato al più grande degli asteroidi del sistema solare scoperto due anni prima e precisamente il 1.1.1801 dal sacerdote astronomo Giuseppe Piazza direttore dell'Osservatorio di Palermo. Una lega di cerio e ferro ha la proprietà di emettere scintille per strofinio. La scoperta di questa lega permise ad Auer di commercializzare un nuovo tipo di accendino.

Prima di addentrarci nello studio approfondito dei meccanismi fondamentali di emissione della luce, facciamo delle considerazioni di carattere generale sulle caratteristiche di una radiazione luminosa e sui parametri fondamentali dei vari tipi di sorgenti artificiali.

Caratteristiche cromatiche di una radiazione luminosa

Il colore è un attributo della sensazione visiva alla cui determinazione concorrono fattori soggettivi ed oggettivi.

Quando l'occhio riceve una sollecitazione visiva, le caratteristiche della sensazione ad essa associata dipendono dal modo in cui si svolge il meccanismo di emissione e di ricezione dello stimolo.

L'attribuzione da parte di un individuo di un determinato colore ad un oggetto (rosso, blu, verde...) passa attraverso la successione dei seguenti passi:

a) Una sorgente emette un flusso luminoso caratterizzato da una distribuzione il più delle volte non uniforme delle varie componenti cromatiche: alcune presenti in modo più o meno intenso, altre addirittura mancanti. Tale distribuzione spettrale determina oggettivamente il colore dell'energia luminosa in questione e definisce la sorgente dal punto di vista cromatico.

b) L'eventuale oggetto illuminato restituisce un flusso luminoso riflesso in base alle sue caratteristiche di riflettività, che sono selettive alle diverse lunghezze d'onda; le componenti cromatiche della luce riflessa possono pertanto risultare deformate rispetto a quelle della luce incidente e determinano oggettivamente il colore della luce riflessa, cioè le caratteristiche cromatiche dell'oggetto illuminato.

c) L'occhio percepisce lo stimolo cromatico e lo invia al cervello che lo elabora classificandolo in base al confronto con i dati che ha immagazzinato nel corso della sua esperienza visiva. In questo modo fattori soggettivi, legati al comportamento dell'apparato visivo umano, partecipano alla determinazione della sensazione cromatica ed alla sua classificazione con i termini usuali (blu, verde, giallo, rosso...).

La Colorimetria si propone lo scopo di definire il colore con leggi oggettive che tengano conto di tutti gli elementi che lo determinano. E' intuitivo come ciò risulti oltremodo arduo, vista la complessità del fenomeno in cui concorrono fattori non facilmente schematizzabili dipendenti dalle capacità visive del ricettore.

La luce emessa da una sorgente, ovvero quella riflessa da un oggetto illuminato, sono caratterizzate dal punto di vista cromatico da tre attributi cromatici fondamentali:

Tinta o tono, Purezza o saturazione, Intensità o Luminosità.

Tinta o Tono

Il Tono o Tinta del colore di un oggetto illuminato o di una sorgente illuminante è una caratteristica legata alla distribuzione spettrale dello stimolo luminoso che consente di classificare il colore stesso come appartenente ad una delle grosse categorie (blu, verde, giallo, rosso...) in cui è stato suddiviso lo spettro del visibile in funzione della lunghezza d'onda. Generalmente, e questo risulta tanto più vero quanto più la luce considerata è

caratterizzata in modo spiccato dal punto di vista cromatico, esiste una lunghezza d'onda, detta *lunghezza d'onda dominante* dello spettro di emissione, intorno alla quale si distribuisce la maggior parte dell'energia luminosa che la caratterizza.

Due luci, le cui distribuzioni spettrali si concentrano attorno alla stessa lunghezza d'onda dominante, avranno la stessa tinta (es: rosso), ma potranno risultare sensibilmente diverse a seconda di come sia distribuita l'energia intorno a quella lunghezza d'onda. Quella che presenta una maggior concentrazione di energia intorno alla lunghezza d'onda dominante sarà più caratterizzata come rosso, viceversa quella che presenta una maggior dispersione dell'energia intorno alla lunghezza d'onda dominante (curva più piatta) sarà meno caratterizzata come rosso.

Una luce che sia caratterizzata da una distribuzione uniforme dell'energia a tutte le lunghezze d'onda, in cui cioè non sia possibile identificare una lunghezza d'onda dominante risulterà poco caratterizzata dal punto di vista cromatico e sarà definita di *colore grigio*.

Mescolando un grigio con una luce monocromatica ad una certa lunghezza d'onda (ad esempio quella del rosso), si otterrà un colore identificabile come tinta, la cui lunghezza d'onda dominante sarà quella del rosso: il colore in questione avrà una tinta rossa.

I colori dello spettro del visibile, che variano da 380 a 780 nm, vanno da tinte identificabili come fredde, tipicamente quelle a bassa lunghezza d'onda (violetto, blue, verde) a quelle più calde (giallo, arancio, rosso) che sono caratterizzate da più elevate lunghezze d'onda.

Anche una radiazione luminosa poco definita dal punto di vista cromatico, cioè una luce bianca, potrà essere interessata da una maggiore concentrazione dell'energia luminosa intorno alle tonalità calde o a quelle fredde, pur se all'interno di una distribuzione abbastanza uniforme nello spettro del visibile. Le varie sorgenti di luce artificiale saranno allora identificabili come generatrici di luce bianca *calda* (warm white) o *fredda* (cold white).

Purezza o Saturazione

La saturazione o purezza di un colore è legata al rapporto tra il contenuto energetico di una luce in corrispondenza della lunghezza d'onda dominante e quello relativo alle rimanenti lunghezze d'onda dello spettro di emissione.

Un colore caratterizzato da una debole saturazione (insaturo) tende al grigio e presenta una curva spettrale piuttosto uniforme; al contrario un colore saturo presenta una curva spettrale molto concentrata intorno alla lunghezza d'onda dominante e risulta fortemente caratterizzato dalla tinta cui quella lunghezza d'onda corrisponde. In altre parole, un colore molto puro (saturo) presenta uno spettro a punta intorno alla λ dominante, mentre un colore di purezza meno accentuata presenta una curva più allargata e piatta. Al limite, la purezza massima corrisponde all'emissione di una luce monocromatica, mentre la purezza minima corrisponde al grigio.

È possibile pertanto definire la purezza di un colore come quella proprietà che determina la deviazione del colore rispetto al grigio neutro, quindi la tendenza verso un colore puro dello spettro (luce monocromatica).

Il tono e la saturazione costituiscono l'aspetto più propriamente cromatico della sensazione, cioè definiscono la sua cromaticità, il grigio è il tipico colore acromatico .

Luminosità o Intensità

La luminosità di un colore è il parametro legato al contenuto energetico globale della luce considerata all'interno del suo spettro di emissione. Maggiore è l'energia emessa, maggiore è la luminosità del colore considerato e maggiore risulterà la chiarezza con cui questo verrà percepito. Il bianco ha luminosità massima, il nero ha luminosità nulla, il grigio ha una luminosità intermedia tra quelle del bianco e del nero. Il bianco, il nero ed il grigio sono colori che non possono essere tra loro distinti dal punto di vista cromatico per ciò che concerne gli aspetti di tinta e saturazione; sono infatti tutti e tre caratterizzati dallo stesso tipo di curva di emissione spettrale (uniforme). L'unica caratteristica che li distingue dal punto di vista cromatico è l'intensità, cioè la quantità di energia globalmente emessa. Tra il bianco ed il nero esistono diversi livelli di grigio che vanno da livelli ad elevata luminosità (tendenti al bianco) a livelli a bassa luminosità (tendenti al nero).

Tra i tre parametri fondamentali che caratterizzano la sensazione cromatica, la luminosità riguarda l'aspetto quantitativo della stessa, cioè il contenuto energetico della luce che si sta considerando. Tale contenuto energetico può essere, di volta in volta, espresso mediante l'intensità luminosa, la luminanza, in particolare nel caso di un oggetto illuminato, ovvero il flusso luminoso nel caso più generale di luce emessa da una sorgente.

Parametri caratteristici di una lampada

Prima di descrivere i principi di funzionamento che distinguono le grandi famiglie di lampade e le innovazioni che progressivamente hanno migliorato le loro prestazioni appare opportuno elencare e definire quei parametri che quantificano le prestazioni stesse, qualificano le sorgenti luminose e consentono di procedere ad una giusta scelta dell'impianto di illuminazione da installare.

La efficienza luminosa ($lm W^{-1}$), solitamente indicata con la lettera greca η , è il flusso luminoso emesso per ogni unità di potenza elettrica dissipata compresa quella di alimentazione dei vari accessori elettrici se ci sono. A parità di potenza dissipata l'efficienza varia in dipendenza dallo spettro di emissione. Se tutto il flusso luminoso fosse emesso alla lunghezza d'onda di 555 nm si avrebbe una efficienza di 683 ($lm W^{-1}$), quindi 1 W produrrebbe 683 lm, se invece 1 W fosse uniformemente distribuito in tutto il campo visibile, tenendo conto della caratteristica della sensibilità dell'occhio, si troverebbe una efficienza luminosa di 225 ($lm W^{-1}$). La conoscenza dell'efficienza luminosa torna particolarmente utile nelle valutazioni di natura economica relative ai costi di esercizio degli impianti in quanto il suo inverso è un indice di consumo. Con semplici algoritmi dall'indice si passa agilmente al consumo effettivo di energia elettrica espresso nella ben nota unità di misura denominata chilowattora (kWh): gli Enti erogatori dell'energia elettrica fanno pagare proprio in base ai chilowattora consumati. Il chilowattora è l'energia utilizzata da una utenza della potenza di 1 kW che funziona per un'ora:

$$1kWh = 1kW \cdot 1h = 10^3 \cdot 3600 \left(\frac{J}{s} \cdot s \right) = 3,6 \text{ (MJ)}$$
$$1MJ = 0,28 \text{ kWh}$$

Esempio: Un ambiente richiede un flusso luminoso di 60 klm per lo svolgimento di una certa attività lavorativa ed il progettista sceglie un tipo di lampada avente efficienza luminosa di 30 (lm W⁻¹). La potenza elettrica P_{el} necessaria al funzionamento dell'impianto è di:

$$P_{el} = \frac{\Phi}{\eta} = \frac{60 \cdot 10^3}{30} \left(\text{lm} \cdot \frac{\text{W}}{\text{lm}} \right) = 2 \cdot 10^3 \text{ (W)} = 2 \text{ kW}$$

Per ogni ora di funzionamento l'energia elettrica consumata è:

$$E_{el} = P_{el} \cdot 3600 \left(\frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot \text{s} \right) = 2 \cdot 10^3 \cdot 3,6 \cdot 10^3 \text{ (J)} = 7,2 \text{ (MJ)} = 2 \text{ (kWh)}$$

La temperatura di colore T_c (K) è la temperatura di un radiatore ideale o corpo nero che, nella regione del visibile, ha una distribuzione spettrale uguale o circa uguale a quella della sorgente: la temperatura di colore coincide con quella della sorgente solo per il radiatore ideale. A rigore la definizione della temperatura di colore è valida soltanto per le lampade ad incandescenza per le quali esiste una emissione spettrale continua, mentre per le lampade a scarica nei gas, per le quali lo spettro di emissione si presenta discontinuo, è preferibile parlare di *temperatura prossimale o approssimata o correlata di colore*. La temperatura di colore è una misura della cromaticità o colore apparente della sorgente.

Più è bassa la temperatura di colore più la luce presenta connotati rossastri (caldi), più è elevata maggiore è la componente blu (fredda).

Secondo la norma UNI 10380 del 1994 (*Illuminotecnica, Illuminazione di interni con luce artificiale*) le lampade a luce bianca sono classificate in tre gruppi fondamentali rispetto alla temperatura di colore contrassegnati dalle iniziali di aggettivi inglesi che qualificano la tonalità del colore e precisamente:

- *temperatura di colore minore di 3000 K*: colore della luce indicata dalla lettera W (Warm = bianco caldo): luce ricca di radiazioni rosse particolarmente adatta nelle abitazioni, nei luoghi di soggiorno e svago etc.;
- *temperatura di colore tra 3000 e 5300 K*: colore della luce indicata dalla lettera I (Intermediate = bianco-neutro): luce particolarmente adatta in molti ambienti di lavoro;
- *temperatura di colore maggiore di 5300 K*: colore della luce indicata dalla lettera C (Cold = bianco freddo): luce ricca di radiazioni blu adatta ove sono richiesti illuminamenti molto elevati come nelle vetrine, laboratori, studi professionali di disegnatori, etc.

Le norme, sia nazionali che internazionali, prescrivono le tonalità della luce e, quindi, consigliano le temperature di colore convenienti per i vari tipi di locale da illuminare e per i vari compiti visivi o attività da svolgere. In Tabella 1 vengono riportati alcuni valori di riferimento delle temperature di colore di vari tipi di sorgenti.

Tabella 2 Valori indicativi delle temperature di colore delle diverse sorgenti

Sorgente	Temperatura di colore (K)
Fiamma di candela	1900
Sole a mezzogiorno	6500
Sole al tramonto	2500-3000
Lampada ad incandescenza	2500-3000

Lampada fluorescente di vecchia generazione	2700-3000
Luce diurna cielo sereno	4500-5500
Lampada fluorescente "luce diurna"	4000-6000
luce diurna con cielo nuvoloso	6000-8000

La vita media di una lampada (h) è il tempo stimato, in ore, della durata prevista della lampada stessa prima della sua rottura definitiva (*burn out*). Questo tempo viene determinato considerando il valore medio dei tempi di durata di un campione significativo ed omogeneo, opportunamente selezionato, di lampade dello stesso tipo. In alternativa esso può anche essere stimato, sempre in riferimento ad un campione statisticamente valido, come il tempo di funzionamento superato dal 50% delle lampade testate oppure il tempo che intercorre prima che un parametro importante, come ad esempio la resa cromatica o la efficienza luminosa, scenda al di sotto di una certa soglia prestabilita: ad esempio, il lasso di tempo necessario affinché il flusso luminoso diminuisca del 20%. La vita media è un parametro utile per la valutazione dei costi di esercizio dell'impianto e per la quantificazione della scorta di lampade che garantisca la continuità di funzionamento dell'impianto nel tempo. La vita media è fortemente condizionata anche dal numero di accensioni: durante il test di prova passano alcune ore tra due accensioni consecutive a differenza di quanto avviene comunemente.

La resa dei colori o *resa cromatica* è un numero minore o uguale a 100 che, in una scala codificata dalla C.I.E., quantifica la fedeltà con cui sono resi i diversi colori delle superfici illuminate dalla sorgente in esame.

La resa del colore di una superficie rivestita con colori di riferimento, selezionati dalla C.I.E., ed illuminata da una sorgente di riferimento C.I.E. assume un valore convenzionalmente pari a 100. La stessa superficie con colori di riferimento C.I.E. illuminata dalla sorgente reale restituisce i colori con una fedeltà uguale o minore a quella precedente. Un valore vicino a 100 di tale parametro esprime una elevata fedeltà della sorgente considerata, mentre questa diminuisce al diminuire del valore assunto.

Una resa cromatica pari a 100 è attribuibile alla luce naturale del sole, che ha una distribuzione spettrale quasi del tutto uniforme e produce, di conseguenza, una luce bianca.

La sorgente di riferimento, da considerarsi standard in Colorimetria per la sua tipica distribuzione spettrale, è descritta in "*IES Lighting Handbook, 1981 Reference Volume*". Riproduzioni di sorgenti campione sono custodite presso i vari centri di taratura nazionale.

La resa dei colori è dunque un parametro che descrive l'effetto prodotto sui corpi illuminati, ma esprime soprattutto una qualità caratteristica della luce che li illumina. Una resa cromatica pari o prossima a 100 è ottima, mentre è da considerarsi scadente quando risulta minore o uguale a 50.

Non è assolutamente detto che la resa cromatica debba sempre e comunque essere la più alta possibile in quanto questa è una esigenza legata al compito visivo da svolgere: per un ambiente di soggiorno una resa prossima a 100 è ritenuta molto buona, mentre, ad esempio, per un impianto di segnalazione notturna di un percorso lungo un corridoio, evidenziazione di scalini, soglie, uscite di sicurezza, è altrettanto buona una resa cromatica prossima allo zero. Nella illuminazione artificiale delle abitazioni le sorgenti dovrebbero avere una resa cromatica non inferiore al 95%.

Di solito sorgenti aventi alte rese cromatiche hanno bassa efficienza luminosa.

La Norma UNI 10380 del 1994 elenca 5 gruppi di resa del colore (GR_a) da selezionare in funzione del tipo di attività o del tipo di ambiente ed il corrispondente indice di resa cromatica (R_a) che qualifica il tipo di lampada come riportato nella Tabella 3.

Tabella 3 *Gruppi di resa del colore e resa del colore.*

Gruppo di resa del colore (GR_a)	Resa del colore (R_a)
1	$R_a > 90$
1B	$80 \leq R_a < 90$
2	$60 \leq R_a < 80$
3	$40 \leq R_a < 60$
4	$20 \leq R_a < 40$

Il tempo di ritardo per la riaccensione non ha bisogno di definizione tanto è ovvio il significato. Tale caratteristica può essere una limitazione talvolta insignificante per chi ha tempo di aspettare, anche una decina di minuti, ma può essere fortemente limitativa nei locali di lavoro utilizzati spesso ma saltuariamente, nei locali di esposizione della merce aperti soltanto all'arrivo del cliente, nei luoghi di soggiorno non continuativo etc.

Il numero di riaccensioni per alcuni tipi di lampade, come ad esempio quelle a scarica, è fortemente collegato alla vita media in quanto durante la fase dell'andata a regime entrano in gioco differenze di potenziale molto elevate, ben maggiori di quelle a regime, che a lungo andare affaticano i materiali. Inoltre i tempi di riaccensione vanno distinti a seconda che la riaccensione avvenga con lampade calde o ancora fredde.

Gli impianti di illuminazione non devono affidarsi esclusivamente a lampade con tempi di riaccensione lunghi poiché il verificarsi di emergenze, quali le interruzioni soprattutto momentanee dell'erogazione di energia elettrica, gli abbassamenti temporanei della tensione di alimentazione etc., potrebbero rendere l'impianto non funzionale per alcuni minuti. Di qui talora la necessità di disporre di impianti di alimentazione stabilizzata e di emergenza.

Il tempo di andata a regime che può arrivare anche ad una decina di minuti.

La posizione di montaggio: per molti tipi di lampade non ci sono limiti, ma in alcuni casi si richiedono installazioni, per esempio, con l'asse principale di simmetria disposto orizzontalmente con tolleranze molto strette da non disattendere se si vuole salvaguardare il funzionamento e la vita stessa della lampada.

Le sorgenti luminose si distinguono anche per le dimensioni e per la forma (lineare, circolare, a goccia, a pera, a torcia, a tortiglione, a fungo, a candela, ritorta ad U etc.), per il tipo di collegamento alla rete di alimentazione (diretto o tramite circuito accessorio di adattamento composto da starter, reattore e rifasatore), per eventuali effetti prodotti alla vista (ad esempio l'effetto stroboscopico), per il tipo di attacco (a vite o Edison, a baionetta, attacco unilaterale o bilaterale, etc.).

Sorgenti ad incandescenza

E' noto che ogni corpo a temperatura superficiale superiore a 0 K (detto zero assoluto pari a $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) emette radiazioni elettromagnetiche la cui distribuzione spettrale dipende dal valore assunto dalla suddetta temperatura. Ordinariamente l'emissione dei corpi interessa il campo dell'Infra Rosso (IR con $\lambda > 780\text{ nm}$), cioè quel tipo di radiazioni la cui energia è esclusivamente termica ed il cui effetto principale è quello di trasportare calore. La superficie di un corpo scaldante (es. radiatore) è il tipico esempio di sistema in grado di riscaldare per emissione di radiazioni IR. Quando la temperatura superficiale di un corpo supera determinati valori ($600\text{-}800\text{ }^{\circ}\text{C}$), lo spettro di emissione comincia ad invadere il campo del visibile, compreso all'incirca tra valori di lunghezza d'onda che vanno da 380 a 780 nm . In tale range, il corpo diventa incandescente ed inizia l'emissione di luce, cioè di radiazioni visibili. L'incandescenza è propriamente quel fenomeno fisico che si verifica quando un corpo, presentando una temperatura superficiale molto elevata, emette radiazioni visibili.

Il comportamento delle sorgenti ad incandescenza è descritto dalle ben note leggi dell'irraggiamento: la legge di Stefan- Boltzmann, la legge di Planck, la legge di Wien e la legge di Lambert. Per le leggi di Planck e di Wien la curva di emissione si sposta verso lunghezze d'onda più piccole all'aumentare della temperatura della superficie emittente. A temperature di emissione più elevate si aumenta la percentuale di potenza emessa nel visibile e si ottiene luce sempre più bianca, risultato questo di una diversa distribuzione delle bande cromatiche presenti nella curva di emissione ottenuto facendo "pesare" di più componenti cromatiche e, quindi, lunghezze d'onda poco presenti a temperature più basse. Per temperature maggiori di $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ porzioni sempre più importanti dello spettro di emissione entrano nel campo del visibile e, quindi, diventano luce, con lunghezza d'onda, cioè, tra 380 e 780 nm .

Le prime lunghezze d'onda interessate dal fenomeno sono quelle più elevate nel campo del visibile, in particolare quelle tipiche del colore rosso. All'aumentare della temperatura vengono poi via via interessate le lunghezze d'onda più basse, arancio, giallo, verde e, se la temperatura è tale da invadere l'intero campo del visibile ($T > 2700\text{ K}$), tutte le componenti cromatiche sono coinvolte nell'emissione e la luce prodotta è tanto più bianca (acromatica) quanto più uniforme è la distribuzione spettrale.

Le lampade ad incandescenza sfruttano questo fenomeno per produrre luce. In esse l'incandescenza viene provocata nel filamento dal calore generato per effetto Joule. Quest'ultimo è un fenomeno dissipativo che consiste nella trasformazione in calore di una parte dell'energia elettrica che attraversa il filamento. La dissipazione è di entità tanto maggiore quanto maggiore è la resistenza elettrica del filamento che, come è noto, è inversamente proporzionale al diametro della sezione e direttamente proporzionale alla sua lunghezza. Il calore così generato provoca il surriscaldamento del filo sino alle temperature alle quali si verifica il fenomeno della incandescenza, cioè l'emissione di radiazioni elettromagnetiche interne allo spettro del visibile, per effetto della sola temperatura superficiale della sorgente. Per ottenere il fenomeno della incandescenza il materiale di cui è fatto il filo deve avere una temperatura di fusione superiore a $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, come si è già detto. Materiali che fondono a temperature più basse di $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, come ad esempio lo stagno, che ha una temperatura di fusione di $280\text{ }^{\circ}\text{C}$, passano dallo stato solido a quello liquido senza manifestare l'incandescenza.

Il problema fondamentale che gli scienziati, nel corso della storia, hanno dovuto risolvere per realizzare questo tipo di sorgenti è consistito nella individuazione di un materiale in grado di rimanere allo stato solido ai suddetti regimi termici, considerato che alle

temperature più adatte all'incandescenza la maggior parte delle sostanze fondono, cioè passano dallo stato solido a quello liquido.

La lampada ad incandescenza non fu la prima lampada elettrica apparsa sul mercato perché alla sua comparsa erano già di largo impiego le lampade ad arco che utilizzavano la scarica tra due elettrodi di carbone di storta con temperature di emissione di 4000 K, tra le più elevate per sorgenti luminose artificiali.

Le lampade ad arco, che hanno il grande pregio di possedere elevate intensità luminose, avevano in passato trovato applicazione prevalentemente nella illuminazione stradale rivelando una elevata efficienza e, soprattutto, una gradevole tonalità di colore quasi come la luce naturale del sole. La resa dei colori era elevata e congeniale soprattutto al colorito naturale dei visi ed ai colori dei materiali lapidei dei monumenti storici. Per questo motivo, nella città di Londra, esse venivano impiegate prevalentemente nella illuminazione delle vie e delle piazze del centro storico. Attualmente le lampade ad arco sono usate prevalentemente per le proiezioni cinematografiche, per la saldatura dei metalli, nella fusione dei materiali refrattari e nei forni elettrici.

Le lampade ad arco sono costituite da due elettrodi di carbone collegati ad un generatore di corrente elettrica con elevata potenza. Inizialmente gli elettrodi sono posti in contatto per consentire il passaggio di corrente elettrica che provocava un intensissimo riscaldamento in grado di rendere incandescenti le punte per effetto Joule. Avviato il processo le punte vengono allontanate di qualche millimetro mentre il passaggio di corrente elettrica nello spazio tra le punte continua. L'alta temperatura raggiunta provoca la ionizzazione dell'aria tra le punte, l'emissione di elettroni e di ioni dai carboncini che bombardano gli elettrodi di segno opposto provocando a loro volta altre emissioni. Durante la scarica, detta appunto "ad arco", il catodo si consuma assumendo una forma appuntita mentre l'anodo si consuma molto più rapidamente del catodo, si riscalda notevolmente raggiungendo la temperatura di circa 4000 K e si incava assumendo una caratteristica configurazione detta a cratere. La corrente elettrica nell'arco può essere di qualche decina di Ampere con differenze di potenziale di soli 40-50 V. L'accorciamento continuo, soprattutto del carboncino positivo (anodo), è un inconveniente molto fastidioso nella conduzione e nella gestione di un impianto di illuminazione in quanto richiede frequenti interventi di personale competente e specializzato o, alternativa più complicata ma più praticabile, l'impiego di dispositivi automatici che mantengano costante la distanza tra i due carboncini e li sostituiscano una volta consumati del tutto.

La lampada elettrica ad incandescenza non fu neppure la sola lampada ad incandescenza essendo dello stesso periodo la commercializzazione delle lampade a gas con la reticella di Auer.

I primi a lavorare alla costruzione di una lampada elettrica ad incandescenza furono l'inglese Swan¹¹ e l'americano Edison¹² che, indipendentemente l'uno dall'altro, effettuarono esperimenti con fili di vari materiali fino a concentrarsi sulla soluzione di adottare dei fili di supporto di carta (la carta brucia a 233 °C) o di cotone (il cotone brucia a 266 °C) rivestiti di carbonio.

Nel 1860 Swan per primo fece funzionare una lampada sotto vuoto con filo di carta carbonata che ebbe una vita molto breve a causa dell'inadeguatezza del vuoto raggiunto. Infine, però, nel 1879 ad Edison¹³ soltanto spettò il merito, forse ingiustamente perché andava condiviso, della costruzione della prima lampada con filo a base di carbonio con una vita più lunga: l'efficienza stimata fu di poco più di 1 (lm W^{-1}) e la vita intorno alle 45 h.

¹¹ Sir Joseph Wilson Swan nato a Sutherland il 31.10.1828 e morto il 27.5. 1914 a Warlington.

¹² Thomas Alva Edison nato a Milan (Ohio) l'11.2.1847 e morto il 18.10. 1931 ad Orange (NJ).

¹³ La prima lampada elettrica ad incandescenza fu presentata da Edison in una dimostrazione pubblica a Menlo Park (New Jersey). Sul luogo venne eretta una torre alta 40 m (Edison Memorial Tower) che custodisce una lampada con un bulbo alto circa 4 m e largo circa 3 m.

Fu, inoltre, lo stesso Edison a dare avvio a quella massiccia commercializzazione delle lampade che progressivamente portò alla completa sostituzione delle vecchie lampade a gas sia nella illuminazione pubblica che in quella privata.

Edison, che, a differenza di Swan, era mosso principalmente da interessi di ricerca, pensava in grande e guardava più realisticamente al futuro dell'illuminazione avendone individuata la soluzione nella distribuzione capillare dell'energia nel territorio: l'elettricità, tra tutte, è la forma di energia più versatile a questo riguardo e le lampade ad incandescenza da sempre hanno presentato una estrema facilità di collegamento alla rete distributrice. Edison, inoltre, non tralasciò di interessarsi anche alla ideazione di particolari tecnologici quali il miglioramento delle dinamo usate come generatori di corrente elettrica, il modo di attacco della lampada al circuito di alimentazione (l'attacco a vite da lui adottato ancora porta il suo nome) e fu il primo ad adottare il metodo, oggi si direbbe ovvio, del collegamento in parallelo di più lampade dello stesso impianto in modo da evitare che la rottura di una le spenga tutte. Edison progettò una centrale per la generazione e la distribuzione dell'elettricità nel 1882 a New York City in Pearl Street.

Le prime lampade elettriche ad incandescenza di Swan e di Edison avevano dunque un filamento di un materiale trattato con carbonio racchiuso in un bulbo sotto vuoto. La quasi assenza di aria e, quindi, di ossigeno preservava il filo dalla ossidazione e dalla combustione ma lasciava incontrollato il lento ma inesorabile processo della sublimazione.

Nel 1898 Auer (lo stesso della reticella) cominciò ad usare per primo un filo metallico scegliendo l'osmio. L'osmio, però, è un elemento troppo raro per poter essere usato commercialmente e molto difficile da lavorare. Auer, comunque, aprì la strada che migliore fortuna portò ad Edison con il tungsteno¹⁴.

Nel 1904 Edison presentò per la prima volta una lampada con filamento di osmio e wolframio (altro nome del tungsteno) denominata lampada osram (osmium e wolfram) con temperature di incandescenza di circa 2000 °C.

Ad Edison, quindi, spetta anche il merito di aver usato per primo il tungsteno, più robusto dei materiali al carbonio e con temperatura di fusione di 3650 K e per il quale nel 1910 fu trovata una tecnica complessa ma efficace di trafilatura. Il filo di tungsteno è prodotto partendo da lamine formate da polvere di tungsteno pressata a circa 1000 atm, riscaldate fino a 3000 °C in atmosfera di idrogeno, martellate e trafilate in due filiere successive: la prima produce fili del diametro di 0.2 mm mentre la seconda perfeziona la trafilatura arrivando a diametri di 10^{-2} mm. Oggi i filamenti delle lampade non sono solo diritti ma si presentano anche avvolti in spirali talora complesse che hanno aumentato la vita media e l'efficienza delle lampade.

Il metodo di indagine sperimentale che portò Edison alla scelta del tungsteno fu lungo e laborioso, prevedendo circa 6000 tentativi con diversi materiali, a cominciare da fili di carta, cotone, cellulosa etc. fino poi ad arrivare ai fili metallici. Commentando questa procedura di indagine il grande fisico croato Nikola Tesla, già collaboratore di Edison, parlò di metodo di ricerca tipo "*needle-in-the-haystack*" (*ago nel pagliaio*). Attualmente si usano leghe di tungsteno e di altri metalli come il renio¹⁵.

Le caratteristiche che rendono un materiale idoneo ad essere utilizzato come filamento sono: elevata temperatura di fusione, bassa tensione di vapore, elevata resistenza meccanica, adeguata duttilità ed adeguato spettro di emissione all'interno del visibile.

¹⁴ Il tungsteno o wolframio (W) fu scoperto nel 1783 dai due fratelli chimici spagnoli Fausto e Juan José de Elhuyar. Deriva il suo nome dallo svedese *tung* (pesante) e *sten* (pietra).

¹⁵ Il renio (Re) ha una delle più elevate temperature di fusione: 3180 °C. E' stato scoperto nel 1925 dai coniugi tedeschi Walter Noddack e Ida Tacke, e da Otto Carl Berg. Deriva il suo nome da Rhenus, nome latino del fiume tedesco.

Per il tungsteno c'è da aggiungere anche che la sua emissività è:

$$\varepsilon_{\square}(380 < \lambda < 780 \text{ nm}; T = 3000 \text{ K}) \cong 0,45$$

e che, rispetto a tutta la potenza irradiata, la percentuale compresa nel visibile per il tungsteno è maggiore addirittura di quella del corpo nero alla stessa temperatura: il tungsteno, rispetto ad altri metalli, presenta una migliore efficienza luminosa, anche se poi le lampade ad incandescenza, rispetto alle altre lampade elettriche, hanno i valori più bassi di tale parametro, ed irradia minore quantità di energia termica in quanto, tra tutti i metalli candidati all'uso, il tungsteno ha un valore molto basso di emissività nel campo degli infrarossi.

A proposito della tensione di vapore c'è da ricordare che è funzione crescente della temperatura e che maggiore è la tensione minore, ovviamente, è la vita media.

Molto più evidente nelle lampade con fili al carbonio ma ancora presente nelle lampade con il tungsteno è il fenomeno della sublimazione aggravato sia dalle alte temperature, per una lampada ad incandescenza di 200 W la temperatura indicativa è di 2620 °C, che dal vuoto circostante con la duplice conseguenza dell'assottigliamento del filo fino alla rottura e dell'annerimento del bulbo di vetro conseguente alla solidificazione del vapore di tungsteno: la temperatura del bulbo di solito per lampade normali non supera i 160-170 °C mentre in lampade per speciali applicazioni si arriva anche a 470 °C.

Un rallentamento del fenomeno della sublimazione può essere ottenuto mediante il contributo della pressione prodotta da un'atmosfera gassosa inerte, avente cioè un'elevata energia di ionizzazione, normalmente costituita da argon, azoto, miscele di argon ed azoto o, infine, kripton che, visti i costi, viene usato solo in lampade speciali e soprattutto in quelle miniaturizzate. Il rallentamento è tanto più evidente quanto maggiore è la pressione e quanto maggiore è la massa molecolare del gas impiegato. La pressione a freddo è di qualche decina di (mm Hg) ed a caldo si approssima alla pressione atmosferica.

La presenza del gas consente di lavorare con temperature più elevate con emissione di luce più bianca, con una più elevata efficienza e con una più lunga vita media. L'atmosfera gassosa rallenta la sublimazione ma aumenta la dispersione termica per convezione ed irraggiamento.

Un'altra soluzione che attenua il fenomeno dell'annerimento è la presenza di gas, normalmente alcune specie di clorati, che si combinano con il tungsteno sublimato dando composti di reazione stabili gassosi e trasparenti. Sono usati anche i cosiddetti *getters* i cui vapori caldi si combinano con il tungsteno sublimato formando un minuscolo particolato solido. Il getter, in realtà, è un materiale usato nei processi di produzione del vuoto spinto per eliminare i gas residui e, così, per migliorare il grado di vuoto oltre la potenzialità della pompa. Il getter è una striscia metallica formata generalmente da un metallo volatile quale il magnesio, il sodio, il bario, il calcio o il fosforo, inserita preliminarmente nel tubo da vuotare. Raggiunto il vuoto consentito dalla pompa e sigillato il tubo, il getter viene riscaldato fino a circa 700 °C per induzione elettromagnetica mediante un avvolgimento. I vapori metallici si combinano con i gas residui e, raffreddandosi, solidificano depositandosi sul fondo.

Le lampade ad incandescenza con potenza minore di 25 W lavorano in condizioni di vuoto spinto fino ad una pressione interna di circa 10 Pa.

Tra le conseguenze, tutte nefaste e tra loro interdipendenti, della sublimazione sono da ricordare: l'annerimento del bulbo, l'assottigliamento del filo, l'aumento della resistenza elettrica, la diminuzione della corrente elettrica, la riduzione della potenza elettrica, la riduzione del flusso luminoso. Si stima che il filo cessa di funzionare quando ha perso circa l'1% della sua massa.

Il gas inerte di riempimento, oltre allo scopo già illustrato, ha anche quello di impedire la scarica ad arco tra gli elettrodi di alimentazione del filo e quello di formare un guscio cilindrico quasi stazionario che aumenta la resistenza termica e, quindi, diminuisce la dissipazione, per convezione, del calore prodotto per effetto Joule, garantendo un migliore utilizzo della potenza elettrica impiegata.

La situazione è del tutto simile a quella classica della geometria cilindrica (il filamento) con generazione interna di calore con strato di isolante (la guaina di gas inerte stazionario adiacente al filo).

E' ben noto dai corsi di trasmissione del calore che in una geometria cilindrica con generazione interna di calore la resistenza termica totale, somma della resistenza conduttiva e di quella convettiva, aumenta con il raggio, quando questo è maggiore del raggio critico.

Per disporre di diametri maggiori e superare il limite del ridotto diametro del filamento, necessariamente piccolo per esigenze pratiche, si ricorse all'artificio della spirallatura¹⁶ che dapprima fu semplice e successivamente divenne doppia. La doppia spirallatura ha, inoltre, il vantaggio di ridurre il flusso termico dissipato: allo scambio per convezione partecipa soltanto la parte periferica della superficie della spirallatura esterna in quanto la regione più interna è tutta quasi alla stessa temperatura mentre rimane estesa la superficie emittente la luce. Fino al 1913 tutte le lampade elettriche ad incandescenza avevano il filamento dritto (oggi le avremmo classificate di tipo S, che sta per *straight*). Inoltre, sempre per quanto attiene il migliore utilizzo della potenza elettrica impiegata, tra tutti i gas normalmente usati per il riempimento del bulbo, l'argo si presenta tra i più raccomandati per la sua bassa conduttività termica. A questo proposito migliore sarebbe il kripton che ha un coefficiente di conduttività termica ancora più basso, ma è sicuramente più raro e, quindi, più costoso: questo gas trova impiego soltanto in alcuni tipi di lampade di piccole dimensioni.

Tabella 4: Valori della conduttività termica λ ($mW m^{-1} K^{-1}$) di alcuni gas impiegati per il riempimento di sorgenti luminose.

Sostanza gassosa	Massa mol.	λ (300 K)	λ (500 K)
Elio	4.0026	150	200
Idrogeno	2.0158	182	272
Ossigeno	31.9988	26.7	41.2
Azoto	28.0134	22.2	38.7
aria	28.966	25.2	38.5
argon	39.948	17.7	26.4

La spirallatura semplice, ed in seguito quella doppia, resero più robuste le lampade elettriche ad incandescenza rendendole particolarmente adatte ad installazioni soggette ad urti e vibrazioni ed aumentandone quasi all'infinito la vita media, ma ebbero come conseguenza una più bassa temperatura del colore. I costruttori convennero di orientarsi verso la soluzione di compromesso, ancora in uso per le lampade ad incandescenza in commercio attualmente, tra una vita media intorno alle 1000 ore, ritenendo tale valore accettabile per i compratori dato anche il costo estremamente contenuto, ed una qualità della luce eccellente, anche se più giallastra rispetto a quella naturale del sole, sicuramente migliore, però, di quella delle sorgenti luminose precedenti, quali le lampade a gas e le candele.

¹⁶ La spirallatura fu adottata per primo da Irving Langmuir (1881-1957) premio Nobel per la chimica nel 1932.

Le prestazioni delle lampade ad incandescenza risentono molto delle variazioni della tensione di alimentazione e sono tra loro fortemente correlate. Correlazioni che con buona approssimazione descrivono l'andamento dei più importanti parametri descrittivi del funzionamento di una lampada sono reperibili nella letteratura tecnica e tra queste le seguenti:

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{3.5}$$

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{0.5}$$

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{1.5}$$

$$\frac{D}{D_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-13.5}$$

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{1.9}$$

$$\frac{T_c}{T_{co}} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{0.42}$$

avendo indicato con Φ_0 , I_0 , P_0 , D_0 , η_0 , T_{co} rispettivamente il flusso luminoso emesso, la corrente elettrica, la potenza elettrica dissipata, la durata, l'efficienza e la temperatura di colore quando la tensione di alimentazione è quella nominale V_0 e analogamente con Φ , I , P , D , η , T_c le stesse grandezze in condizioni di funzionamento effettivo con la tensione V . Informazioni più precise possono essere fornite dai costruttori a seconda del tipo di lampada.

Le correlazioni precedenti sono utili soprattutto in quei siti ad elevata concentrazione di industrie e complessi commerciali che producono notevole assorbimento di potenza elettrica durante le ore di attività con conseguenti forti abbassamenti della tensione di rete. Nelle ore di chiusura degli impianti sia di produzione che di illuminazione nei grandi complessi si hanno nella rete sbalzi verso valori più elevati della tensione. Gli impianti di illuminazione vanno progettati a discrezione e a responsabilità del progettista ma è opportuno scegliere in modo oculato il valore della tensione di alimentazione a seconda del periodo di funzionamento prevalente nell'arco della giornata.

L'Ente erogatore dell'energia elettrica normalmente garantisce una tolleranza di $\pm 10\%$. Si noti che, ad esempio, una diminuzione del 5% della tensione di alimentazione raddoppia la vita media, mentre un aumento del 5% diminuisce la vita media al 30% circa.

Tabella 5 Effetti delle variazioni massime della tensione di rete ($V_0 = 220$ V) sui parametri caratteristici delle sorgenti ad incandescenza

	Sottotensione del 10% $V = 0.9 V_0 = 198$ V	Sovratensione del 10% $V = 1.1 V_0 = 242$ V
Φ/Φ_0	0.69	1.40
I/I_0	0.95	1.05
P/P_0	0.85	1.15
D/D_0	4.15	0.28
η/η_0	0.82	1.20
T_c/T_{co}	0.96	1.04

Caratteristiche delle lampade ad incandescenza

- L'efficienza luminosa, compresa tra 10 e 18 (lm W^{-1}), è la più bassa tra le lampade elettriche. Valori bassi di efficienza comportano consumi energetici più elevati, non trascurabili apporti termici all'ambiente circostante, vita media più corta.
- La temperatura di colore delle lampade ad incandescenza normali è di circa 2500-3000 K.
- La resa cromatica è compresa tra 80 e 100, molto vicina a 100 per molti tipi di lampade.
- Il fattore di decadimento¹⁷ del flusso luminoso è indicativamente intorno all' 85%.
- I tempi di accensione e di riaccensione sono nulli.
- Le potenze elettriche vanno da 15 W a 1000 W¹⁸.
- I costi sono contenuti.

Classificazione delle lampade ad incandescenza

Le lampade ad incandescenza possono essere classificate a seconda del tipo di filamento, del bulbo e dell'attacco.

I vari tipi di filamento delle lampade ad incandescenza sono indicati con le seguenti sigle:

- S Straight (diritto, cioè, non spiralizzato);
- C Coiled (spiralizzato);
- CC Coiled Coil (doppiamente spiralizzato).

Il filamento talvolta si presenta come una poligonale aperta costituita da tre o più lati per assicurare una migliore ripartizione del flusso luminoso nelle diverse direzioni.

Il bulbo delle lampade è contrassegnato da una lettera ed un numero. La lettera classifica la forma, che può essere a goccia, sferica, a candela, a tortiglione, a faretto, etc.

Il numero rappresenta gli ottavi di pollice del diametro del bulbo ($1/8'' = 3,18 \text{ mm}$).

Ad esempio il bulbo A-48 è una lampada di forma normale con il diametro del bulbo pari a:

$$48 \cdot 3,18 = 152,4 \text{ mm} = 15,24 \text{ cm} .$$

Le lampade ad incandescenza attualmente in commercio si dividono in:

- *Lampade GLS (General Lighting Service)*: sono le più comuni negli ambienti domestici e non solo, le più semplici, sono di facile impiego ed a basso costo. Il filamento spiralato è in tungsteno, mentre il bulbo, in vetro tenero al piombo, a forma sferica, può essere chiaro, parzialmente satinato oppure con la superficie interna resa scabra per corrosione da acidi o rivestita da deposito opalescente: generalmente i vetri opacizzati, opalizzati e smerigliati sono usati per ridurre le luminanze e, quindi, l'abbagliamento. La loro curva fotometrica non presenta evidenti asimmetrie e deformazioni se non nella zona dell'attacco. Le lampade GLS possono essere anche di forma cilindrica di piccolo diametro per usi quali l'illuminazione di vetrine, specchi, armadi, acquari etc. e possono presentare una porzione semicilindrica metallizzata per aumentare l'intensità luminosa nel semispazio desiderato.
- *Lampade Reflector*: il bulbo presenta una porzione a forma paraboloidale od ellissoidale trattata in superficie internamente mediante il deposito per precipitazione, pochi grammi

¹⁷ In realtà sarebbe più logico indicare per il fattore di decadimento il suo complemento a 100.

¹⁸ Le potenze normalizzate, espresse in watt, per le lampade ad incandescenza sono: 15, 25, 40, 60, 75, 100, 150, 200, 300, 500, 1000.

per metro quadro, di argento o di cromo o di alluminio. Lo specchio viene depositato all'interno per garantire una valida protezione dall'insudiciamento, dalle polveri e dalla corrosione. Il filamento è generalmente molto compatto e può essere utilmente sistemato proprio nella zona focale dello specchio per assicurare, con l'ausilio di ottiche opportune, fasci convogliati stretti (*spot*) o fasci larghi (*flood*).

Le lampade Reflector a loro volta sono di due tipi:

- *Lampade con bulbo PAR (Parabolic Aluminized Reflector)* costruite per assemblaggio sotto pressione di due elementi in vetro: la parte riflettente lavorata a specchio a forma di coppa e la chiusura superiore in vetro trasparente. Le lampade con bulbo PAR sono molto robuste e sono particolarmente adatte per applicazioni esterne.
- *Lampade in vetro soffiato* note come lampade con *bulbo R*, tra le quali c'è il tipo denominato *Blown-Bulb Reflector*, che presentano la superficie a specchio sulla calotta superiore. Questo tipo di lampada riduce l'abbagliamento ma deve essere assemblata con ottiche che permettano una buona diffusione della luce riflessa.

L'attacco può essere del tipo Edison, a baionetta, a baionetta per lampade auto, a manicotto etc.

L'attacco Edison, che è un attacco a vite, può essere normale indicato dalla sigla E-27, ove il numero indica il diametro dell'attacco in millimetri, o ridotto (comunemente detto *mignon*) E-14 o maggiorato E40.

L'attacco a baionetta può essere B15 o B22.

Lampade alogene

Le lampade ad incandescenza non ebbero ulteriori sostanziali miglioramenti sino alla comparsa, negli anni intorno al 1960, delle lampade alogene, evoluzione di quelle ad incandescenza tradizionali in cui l'atmosfera interna è arricchita con piccole quantità di iodio o di bromo. Per questo sono dette anche lampade *Iodine (nome inglese dello Iodio)* o *a ciclo rigenerativo allo iodio* e lampade *bromine (nome inglese del Bromo)* o *a ciclo rigenerativo al bromo*.

Il principio di funzionamento, nella fase di emissione della luce, è esattamente lo stesso di quello delle normali lampade ad incandescenza. La modifica sostanziale che produce un miglioramento significativo delle prestazioni ottenibili riguarda proprio l'inserimento nel bulbo dello iodio che con il tungsteno sublimato da origine alla seguente reazione reversibile:



o reazioni analoghe con altri alogeni come con il bromo:



Nel ciclo rigenerativo allo iodio il prodotto della reazione, lo ioduro di tungsteno così come il bromuro di tungsteno nel ciclo rigenerativo al bromo, perfettamente trasparenti alla luce, sono stabili a temperature minori di circa 1400 °C. La stabilità del prodotto evita il deposito di tungsteno sul bulbo di vetro dove la temperatura è minore di 200 °C. Nei pressi del filamento si instaurano temperature molto più elevate alle quali gli ioduri di tungsteno

risultano instabili e si scindono di nuovo nei componenti originari. L'instabilità a temperature superiori a 1400 °C facilita pertanto il deposito del tungsteno sulla superficie incandescente del filamento e la liberazione dell'atomo di alogeno che si trova disponibile per un altro ciclo: il ruolo dell'alogeno è assimilabile a quello del *bounty-hunter* sempre in giro alla caccia di evasi da catturare e da riportare indietro, verrebbe da dire al fresco ma viste le temperature!

Il ciclo rigenerativo aumenta la resistenza meccanica del filamento consentendo un significativo incremento della vita media e della temperatura di esercizio. A temperature più elevate si produce una luce più bianca poiché la curva di emissione del tungsteno, descritta dalla legge di Planck, si sposta verso valori di lunghezza d'onda più bassi con una più uniforme distribuzione dell'energia luminosa alle varie lunghezze d'onda dello spettro del visibile. Contemporaneamente, l'aumento di temperatura fa aumentare la potenza radiante globalmente emessa con una conseguente maggiore efficienza luminosa della lampada.

A causa della possibile aggressione dell'alogeno, della elevata temperatura e della elevata pressione il vetro non è adatto e viene sostituito dal vetro boro silicato, detto impropriamente quarzo, che resiste a temperature fino a 1300 K.

Il bulbo delle lampade alogene può raggiungere temperature attorno ai 260 °C. L'elevata pressione interna impone geometrie di dimensioni contenute e ciò rende le lampade alogene particolarmente consigliabili per quelle applicazioni che richiedono sorgenti luminose concentrate. La notevole compattezza di queste lampade ben si coniuga con ottiche particolari che emettono fasci luminosi molto concentrati senza apprezzabili dispersioni, da dirigere con precisione dove la luce è maggiormente richiesta, come nelle applicazioni automobilistiche, nelle proiezioni cinematografiche e nelle rappresentazioni teatrali, nell'illuminazione di interni con faretti etc.

Le pressioni all'interno del bulbo sono elevate e per questo le norme prevedono una schermatura con un secondo involucro in vetro pyrex o in metacrilato per la protezione degli utenti da possibili esplosioni accompagnate dal lancio di schegge roventi. La protezione serve anche per evitare che si tocchi con le mani il bulbo principale lasciando pellicole di sudore e che insetti inavveduti e spericolati vadano a farsi rosolare sul quarzo rovente: sudore delle mani ed insetti che si arrostitiscono provocano la dequarizzazione del bulbo rendendolo non più idoneo a resistere alle normali temperature di esercizio e, quindi, ne sanciscono la rottura.

Caratteristiche delle lampade alogene:

- La vita media delle lampade alogene è attorno alle 2000 ore.
- L'efficienza è di 20-27 lm/W, non è un valore straordinario ma risulta essere più costante nel tempo rispetto alle normali lampade ad incandescenza.
- La temperatura di colore è di circa 4500 K.
- La resa cromatica è compresa tra 80 e 100.
- Il decadimento del flusso luminoso è del 94%.
- I tempi di accensione e riaccensione sono nulli.

Molto spesso le lampade alogene sono corredate di un *dimmer*, regolatore continuo del flusso luminoso, che personalizza il loro impiego adattandolo alle diverse esigenze dell'utente. Il dimmer controlla il flusso luminoso mediante la regolazione della potenza elettrica dissipata e, quindi, mediante la temperatura di funzionamento della lampada: da osservare però che alle basse temperature la luce emessa ha una tonalità rossastra e, inoltre, sempre alle basse temperature potrebbe essere vanificata l'efficacia dell'alogeno con conseguente severa riduzione della vita media.

Anche le lampade alogene, come quelle ad incandescenza Par o R, possono essere corredate di un riflettore a specchio interno ottenuto per doratura o argentatura o con alluminio anodizzato. Inoltre, in alternativa a questi tipi, si hanno anche lampade alogene dicroiche ($\delta\iota\chi\rho\omicron\omicron\varsigma$, dicroos, *di due colori*) chiamate anche *lampade fredde*. Il nome è giustificato dal fatto che una porzione del bulbo di vetro è trattata in modo da presentare un coefficiente di trasmissione selettivo rispetto alla lunghezza d'onda comportandosi come un filtro che divide il fascio luminoso in due.

La superficie con trattamento dicroico lascia passare anche il 70 % dell'irraggiamento IR e riflette il restante 30% e le lunghezze d'onda del visibile. Le lampade dicroiche con la superficie trattata posteriormente consentono una emissione di luce a basso contenuto termico, avendone disperso una gran parte lungo direzioni non importanti per la zona dove si svolge il compito visivo, prestandosi particolarmente per quelle applicazioni di illuminamento di merci, opere d'arte, particolari architettonici che possono deteriorarsi con il calore: per questo le lampade dicroiche sono chiamate talvolta anche lampade alogene a luce fredda. Dal momento che le bande che possono essere trasmesse sono selezionabili, le lampade dicroiche possono fornire anche luce colorata adatta per particolari prestazioni e compiti visivi. La colorazione della luce può essere ottenuta più semplicemente con il vetro colorato caricando, durante il processo di formazione, la massa colloidale del vetro con specifici composti metallici:

ossido di ferro	blu-verde
ossido rameo	rosso-viola
ossido ramico	blu-verde
ossido di cobalto	blu intenso
oro e stagno	dal rosa al porpora
selenio e cadmio	dal rosso al giallo arancio
cobalto, selenio, ferro	colore bronzo
cobalto, selenio, ferro, cromo	grigio.

Gli attacchi delle lampade alogene possono essere del tipo Edison, a baionetta unilaterale e a baionetta bilaterale.

Lampade alogene a bassa tensione

Oltre alle normali lampade alimentate a 220 V sono in commercio anche lampade alogene di dimensioni molto ridotte, che possono essere montate su apparecchi molto compatti, con tensioni di funzionamento di 6 V, 12 V e 24 V alimentate da rete tramite trasformatore.

Allo scopo di approntare un confronto indicativo tra il comportamento di una lampada a bassa tensione di temperatura T_x , di area superficiale del filamento A_x ed una alimentata a 220 V avente temperatura T_o ed area A_o , si supponga, come caso particolare, che le due lampade, costituite da filamenti dello stesso materiale, emettano flussi luminosi specifici, riferiti cioè all'unità di superficie, identici e, quindi, aventi la stessa qualità della luce o lo stesso spettro all'interno del visibile. In queste condizioni i due fili hanno anche la stessa temperatura ($T_x = T_o$). Nell'ipotesi inoltre che anche i flussi totali emessi sono uguali si vede facilmente che sono uguali anche le superfici emittenti ($A_x = A_o$).

Dalla uguaglianza delle aree superficiali si ha:

$$\frac{l_x}{l_o} = \frac{d_o}{d_x}$$

dove l_x e l_o sono le lunghezze e d_x e d_o sono i diametri dei due fili.

Alle ipotesi restrittive di uguaglianza degli spettri di emissione e dei flussi luminosi si aggiunga anche l'ipotesi dell'uguaglianza delle potenze elettriche dissipate per la alimentazione delle due lampade, supponendo almeno inizialmente la stessa efficienza luminosa:

$$\left(\frac{V_x}{V_o}\right)^2 = \frac{R_x}{R_o} = \frac{l_x}{l_o} \left(\frac{d_o}{d_x}\right)^2 = \left(\frac{d_o}{d_x}\right)^3 = \left(\frac{l_x}{l_o}\right)^3$$

dalla quale:

$$d_x = d_o \left(\frac{V_o}{V_x}\right)^{\frac{2}{3}}$$

$$l_x = l_o \left(\frac{V_o}{V_x}\right)^{\frac{2}{3}}$$

dove V_x e V_o (220 V) sono le differenze di potenziale mentre R_x e R_o sono le resistenze elettriche dei due fili.

Tabella 6 Rapporti tra diametri e lunghezze dei fili per diversi valori della tensione.

	6 V	12 V	24 V
d_x/d_o	11.04	6.95	4.38
l_x/l_o	0.09	0.14	0.23

A mano a mano che si diminuisce la tensione di alimentazione V_x la lunghezza del filo diminuisce, mentre il diametro aumenta secondo i rapporti riportati in tabella lasciando inalterata la qualità della luce.

Queste considerazioni, ricavate per casi particolari riguardanti la parità dei risultati, evidenziano una tendenza e segnalano chiaramente un possibile criterio di intervento nel verso di una miniaturizzazione del filo. Fili più corti e di diametro più grosso consentono anche una miniaturizzazione della lampada e di tutto il sistema ottico ottenendo fasci luminosi più concentrati e più facilmente orientabili. Quando si elencano i vantaggi della miniaturizzazione delle sorgenti e delle lampade luminose occorre anche mettere nel conto i valori delle luminanze in gioco, perché potrebbe presentarsi il problema dell'abbagliamento di cui si tratterà in seguito. Inoltre, minori lunghezze comportano dispersioni termiche più contenute per convezione e, quindi, un miglior sfruttamento dell'energia impiegata e, quindi in ultima analisi, una migliore efficienza luminosa. Le lampade alogene a bassa tensione hanno una elevata resa cromatica e sono particolarmente adatte per negozi raffinati, vetrine, chiese, pinacoteche, mostre etc.

Sorgenti luminose a scarica nei gas

Verso la fine del XIX secolo molti ricercatori, tra questi in particolare Sir William Crookes¹⁹, condussero prove in laboratorio che ebbero come oggetto lo studio della scarica elettrica in tubi riempiti con gas a bassa pressione e l'analisi degli spettri discontinui a righe o a bande di emissione della scarica stessa. Il fisico francese Georges Claude²⁰ lavorò per primo con un tubo pieno di neon ottenendone una luce monocromatica di un intenso rosso vivo utilizzata quasi subito soprattutto per scopi decorativi e per insegne pubblicitarie.

Seguì una intensa sperimentazione con il vapore di mercurio che emette luce blu e tanto irraggiamento UV e con il vapore di sodio che emette una luce monocromatica giallognola che dava un colorito di un pallore cadaverico ai visi ma aveva una buona resa sulle facciate degli edifici storici.

Le lampade a scarica non ebbero, quindi, grande fortuna nella illuminazione degli interni fino alla comparsa dei tubi fluorescenti, avvenuta negli anni attorno al 1930, contenenti vapori di mercurio e con le pareti interne del tubo ricoperte da depositi di polvere fluorescente. Fino ai primi anni '50 l'orientamento generale è stato quello di usare le lampade incandescenti e fluorescenti per gli interni mentre per gli esterni e per le insegne luminose lampade a scarica al neon e simili e lampade a vapori di sodio particolarmente adatte per l'illuminazione stradale. La prima insegna luminosa, fu installata da un certo W.J. Hammer a Londra per reclamizzare uno sconto nella vendita della legna mentre la prima insegna al neon negli Stati Uniti fu installata nel 1923 sulla facciata del vecchio Cosmopolitan Theater di New York City.

Dal 1970 si cambiò radicalmente con il grande impulso delle lampade al sodio ad alta pressione buone sia per interni che per esterni. Più recentemente sono apparse in commercio le lampade allo xenon con luce simile a quella naturale del sole.

Dopo questa breve rassegna storica tornano sicuramente utili alcuni richiami della fisica di base relativa al processo della scarica elettrica nei gas limitando tali cenni ai soli gas ideali con molecola monoatomica senza considerare, quindi, gli stati eccitati nei modi vibrazionali e rotazionali.

Un atomo si trova nella configurazione stabile o neutra quando tutti i suoi elettroni occupano le loro orbite naturali caratterizzate ciascuna dal proprio livello energetico tipico dell'atomo considerato.

Gli elettroni di un atomo sono in grado, acquistando quanti ben definiti di energia, di saltare su orbite stazionarie via via più distanti dal nucleo. Questo stato è detto di "eccitazione" e l'atomo che ne è interessato si definisce "eccitato". E' uno stato di equilibrio instabile, dal quale l'atomo tende spontaneamente a tornare alla configurazione iniziale, a più basso contenuto di energia, quindi di equilibrio stabile, rimettendo l'energia immagazzinata. Quando l'energia acquisita, o in una successione di interazioni o in un'unica soluzione, è tale da provocare l'uscita dall'ultima orbita, allora l'elettrone è

¹⁹ Sir William Crookes (London, 1832 - 1919) fu fisico-chimico.

²⁰ Georges Claude (1870 - 1960) fu ingegnere chimico. Spetta a lui il merito delle prime lampade al neon apparse in commercio nel 1910 prevalentemente impiegate per insegne luminose.

definitivamente libero senza più alcun legame con lo ione originario. L'energia necessaria per questo processo è detta "energia di ionizzazione"²¹ e l'atomo "ionizzato".

Gli elettroni che hanno probabilità più elevate di essere eccitati mediante l'intervento di forze esterne sono quelli di valenza, quelli, cioè, che ruotano su orbite più esterne, dal momento che il coinvolgimento di quelli più interni richiederebbe elevati apporti di energia per la eccitazione e, a maggior ragione, ancora più elevati per la ionizzazione (raggi X). Le forze esterne in grado di provocare l'eccitazione o la ionizzazione dell'atomo possono essere di diversa natura: interazioni con fotoni aventi lunghezza d'onda nell'ultravioletto e nel visibile, ovvero urti con elettroni liberi dotati di sufficiente energia cinetica. E' da osservare che, a temperatura ambiente, l'energia cinetica dovuta alla agitazione termica molecolare è normalmente molto piccola rispetto alla energia di ionizzazione²², che è dell'ordine di qualche eV, pertanto gli urti, dovuti all'agitazione termica tra le molecole del gas, non contribuiscono in modo significativo alla produzione di ioni.

Come già accennato, dalla condizione di eccitazione, dopo un breve intervallo di tempo, l'atomo eccitato torna nella configurazione stabile iniziale, attraverso un processo di diseccitazione. Questo ha luogo mediante dissipazione dell'energia acquisita nella eccitazione attraverso l'emissione di quanti di energia non sempre visibile, soltanto quando la lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica emessa è compresa nello spettro del visibile. Per l'approfondimento di questo aspetto si rimanda a testi specializzati di struttura della materia, di fisica teorica e meccanica quantistica.

Nella massa gassosa possono essere già presenti elettroni liberi in grado di perturbare lo stato di neutralità e di stabilità dell'atomo oppure possono essere emessi da un catodo metallico opportunamente riscaldato (effetto termoionico scoperto da Edison) o da un catodo metallico opportunamente illuminato (effetto fotoelettrico): il riscaldamento o l'irraggiamento forniscono agli elettroni l'energia cinetica necessaria per superare la barriera di potenziale superficiale.

Nelle lampade a scarica l'effetto principalmente usato per la produzione di elettroni primari è quello termoionico essendo quello fotoelettrico influente principalmente all'interno della massa gassosa.

²¹La prima energia di ionizzazione è la minima quantità di energia che serve all'elettrone meno legato, alla temperatura di riferimento di 0 K, per saltare la barriera di energia potenziale ed uscire libero dal metallo stesso.

²²Ricordando che la costante di Boltzmann vale:

$$k = \frac{R}{N} = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ (JK}^{-1}\text{)} = 8.620 \cdot 10^{-5} \text{ (eV K}^{-1}\text{)}$$

dove R = è la costante universale dei gas mentre N = $6.03 \cdot 10^{23}$ (molecole/grammolecola) è il numero di Avogadro.

Per la teoria cinetica dei gas c'è corrispondenza tra moto molecolare e temperatura e, pertanto, alla temperatura ambiente di 298 K l'energia cinetica E_c di una molecola monoatomica vale:

$$E_c = \frac{3}{2} kT = 0.0385 \text{ (eV)}$$

mentre per una molecola biatomica:

$$E_c = \frac{5}{2} kT = 0.0642 \text{ (eV)}$$

anche se le velocità sono generalmente elevate (dell'ordine anche di 10^3 m s^{-1}). Le velocità a parità di energia cinetica variano in ragione inversa con la massa molecolare assoluta m o con la massa molecolare relativa M:

Per un gas monoatomico:
$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Per un gas biatomico:
$$v = \sqrt{\frac{5kT}{m}} = \sqrt{\frac{5RT}{M}}$$

Effetto termoionico

In un tubo a scarica gli elettroni liberi provengono da un elettrodo metallico riscaldato per effetto Joule.

La corrente termoionica I_t (A), così generata in assenza di campi elettrici esterni, è data dalla seguente relazione teorica nota come formula di Richardson-Fermi nota talvolta anche come formula di Dushman:

$$I_t = SA_o T^2 e^{-\frac{E_w}{kT}}$$

dove S è l'area della superficie emittente (m^2), A_o è una costante uguale, per un metallo ideale, a $60,2 \cdot 10^4$ ($A m^{-2} K^{-2}$), T è la temperatura assoluta (K), k è la costante universale di Boltzmann ($J K^{-1}$), E_w è il lavoro di estrazione (J) caratteristico del metallo emittente. La corrente termoionica aumenta molto rapidamente con la temperatura.

Tabella 7 Valori di A_o per alcuni metalli.

Metallo	A_o ($A m^{-2} k^{-2}$)
Tungsteno	60.2
Molibdeno	60.2
Tantalio	60.2
Zirconio	330
Platino	17000
Tungsteno toriato	30
Alluminio	1.4
Magnesio	$1.1 \cdot 10^{-5}$

Differenziando la relazione di Richardson-Fermi rispetto alla temperatura si ottiene:

$$dI_t = SA_o T^2 e^{-\frac{E_w}{kT}} \left(\frac{2}{T} + \frac{E_w}{kT^2} \right) dT = I_t \left(\frac{2}{T} + \frac{E_w}{kT^2} \right) dT$$

$$\frac{dI_t}{I_t} = \left(2 + \frac{E_w}{kT} \right) \frac{dT}{T}$$

Siccome il fattore entro parentesi, per temperature comprese tra 2000 K e 3000 K, range di interesse per l'illuminotecnica, assume per i metalli un valore tra 15 e 30, si deduce che la corrente termoionica è molto sensibile alle variazioni di temperatura.

Quando la corrente termoionica è trascurabile l'elettrodo emittente si dice "freddo".

La termoemissione può essere modulata con un campo elettrico pilota che controlla la barriera di potenziale. Si può dimostrare che in presenza di un campo elettrico E ($V m^{-1}$) la corrente termoionica I(A) è:

$$I = I_t \frac{0.440E}{T}$$

dove T è la temperatura assoluta (K), I_t è la corrente termoionica in assenza di campo elettrico. L'emissione termoionica non è la corrente che si instaura tra anodo e catodo ma

è soltanto l'emissione dall'elettrodo caldo. Si può avere corrente termoionica anche da un elettrodo freddo purché sollecitato da campi elettrici di elevata intensità.

ESEMPIO

Calcolare la corrente termoionica emessa da 1 cm^2 di tungsteno alla temperatura di 2000 K sapendo che il potenziale di estrazione del tungsteno vale 4.6 V.

Il lavoro di estrazione è:

$$E_w = e V = 4,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 7,36 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

pertanto:

$$I_t = 60,2 \cdot 10^4 \cdot 2,273^2 \cdot 10^6 \cdot e^{-23,447} \cdot 10^{-4} \cong 20 \text{ mA}$$

A parità di condizioni quanto emette il tungsteno toriato?

Per il tungsteno toriato $A_o = 3,0 \cdot 10^4 \text{ (A m}^{-2} \text{ K}^{-2})$, il potenziale di estrazione vale 2,63 V ed il lavoro di estrazione vale $4,208 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, pertanto la corrente termoionica è:

$$I_t = 3,0 \cdot 10^4 \cdot 2,273^2 \cdot 10^6 \cdot e^{-13,406} \cdot 10^{-4} \cong 23 \text{ A}$$

che risulta circa 1000 volte maggiore.

La temperatura di lavoro del catodo di tungsteno è circa 2500 K, per il tungsteno toriato è di circa 1900 K mentre per il tungsteno ricoperto di ossidi di metalli alcalino-terrosi, come ad esempio, ossidi di bario e di stronzio, è circa 1000 K.

Gli elettroni liberi accelerati dal campo elettrico scambiano energia mediante urti elastici ed anelastici²³ con atomi e molecole della massa gassosa. Durante l'urto tra l'elettrone accelerato ed un atomo o una molecola può verificarsi una delle seguenti situazioni:

- Se la velocità dell'elettrone libero è bassa l'urto è elastico: l'elettrone libero, che ha una massa molto minore di quella della molecola del gas conserva approssimativamente l'energia cinetica precedente all'urto, avendone ceduta poca alla molecola di gas, ma varia di molto la quantità di moto, in quanto varia sensibilmente la direzione della velocità dopo l'urto, secondo le leggi classiche della conservazione della quantità di moto.
- Se la velocità dell'elettrone libero è sufficientemente elevata, nell'urto si potrebbe avere quello scambio di energia giusto per la eccitazione dell'atomo con salto da un livello stazionario ad un altro più elevato con conseguente ritorno allo stato iniziale accompagnato dall'emissione di un fotone.
- L'energia scambiata durante l'urto può essere maggiore dell'energia di ionizzazione e, quindi, sufficiente a liberare un elettrone con formazione di uno ione positivo. In questa situazione si ha un aumento delle cariche (elettroni liberi) che contribuiscono alla corrente entro la massa del gas.

E' evidente che non è richiesto che l'elettrone libero responsabile dell'urto abbia esattamente la giusta quantità di energia di eccitazione o di ionizzazione, ma soltanto che non ne abbia di meno. L'eventuale eccesso rimane dopo l'urto sotto forma di energia cinetica del solo elettrone libero, nel caso della eccitazione, o dei due elettroni liberi nel caso della ionizzazione.

La composizione spettrale della luce emessa attraverso il meccanismo della scarica in gas è molto diversa da quella ottenuta attraverso il meccanismo dell'incandescenza di un metallo solido, come nel caso del tungsteno nella lampada ad incandescenza. Quest'ultima emette infatti seguendo una distribuzione spettrale continua nel campo del visibile, mentre le lampade a scarica in gas producono una luce con spettro di emissione a

²³ Si definisce elastico un urto tra due corpi che avviene senza alcuna dissipazione di energia meccanica, mentre è anelastico un urto in cui una parte dell'energia meccanica del corpo in movimento viene dissipata (ad esempio sotto forma di energia di deformazione del corpo urtante o di quello urtato).

righe, in cui cioè sono presenti le componenti relative solo ad alcune lunghezze d'onda all'interno di fasce o righe più o meno strette tipiche dell'elemento chimico considerato che riempie il bulbo in forma gassosa e all'interno del quale avviene la scarica.

Effetto fotoelettrico

Un altro importante modo di estrazione di un elettrone dalla superficie di un metallo è ottenuto mediante l'esposizione all'irraggiamento ultravioletto o visibile. L'emissione di elettroni per irraggiamento di una superficie metallica può avvenire soltanto se la frequenza della radiazione soddisfa la seguente legge, nota come la I^a Legge dell'effetto fotoelettrico:

$$\nu \geq \frac{E_w}{h}$$

dove ν è la frequenza, h è la costante di Planck, E_w è l'energia di estrazione. La frequenza critica ν_o , o soglia fotoelettrica:

$$\nu_o = \frac{E_w}{h}$$

è la frequenza al di sotto della quale non avviene fotoionizzazione o analogamente:

$$\lambda_o = \frac{ch}{E_w}$$

dove λ_o è la lunghezza d'onda critica al di sopra della quale non avviene ionizzazione. L'intensità della radiazione incidente non influisce sulla energia degli elettroni emessi ma soltanto sul loro numero, e questa è la II^a Legge dell'effetto fotoelettrico. Inoltre, l'energia cinetica dell'elettrone emesso, appena libero, è compresa tra 0 ed E_{cmax} data da:

$$E_{cmax} = h(\nu - \nu_o)$$

La velocità dell'elettrone può essere successivamente aumentata mediante l'azione di un campo elettrico.

L'interazione tra materia e irraggiamento elettromagnetico può avvenire anche nella massa di un gas il cui atomo può assorbire un fotone di frequenza ν e, quindi, passare da un livello di energia E_1 ad uno di energia più elevata $E_2 = E_1 + h\nu$.

A differenza di quanto avviene nel caso della eccitazione per urto tra atomo ed elettrone, il fotone può essere assorbito soltanto se la sua energia è esattamente quella indispensabile per il salto tra due livelli stazionari. Se il fotone possiede una energia $E_{in} > (E_2 - E_1)$ non c'è da aspettarsi che la parte giusta venga assorbita mentre l'eccesso è emesso come energia luminosa con frequenza:

$$\nu' = \frac{E_{in} - (E_2 - E_1)}{h}$$

La eccitazione per impatto con i fotoni esige uno scambio esatto di energia senza resti. L'atomo eccitato assume dopo un certo lasso di tempo la configurazione normale o in un solo salto o in una sequenza di salti passando per livelli stazionari. Se il salto è unico (caso di emissione per risonanza) i fotoni emessi hanno la stessa lunghezza d'onda di quelli incidenti; ma se i salti sono più di uno, i fotoni emessi hanno lunghezze d'onda diverse tra loro e da quella incidente: questo è il cosiddetto fenomeno della fluorescenza. Nel caso invece della ionizzazione per impatto con fotoni (effetto fotoelettrico), il fotone scompare interamente e la sua energia genera un elettrone ed uno ione positivo. La fotoionizzazione, a differenza di quanto accade per la fotoeccitazione, può aver luogo anche quando l'energia iniziale del fotone incidente è maggiore di quella richiesta per la ionizzazione: l'eccesso oltre il quanto si distribuisce sotto forma di energia cinetica dei prodotti della ionizzazione.

I quanti di energia che interessano il visibile sono compresi tra 1,8 eV (40 kcal/mole) per la luce rossa e 3,1 eV (80 kcal/mole) per la luce viola.

Gli ioni prodotti a loro volta concorrono alla formazione di altri ioni all'interno della massa gassosa ed alla estrazione di elettroni nell'impatto con l'elettrodo di segno contrario.

Inoltre, esistono stati stazionari che possono essere eccitati per urto con elettroni ma non per interazione con i fotoni: questi sono chiamati stati metastabili. La diseccitazione di uno stato metastabile non avviene con emissione di fotoni ma o mediante dissipazione sotto forma di energia cinetica ceduta ad altri atomi, o mediante accumulo di energia potenziale cumulabile con altri apporti energetici, provenienti per esempio da urti con elettroni liberi, fino al raggiungimento del quanto necessario o alla eccitazione o alla ionizzazione.

Nei tubi a scarica l'apporto della diseccitazione degli stati metastabili provoca il riscaldamento delle pareti e contribuisce alla cosiddetta emissione secondaria.

Tabella 8 Alcune grandezze caratteristiche dei metalli più usati come elettrodi nei tubi a scarica.

Materiale	Potenziale di Estraz. (V)	Energia di Estraz. (J)	Soglia fotoelettrica 10^{-15} (Hz)	Lunghezza d'onda di soglia (nm)
Platino	6	9.60	1.449	207
Tungsteno	4.6	7.36	1.111	270
Rame	4.4	7.04	1.062	282
Tantalio	4.2	6.72	1.014	296
Zinco	3.4	5.44	0.821	365
Torio	3.3	5.28	0.797	376
Ferro	3.2	5.12	0.773	388
Calcio	3.2	5.12	0.773	388
Sodio	2.7	4.32	0.652	460
Ossido di calcio	0.6-1.7	0.96-2.72	0.145-0.411	2068-729
Mercurio	6.5	10.39	1.578	190

Caratteristica della scarica nei gas

Il numero di ioni prodotti per urto nei tubi a scarica dipende in ragione diretta dal campo elettrico ed in ragione inversa dalla pressione: è pertanto possibile variare la produzione di ioni modulando opportunamente le due grandezze. Se, però, la variazione di entrambe è tale da non alterare il loro rapporto (E/p) allora rimane costante la produzione di ioni per urti: questa è la legge di Paschen²⁴.

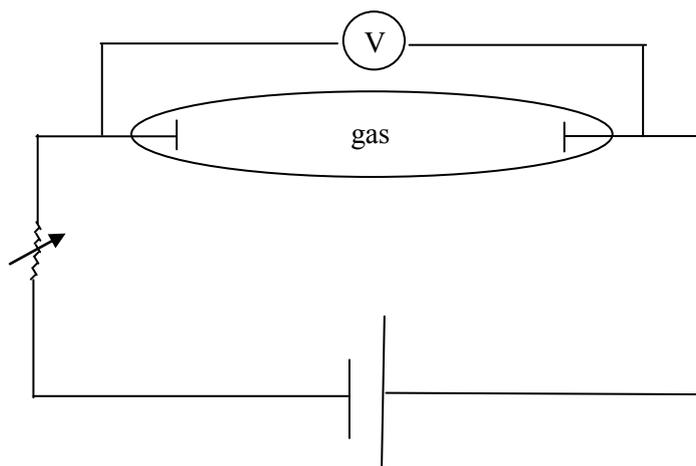
²⁴ Louis Carl Heirich Friedrich Paschen (Schworin 1865- Potsdam 1947).

Mantenendo costante la pressione all'interno di un tubo a scarica avente una determinata geometria, la corrente elettrica tra i due elettrodi può essere rappresentata come funzione della differenza di potenziale ΔV attraverso una relazione del tipo:

$$\Delta V = \Delta V(I)$$

detta caratteristica del tubo a scarica ottenuta sperimentalmente con un voltmetro, ad alta impedenza interna, in parallelo con il tubo alimentato da una data f.e.m. costante attraverso una resistenza modulabile (reostato) in serie (cfr. Figura 1).

Figura 12



Se tra i due elettrodi viene innescata una tensione dal generatore di forza elettromotrice, all'interno del gas si produce un campo elettrico che dà luogo ad una corrente elettrica, costituita da un flusso di elettroni che si muove dall'elettrodo negativo (catodo) verso quello positivo (anodo).

In un conduttore ohmico, la corrente elettrica sarebbe direttamente proporzionale alla tensione applicata (secondo la legge di Ohm), quindi tra ΔV ed I ci sarebbe una dipendenza lineare, ma, nel nostro caso, il fenomeno avviene all'interno di un gas dove si verifica una situazione molto più complessa. Facendo variare la corrente all'interno del tubo mediante modulazione della resistenza (reostato) e misurando questa corrente con un amperometro, la caduta di tensione ai capi degli elettrodi, misurata dal voltmetro, varia secondo la relazione caratteristica del gas considerato.

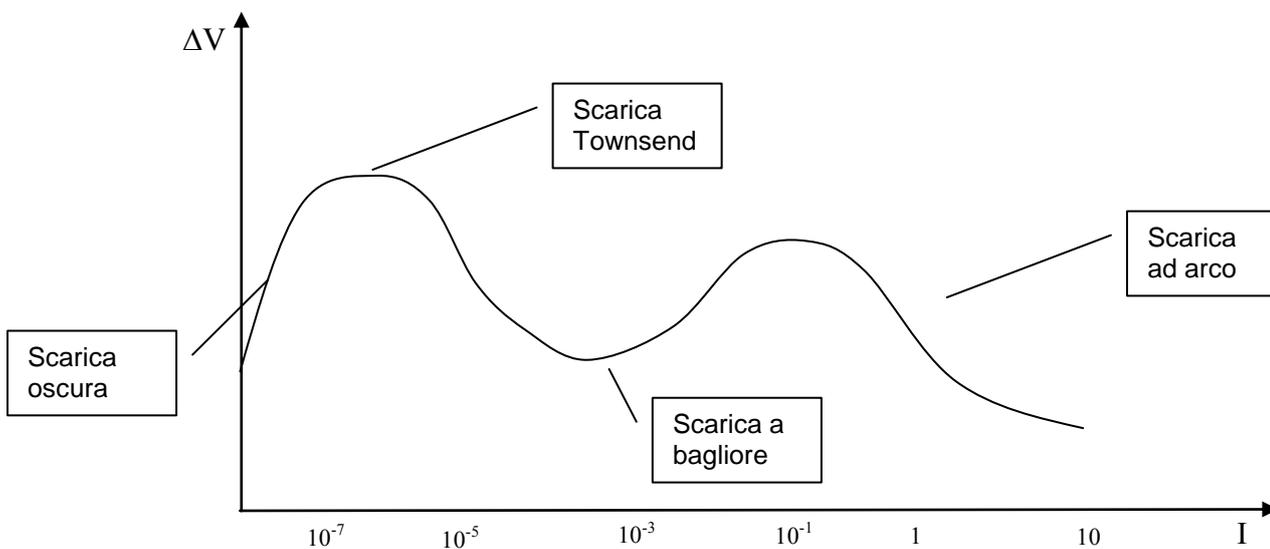
La struttura matematica della relazione tra ΔV ed I dipende dalla natura del gas, dalla geometria (forma e dimensioni) degli elettrodi e dalla pressione. La dipendenza dalla pressione è giustificata dal fatto che maggiore è la pressione, minore è il libero cammino medio, minore, quindi, è l'energia cinetica acquisita tra due urti consecutivi, minore, infine, è la capacità di partecipare alla eccitazione ed alla ionizzazione di altri atomi.

Nella molteplicità delle espressioni analitiche si possono individuare alcuni aspetti ricorrenti illustrati nella figura 13 seguente.

Il primo tratto evidenzia un andamento quasi lineare a comportamento ohmico con piccole variazioni di corrente elettrica anche per importanti variazioni di potenziale: in queste condizioni tra anodo e catodo non si hanno importanti accumuli di cariche spaziali. La corrente che attraversa il gas è assolutamente non autonoma ed è piccola ($10^{-8} \div 10^{-6}$ A), ed è formata prevalentemente dai cosiddetti ioni primari prodotti da agenti esterni quali gli elettroni liberi o i fotoni. Durante il cammino libero gli ioni non hanno modo di acquistare energia cinetica sufficiente ad ionizzare ed eccitare a loro volta. In queste condizioni la corrente elettrica non emette luce e per questo motivo la scarica è detta oscura.

Nel tratto successivo la corrente elettrica (10^{-6} - 10^{-5} A) è aumentata a tal punto da generare ioni secondari. In questa seconda fase la corrente elettrica, detta scarica Townsend, si alimenta da sé diventando autonoma senza più il bisogno del contributo esterno degli agenti ionizzanti. E' evidente che l'aumento della ionizzazione si accompagna anche ad un significativo aumento del numero di molecole eccitate le quali, ritornando alla configurazione stabile fondamentale, emettono luce (regime di luminescenza).

Figura 13: Curva caratteristica della scarica



La differenza di potenziale che inizia la scarica autonoma e' la cosiddetta tensione di accensione o di innesco, che per un tubo con elettrodi piani e paralleli è direttamente proporzionale al prodotto tra la pressione p del gas di riempimento e la distanza d tra gli elettrodi, come si ricava dalla già citata legge di Paschen:

$$\frac{E}{P} = \frac{\Delta V}{P \cdot d} = \text{cost}$$

$$\Delta V = \text{cost} \cdot P \cdot d$$

Nel terzo tratto la ionizzazione si riproduce con un processo a valanga e conseguentemente la corrente elettrica (10^{-5} - 10^{-3} A) aumenta ulteriormente mentre la differenza di potenziale tra gli elettrodi diminuisce. In prossimità degli elettrodi si formano accumuli di cariche spaziali di segno opposto. Le cariche spaziali hanno l'effetto di alterare sostanzialmente l'andamento del campo elettrico. Nella parte centrale la elevata concentrazione di cariche di entrambi i segni che si spostano nei versi opposti contribuisce sia alla ionizzazione che alla eccitazione. Il fenomeno più rilevante, comunque, è la scarica (detta scarica a bagliore) che si ha in prossimità del catodo dovuta ad ioni primari

e secondari ed in più ad elettroni e ad ioni estratti direttamente dagli elettrodi per effetto dell'impatto degli ioni primari e secondari. La differenza di potenziale in questa situazione non è più tra gli elettrodi metallici ma tra il catodo e l'estremità della carica spaziale positiva che è arrivata a coprire gran parte del volume a disposizione entro il tubo. Durante la scarica a bagliore la differenza di potenziale, che è diminuita rispetto a quella di innesco, resta circa costante.

Nel quarto tratto l'intensità di corrente (maggiore di 1 A) aumenta ancora e si ha la scarica ad arco alla quale concorrono anche gli elettroni emessi per effetto termoionico dal catodo riscaldato, fino a 900 °C, dall'impatto con gli ioni positivi: in questo tratto la tensione diminuisce.

L'emissione secondaria da un materiale (metallo o dielettrico) sottoposto a bombardamento di elettroni primari dipende sostanzialmente da tre fattori:

- numero di elettroni primari;
- energia degli elettroni primari,
- angolo di incidenza sulla superficie.

Il rapporto:

$$\delta = \frac{N^{\circ}elett. \text{ secondari}}{N^{\circ}elett. \text{ primari}}$$

è normalmente piccolo per metalli puri ($\delta < 2$) ma aumenta sensibilmente se sulla superficie c'è depositato uno strato di metallo alcalino $\delta = 10-15$.

Il rapporto δ è funzione dell'energia E degli elettroni primari incidenti e presenta un andamento dotato di massimo. Difatti, il rapporto δ è ovviamente piccolo per piccoli valori di E, mentre al crescere di E il numero di elettroni secondari aumenta per poi diminuire per valori energetici ancora più elevati che consentono agli elettroni primari di penetrare più a fondo nello strato solido e liberare elettroni secondari che hanno bassa probabilità di essere emessi in quanto per loro è elevata la probabilità di collidere con altre particelle circostanti e, quindi, di dissipare l'energia acquisita nell'impatto con l'elettrone primario.

La tensione d'arco è sempre minore della tensione di accensione.

Per ragioni pratiche di contenimento dei consumi elettrici, di aumento della vita media delle lampade a scarica è importante lavorare con basse tensioni di accensione. Per questo si ricorre ad uno o più tra gli accorgimenti seguenti:

- Riempimento con gas rari (He, Ne, Ar, Kr, Xe) per le cui molecole, tutte monoatomiche, il lavoro di ionizzazione è molto basso, circa uguale al lavoro di eccitazione.

Tabella 9 Energia di ionizzazione dei gas rari e colorazione della scarica a bagliore a bassa ed ad alta pressione

Gas	Colore della scarica	Prima En. Ioniz. (eV)
Elio	Giallo	24.586
Neon	Rosso	21.563
Argon	(b.p.) rosso pallido (a.p) blu	15.759
Cripton	giallo-verde	13.999
Xenon	blu-verde	12.129

- Riscaldamento del catodo per aumentare l'emissione degli elettroni liberi. Il catodo di tungsteno è riscaldato sino a circa 2200 °C mentre il tungsteno ricoperto da un sottile strato di torio ha una temperatura di emissione di circa 1700 °C.
- Copertura del catodo con uno strato di materiale fotosensibile come, per esempio, il cesio²⁵ o con strati di ossidi di metalli alcalino-terrosi (ossido di bario²⁶, ossidi di stronzio²⁷, ossido di calcio²⁸). Dotati di bassa barriera potenziale superficiale (potenziale di estrazione di 1-2 V) queste sostanze richiedono una temperatura di emissione di circa 700 °C. I catodi rivestiti sono, però, più facilmente deteriorabili a causa del bombardamento ionico che diventa particolarmente severo a temperature superiori a 750 °C: tra i pregi del tungsteno c'è anche quello di resistere molto bene al bombardamento degli ioni positivi.
- Inserimento di un elettrodo ausiliario vicino ad un elettrodo principale per ridurre, secondo la legge di Paschen, la tensione di innesco che innesca la scintilla.

PRESTAZIONI DEI VARI TIPI DI TUBI A SCARICA

Tra le lampade a scarica in gas oggi presenti sul mercato ricordiamo le seguenti tipologie:

- *Lampade a vapori di sodio a bassa e ad alta pressione;*
- *Lampade a vapori di mercurio a bassa pressione o fluorescenti;*
- *Lampade fluorescenti compatte;*
- *Lampade a vapori di mercurio ad alta pressione;*
- *Lampade per insegne luminose;*
- *Lampade ad alogenuri metallici;*
- *Lampade fluorescenti ad alta frequenza;*
- *Lampade fluorescenti a luce miscelata.*

Le **lampade a vapori di sodio a bassa pressione** (0.1 mm Hg a lampada spenta) contengono xenon o elio o neon o argon e piccole quantità di sodio metallico. I gas servono per avviare la scarica la quale riscalda il tubo e permette la evaporazione del sodio. La luce emessa da questi tubi è monocromatica di colore giallo-arancione ed è, quindi, poco adatta all'illuminazione degli interni. Essi risultano utili prevalentemente dove non è richiesta una buona resa dei colori come nell'illuminazione stradale ed autostradale, nelle gallerie, negli incroci ed in genere nei grandi spazi esterni. Siccome la stabilità della scarica dipende fortemente dalla temperatura di funzionamento (circa 250 °C), oltre al ricorso ad una alimentazione stabilizzata, è spesso adottata la soluzione di isolare termicamente il tubo mediante un'intercapedine vuota ottenuta con un secondo tubo più

²⁵ Il cesio (Ce) è un metallo alcalino scoperto nel 1860 da Gustav Kirchhoff e Robert Bunsen. Fu il primo elemento scoperto con il metodo spettroscopico: il suo spettro presenta una sola riga di colore blu. Deriva il suo nome dal latino caesius che significa, appunto, grigio-azzurro, glauco.

²⁶ Il bario è stato scoperto dal chimico inglese Sir Humphry Davy nel 1808. Deriva il suo nome dal greco (βαρυς, βαρῦς = pesante) anche se è abbastanza leggero. I vapori di nitrato di bario e di clorato di bario per la loro bella colorazione giallo-verde sono usati per i fuochi d'artificio.

²⁷ Lo stronzio è stato scoperto nella stronzianite dallo scozzese William Cruikshank e deriva il suo nome dalla città mineraria scozzese Strontian in Argyllshire. Il vapore del nitrato di stronzio quando brucia dà alla fiamma una colorazione rosso scarlatto ed è usato per le segnalazioni luminose, per i proiettili traccianti e per i fuochi d'artificio.

²⁸ Il Calcio (Ca) è un metallo alcalino-terroso. Deriva il suo nome dal latino calx = calce ed è stato isolato per la prima volta da Sir Humphry Davy nel 1808.

esterno o si ricorre alla soluzione del rivestimento, con ossidi di iridio e stagno o mediante doratura, trasparente alla luce ma riflettente l'infrarosso.

- La resa dei colori per questo tipo di lampade è nulla, anzi, si può affermare che è un parametro privo di significato.
- L'efficienza luminosa è tra le più elevate raggiungendo valori attorno a 200 (lm W^{-1}).
- Il decadimento del flusso luminoso è dell' 87%.
- Il tempo di riaccensione a caldo è quasi nullo.
- Il tempo di riaccensione a freddo è una decina di minuti.
- La temperatura di colore è di circa 1700 K.
- La vita media è di circa 10000 h.

L'elevata efficienza luminosa dipende dal fatto che la luce emessa dalla lampada al sodio a bassa pressione è tutta concentrata entro una banda di lunghezze d'onda alquanto ristretta (quasi monocromatica) compresa tra 589.0 e 589.6 nm ove l'occhio umano è dotato di un coefficiente di visibilità relativa $V(\lambda)$ molto elevato intorno ad un valore medio dell'86%.²⁹

Le **lampade a vapori di sodio ad alta pressione**, apparse in commercio attorno al 1965, hanno:

- efficienza di 90 (lm W^{-1});
- vita media di 12000 h;
- decadimento del flusso luminoso del 90%;
- tempo di andata a regime di alcuni minuti;
- tempo di riaccensione a caldo compreso tra 1 e 2 minuti;
- tempo di riaccensione a freddo di 5-11 minuti;
- temperatura di colore di 2000 K.

L'alta pressione ha lo scopo di allargare lo spettro di emissione arricchendolo di componenti cromatiche sino a farlo diventare quasi continuo con un aumento significativo ma non sufficiente della resa dei colori.

Queste lampade sono formate da due tubi: quello più interno è in ceramica o in quarzo resistente all'aggressività del vapore di sodio ed alle elevate temperature (circa 1500 K) mentre quello più esterno ha soltanto la funzione di protezione: tra i due tubi viene fatto il vuoto. La luce ha un colore giallo-bianco e se pure meno sgradevole di quella a bassa pressione non è adatta per l'illuminazione degli interni. La pressione di funzionamento è compresa tra circa 10 e 35 kPa.

Le tensioni di alimentazione sono circa di 350 V per l'avvio e di circa 100 V a regime.

Sono prevalentemente usate per parcheggi ed impianti sportivi. In commercio sono disponibili oltre alle lampade standard ad alta pressione anche lampade ad alta pressione a luce corretta e più recentemente, nel 1986, sono apparse le lampade al sodio ad alta pressione a luce bianca, che possono essere utilizzate anche negli ambienti interni.

Le **lampade a vapori di mercurio a bassa pressione**, comunemente ed impropriamente chiamate *tubi al neon*, sono in quarzo e sono riempite con argon a pressione molto bassa (circa 1 Pa) con qualche goccia di mercurio che riscaldandosi evapora. La scarica emette radiazioni prevalentemente UV sulla lunghezza d'onda di

²⁹ Ricordiamo che l'occhio statistico medio ha il massimo valore del coefficiente di visibilità (100%) in condizioni di visione fotopica ad una lunghezza d'onda di 555 nm.

253,7 nm. Queste ultime sono riconvertite in radiazioni visibili dai cosiddetti fosfori³⁰ che rivestono la parte interna del tubo ed hanno la funzione di assorbire le radiazioni UV e di emettere radiazioni di lunghezza d'onda maggiore, quindi visibile, comportandosi come trasduttori di frequenza. La composizione dei fosfori influenza le caratteristiche cromatiche della luce emessa dalla lampada, in particolare la sua temperatura di colore. Le lampade della nuova generazione possono assumere valori diversi della temperatura di colore, emettendo luce bianca fredda, calda o intermedia, in funzione della composizione dei fosfori.

Queste lampade sono denominate anche *lampade fluorescenti* e possono presentarsi in forma tubolare, caratterizzate da alte rese cromatiche, ed in forma compatta, caratterizzate da alti costi, resa cromatica intorno a 85 ed una scarsa presenza estetica.

Le lampade fluorescenti hanno luminanze non elevate, intorno a 7000 cd m^{-2} , e pertanto non presentano il rischio di provocare il fenomeno dell'abbagliamento.

Le *lampade fluorescenti compatte*, apparse nel 1980, sono lampade miniaturizzate con tubi di diametro di 10 mm piegati ad U o affiancati in un "hot kiss". Sono interessanti alternative alle lampade ad incandescenza consentendo notevoli risparmi energetici, anche del 75%, anche se presentano un costo di acquisto più elevato. Possono sostituire le incandescenti tradizionali e quelle alogene e, funzionando con temperature notevolmente più basse, consentono una larga scelta nell'impiego dei materiali.

I tubi delle lampade fluorescenti sono contrassegnati da una lettera ed un numero.

La lettera indica la forma:

T forma tubolare;

C (circle o circline) la cosiddetta circolina che si presenta con le estremità adiacenti e rivolte in senso opposto;

H (Helicoid) di geometria elicoidale;

U: il tubo è ritorto su se stesso a disegnare la lettera U

Il numero indica gli 1/8" del diametro della sezione del tubo, che normalmente è compreso tra 16 mm ($0,63" = 5/8"$) e 54 mm ($2,13" = 2" + 1/8" = 17/8"$).

Ad esempio scegliendo per la geometria tubolare si può avere:

T-2 = 6 mm,

T-5 = 16 mm;

T-8 = 25 mm;

T-12 = 38 mm.

Le ***lampade a vapori di mercurio ad alta pressione*** (fino a 8 atm) hanno due bulbi: quello interno in quarzo, di alcuni millimetri di diametro, contiene i vapori di mercurio ad alta pressione, mentre quello più esterno di vetro ha la funzione di protezione del tubo principale e di custodia dei contatti degli elettrodi principali e di quelli di innesco. L'alta pressione sostituisce la funzione dei fosfori riducendo la emissione UV a favore delle radiazioni visibili. Queste lampade emettono luce verde-blu ed UV mentre non emettono quasi per niente luce rossa: gli oggetti rossi illuminati da queste lampade appaiono marrone. Le lampade di questo tipo sono usate dove il rosso ha poca importanza e di solito sono installate nei parcheggi, lungo le autostrade etc. Lungo l'asse del tubo principale si hanno temperature a regime anche di 5000 K mentre sull'involucro si raggiungono anche i 1000 K.

³⁰ Il fosforo deriva il suo nome dal greco $\phi\sigma\phi\sigma\phi\sigma\rho\sigma$, phosphòros = apportatore di luce, lucifero. Fu scoperto nel 1669 dall'alchimista tedesco Hennig Brand.

- La vita media è di 12000 h
- L'efficienza luminosa è attorno a 50 (lm W^{-1}).
- Il decadimento del flusso luminoso è del 78%.
- Il tempo di riaccensione a caldo è di 4-6 min.
- Il tempo di riaccensione a freddo è di 3-5 min.

L'abbinamento vapori di mercurio ad alta pressione e fosfori depositati sulla superficie interna del tubo rende ovviamente la luce più bianca in quanto i fosfori colmano la lacuna del rosso.

Queste lampade hanno l'inconveniente di richiedere lunghi tempi di andata a regime (3-7 minuti) necessari al riscaldamento ed all'evaporazione delle gocce di mercurio e lunghi tempi di riaccensione che sono necessari per consentire un adeguato raffreddamento del bulbo che riporti la pressione interna a valori compatibili con la tensione di avvio della scarica.

La **lampade per insegne luminose** sono a bassa pressione e possono essere riempite con neon³¹ se si desidera emissione di luce di colore rosso vivo o elio o argon o altri gas con colori che dipendono dal gas o dalla miscela di gas usati e ovviamente dal colore del vetro. Nelle lampade per le insegne luminose si sfrutta la corrente della colonna positiva con tensioni che possono arrivare anche a 1000 V e correnti elettriche comprese tra 10 e 100 mA. Le insegne luminose sono ormai elementi abituali delle scenografie di strade e di piazze di tutto il mondo. I messaggi multicolori, suadenti, accattivanti e talora insistenti ed invadenti sono un richiamo a griffes e marchi famosi, segnalano vendite e grandi sconti, promuovono spettacoli. Le scritte e le immagini si impongono per dimensioni e colori creando imponenti effetti scenici quasi si trattasse di un teatro che tutti i giorni al calare delle prime ombre alza il sipario: le scritte ed i disegni cominciano ad animarsi e si rincorrono lungo le facciate degli edifici, le intermittenze si dissolvono e si ricompongono mentre loro, i veri attori, rimangono nell'ombra: chi pensa agli atomi ed agli elettroni che costretti a saltare da un'orbita all'altra restituiscono quella luce e quei colori così invitanti e così suggestivi?

Le **lampade ad alogenuri metallici**, apparse in commercio nel 1964, sono una particolare versione delle lampade a scarica nei vapori di mercurio ad alta pressione con l'aggiunta di alogenuri metallici anche in miscela quali gli ioduri di sodio, di cesio, di tallio e di indio, di disprosio, di torio. I vapori degli alogenuri arricchiscono la miscela gassosa e lo spettro del mercurio con quelle bande che al solo mercurio mancano: gli alogenuri rendono superfluo il compito dei fosfori.

L'aggiunta degli alogenuri migliora le prestazioni della lampada:

- L'efficienza luminosa è di 60 - 80 (lm W^{-1}).
- La resa cromatica arriva fino al 60-93 %.
- La vita media è di 5000 h.
- La temperatura di colore va da 3000 a 6000 K.
- I tempi di riaccensione sono i più elevati tra tutte le lampade.

³¹ Il neon costa molto ma per le lampade servono piccole quantità: 1lt di neon in condizioni normali è sufficiente a riempire tubi di lunghezza complessiva di 60-100 m.

Queste lampade sono usate per l'illuminazione di ampi spazi interni ed esterni dove è importante la resa dei colori come nelle manifestazioni notturne in piazze e campi sportivi riprese da troupes televisive.

Le **lampade fluorescenti ad alta frequenza**, apparse nel 1991, sono alimentate da correnti elettriche generate per induzione elettromagnetica. La scarica all'interno del bulbo è generata da campi elettromagnetici alternati indotti in una bobina alloggiata all'interno e costituita da un avvolgimento attorno ad un elemento detto "accoppiatore di potenza". Di fatto l'avvolgimento sostituisce gli elettrodi delle lampade fluorescenti tradizionali. I campi elettromagnetici sono generati per induzione elettromagnetica da una corrente elettrica ad elevata frequenza (dell'ordine di 10^4 Hz) generata da un generatore elettronico esterno alla lampada.

Il campo elettromagnetico genera all'interno del gas di riempimento, generalmente una miscela di vapori di mercurio a bassa pressione e gas rari, fenomeni di eccitazione e ionizzazione delle molecole con conseguente formazione di un flusso di elettroni (scarica) e di emissione di radiazioni UV. Queste vengono convertite in radiazioni visibili da uno strato di polveri fluorescenti sulla superficie interna del bulbo.

Attualmente si trovano in commercio lampade ad alta frequenza di media potenza (55-85 W) con temperature di colore comprese tra 2700 e 4000 K.

Le lampade fluorescenti con alimentazione ad alta frequenza si caratterizzano per una alta efficienza luminosa (70 lm W^{-1}) e, quindi, per consumi energetici molto bassi, elevati flussi luminosi molto stabili nel tempo, assenza dell'effetto stroboscopico.

La frequenza di funzionamento è dell'ordine 10^4 Hz, particolarmente pericolosa in presenza di organi di macchine in rotazione, non necessitano di rifasamento avendo un fattore di potenza superiore al 95%, sono immuni dai fastidiosissimi ronzii, consentono la regolazione del flusso luminoso secondo un uso personalizzato dell'utente ottenendo notevoli risparmi energetici e richiedono tempi di accensione molto brevi. Infine hanno il notevole vantaggio offerto da tempi di durata molto lunghi, fino a 60000 h, grazie all'assenza di componenti quali gli elettrodi soggetti a deterioramento per il bombardamento ionico e per il passaggio della corrente elettrica, minor annerimento alle estremità, fattore di potenza prossimo al valore unitario.

Si è accennato all'**effetto stroboscopico**; è ora di chiedersi che cosa è.

Intanto l'effetto stroboscopico dipende dal fatto che le correnti di alimentazione delle lampade elettriche sono generalmente correnti alternate. La corrente elettrica alternata ha una frequenza di 50 Hz, quindi si annulla 100 volte al secondo e pertanto il flusso luminoso in queste fluttuazioni periodiche presenta 100 picchi al secondo. La elevata inerzia termica di una lampada ad incandescenza nasconde del tutto questo inconveniente. Anche le lampade a scarica normali non risentono generalmente del fenomeno stroboscopico mentre quelle fluorescenti si basano su fenomeni chimici meno rapidi e presentano in maniera più evidente questo inconveniente. Data la caratteristica fisiologica dell'occhio che avverte come continui fenomeni luminosi intermittenti con ritardi minori di 10^{-1} s, il fenomeno non dovrebbe avere conseguenze avendo ciascun evento la durata di 10^{-2} s. Se con questa luce vengono, però, illuminati oggetti in rotazione aventi frequenza uguale a 100 Hz, corrispondente a 6000 giri al minuto, l'oggetto può pericolosamente apparire fermo; mentre nel caso di non coincidenza si possono avere valutazioni sbagliate estremamente pericolose per operatori di macchine utensili o comunque di macchine aventi organi in rotazione: se la frequenza dei picchi di intensità è leggermente superiore a quella di rotazione l'oggetto appare ruotare nel verso contrario a quello reale, se la frequenza dei picchi di intensità è leggermente inferiore a quella di rotazione l'oggetto appare ruotare nello stesso verso di quello reale ma con velocità

inferiore. Inoltre, sulle superfici degli stessi corpi rotanti possono manifestarsi delle successioni di chiari e scuri che affaticano la vista, e questo è particolarmente debilitante ed ancora una volta pericoloso laddove il lavoro si protrae nel tempo.

Le **lampade fluorescenti a luce miscelata** sono un felice connubio tra le due tipologie di funzionamento delle lampade elettriche: come lampada a scarica funzionano con vapori di mercurio e con i fosfori sulle pareti interne, mentre come lampada ad incandescenza funzionano con un filamento di platino che, in quanto resistenza elettrica in serie con il tubo, assolve anche al ruolo di limitatore della corrente elettrica rendendo superfluo il reattore. Lo spettro luminoso è continuo, tipico delle lampade ad incandescenza, con rinforzi in quelle bande dove ricorrono le righe di emissione della lampada a scarica.

Circuiti accessori

Le lampade a scarica nei gas generalmente hanno bisogno dell'aiuto di particolari accessori, anche se la moderna tecnologia non li rende indispensabili in tutti i casi. Essi sono:

- lo *starter* che avvia il processo di ionizzazione preriscaldando il catodo, rendendolo emissivo e fornendo poi la tensione di innesco della scarica. Lo starter è prevalentemente usato per le lampade a fluorescenza a bassa pressione. Lo starter tradizionale è un'ampollina contenente un gas raro, ad esempio neon, a basso lavoro di estrazione, e due elettrodi metallici. Un elettrodo è fisso mentre l'altro è una lamina bimetallica costituita, cioè, dall'accoppiamento di due metalli aventi coefficienti di dilatazione termica lineare molto diversi. Al momento dell'accensione la differenza di potenziale tra i due elettrodi fa passare una debole corrente elettrica nella massa del gas rarefatto che emette una debole luce rosata visibile appena attraverso l'involucro semitrasparente e si riscalda aumentando la temperatura anche della lamina bimetallica. Il riscaldamento incurva la lamina sino alla chiusura del circuito lasciando passare la corrente elettrica che preriscalda il catodo della lampada. Con la chiusura del contatto metallico scompare l'arco tra i due elettrodi, il gas si raffredda e la lamina ritorna alla sua caratteristica posizione a freddo. Con l'apertura del circuito si genera una sovratensione per autoinduzione che, se il catodo è già ben preriscaldato, innesca nel tubo la scarica che poi a regime si alimenta da sé richiedendo una tensione a regime molto minore di quella di avvio. Uno starter non efficiente si manifesta al momento dell'accensione con un lampeggiare fastidioso e carico di attesa che è sempre presago di prossima rottura. Il lampeggiare è il risultato di tentativi che lo starter, ormai non più giovane con i primi manifesti sintomi di vecchiaia, ripete sino alla accensione definitiva e liberatoria.
- il *reattore* è una bobina, collegata in serie con la lampada, che limita e controlla per autoinduzione la scarica che altrimenti, con differenza di potenziale costante, aumenterebbe in modo del tutto incontrollato. La presenza dell'impedenza induttiva comporta un sensibile e dispendioso sfasamento non tollerato dall'ente erogatore di energia elettrica ed eliminabile con l'inserimento di un condensatore in parallelo.³²

³² Le lampade a scarica vengono alimentate attraverso un reattore (praticamente un elettromagnete) ed uno starter, cioè un dispositivo automatico che prima stabilisce e poi interrompe la corrente, nel reattore, dando così luogo alla extratensione che innesca la scarica luminosa. Il reattore serve anche a stabilizzare la corrente ad accensione avvenuta.

- il *condensatore statico* che serve a rifasare l'impianto onde evitare valori bassi del "fattore di potenza $\cos\phi$ ", dato dalla ben nota formula di Galileo Ferraris per la potenza media assorbita da un circuito percorso da corrente alternata:

$$W = f_{\text{eff}} i_{\text{eff}} \cos\phi$$

che deve essere il più vicino all'unità per contenere il consumo di energia elettrica pagata all'Ente fornitore³³. Siccome, come è noto, il condensatore assorbe corrente elettrica in anticipo rispetto alla differenza di potenziale, è possibile scegliere opportunamente la capacità che riporti l'angolo di sfasamento tra la f.e.m. ai capi del tubo e la corrente di scarica a valori prossimi allo zero. Quando si verifica come caso estremo:

$$\cos\phi = 0 \Leftrightarrow \phi = \pm \frac{\pi}{2}$$

la corrente elettrica si dice "swattata".

Il trasformatore può generare quel caratteristico ronzio, che piacevole non è mai ma che può diventare molto fastidioso, prodotto dalla vibrazione delle lamine di ferro che formano il nucleo: il nucleo è formato dalla sovrapposizione intercalata di lamine sottili e di sottili fogli di isolante elettrico allo scopo di ridurre le correnti elettriche parassite o di Foucault che surriscalderebbero il circuito per effetto Joule.

- il *trasformatore* che viene usato quando la tensione di rete è diversa da quella richiesta per l'accensione della lampada. Il trasformatore può essere abbinato al reattore ed al condensatore. Per alcuni tipi di lampade sono richieste tensioni di innesco attorno a 1000 V.

Le tensioni a regime, invece, sono di circa 50 V_{rms} e le correnti elettriche sono di qualche decimo di Ampere.

Nella tabella 10 seguente sono riportati alcuni valori di riferimento della luminanza di tipiche sorgenti luminose. Questo dato è estremamente importante soprattutto per gli aspetti qualitativi di un impianto di illuminazione, come si vedrà nel capitolo riguardante il dimensionamento degli impianti.

La distribuzione delle luminanze in gioco nel campo visivo di un utente all'interno di un ambiente chiuso deve essere sufficientemente equilibrata, in modo che non ci siano eccessivi contrasti tra le luminanze delle sorgenti luminose e delle pareti.

Tabella 10 Valori di luminanza di tipiche sorgenti luminose

Sorgenti luminose	Luminanza (cd/m ²)
fiamma delle candele	10 ⁴

³³ La potenza calcolata con la formula di Galileo Ferraris è quella cosiddetta attiva. La potenza attiva (si misura in W) moltiplicata per il tempo di funzionamento fornisce l'energia elettrica consumata (Wh) da pagare con scadenze periodiche. Se non si tiene conto dello sfasamento la potenza, $W = f_{\text{eff}} i_{\text{eff}}$ è quella apparente che si misura normalmente in (V A). La componente reattiva ($f_{\text{eff}} i_{\text{eff}} \sin\phi$) non è utilizzata ma è dissipata nei vari conduttori e dielettrici producendo riscaldamenti quasi sempre indesiderati per effetto Joule. L'Ente fornitore dell'energia elettrica impone che il fattore di potenza ($\cos\phi$) sia maggiore o al minimo uguale a 0.9. Gli impianti che rispettano tali valori non sono soggetti a sanzioni o a maggiorazioni dei costi. Nelle lampade ad incandescenza non si ha sfasamento e, quindi $\cos\phi = 1$, in quanto il carico è puramente ohmico.

fiamma di cherosene	$1.2 \cdot 10^4$
fiamma del gas illuminante	$4 \cdot 10^3$
reticella di Auer	$6.2 \cdot 10^4$
fiamma di acetilene	$1.1 \cdot 10^5$
corpo nero a 6500 K	$3 \cdot 10^9$
corpo nero a 4000 K	$2.5 \cdot 10^8$
corpo nero a 2042 K	$6 \cdot 10^5$
lamp. inc. con filo di carb. (3.15 lm/W)	$5.2 \cdot 10^5$
c.s. con filo di tantalio (6.3 lm/W)	$7 \cdot 10^5$
c.s. con filo di tungsteno (10 lm/W sotto vuoto)	$2 \cdot 10^6$
c.s. (20 lm/W con gas di riempimento)	$1.2 \cdot 10^7$
lampada incan. 60 W vetro smerigliato	$1.2 \cdot 10^5$
lampada incan. 25 W vetro smerigliato	$5 \cdot 10^5$
lampada incan. 15 W vetro smerigliato	$3 \cdot 10^4$
lampada incan. 10 W vetro smerigliato	$2 \cdot 10^4$
lampada incan. 60 W vetro chiaro	$3 \cdot 10^4$
lamp. fluor. T-17 luce cool-white 420 mA	$4.3 \cdot 10^3$
lamp. fluor. T-12 luce cool-white 430 mA	$8.2 \cdot 10^3$
lamp. fluor. T-12 luce cool-white 800 mA	$1.1 \cdot 10^4$
lamp. fluor. T-17 luce cool-white 1500 mA	$1.7 \cdot 10^4$
lamp. a mercurio ad alta press. (H33, 2.5 atm)	$1.5 \cdot 10^6$
lamp. a mercurio ad alta press. (H38, 10 atm)	$1.8 \cdot 10^6$
vetro chiaro al neon (15 mm, 60 mA)	$1.6 \cdot 10^3$

Lampade a tecnologia LED

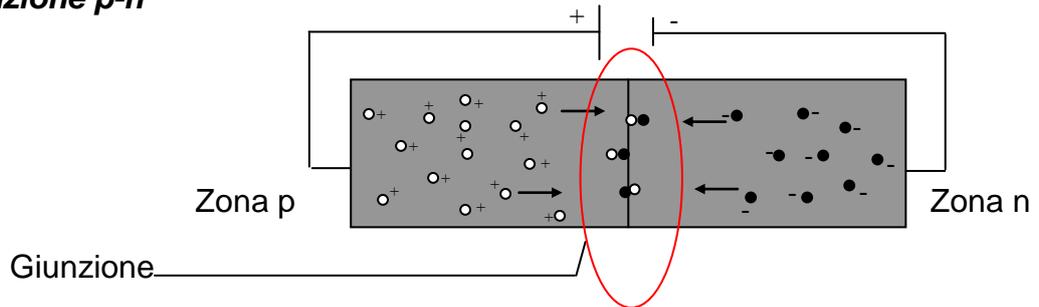
LED è l'acronimo di Light Emitting Diode (diodo ad emissione luminosa) ed è un dispositivo per la produzione di luce artificiale che sfrutta le proprietà di alcuni semiconduttori di emettere fotoni nel campo del visibile a causa di un fenomeno di ricombinazione tra elettroni e lacune (assenza di elettroni) che avviene se si verificano delle particolari condizioni che verranno di seguito illustrate. Definiamo innanzitutto, anche se in maniera qualitativa, cosa sia un diodo: un diodo è un componente elettronico polarizzato, cioè dotato di un polo positivo e di uno negativo, che consente il passaggio di corrente solo in una direzione ben precisa, impedendolo in altre, come illustrato nel suo simbolo circuitale mostrato nella figura seguente in cui la barra posta al vertice della freccia rappresenta lo sbarramento che impedisce il passaggio di corrente in quella direzione consentendolo invece nell'altra indicata dalle freccette libere (vedi Fig 14)

Figura 14 Simbolo circuitale di un diodo



I LED sono particolari tipi di diodi formati da un sottile strato di materiale semiconduttore (es. arseniuro di gallio - GaAs, nitrato di gallio e indio - GaInN, fosforo arseniuro di gallio - GaAsP, carburo di silicio - SiC, fosforo di gallio - GaP,) sottoposto a drogaggio di tipo p in una particolare zona e di tipo n nella zona opposta. Il drogaggio di tipo n consiste nella immissione in piccolissime quantità (impurità), nel materiale semiconduttore, di atomi che hanno un elettrone in più di quelli necessari e sufficienti a soddisfare tutti i legami disponibili con gli atomi del materiale considerato, mentre il drogaggio di tipo p è quello effettuato con atomi di elementi chimici che hanno un elettrone in meno di quelli necessari a questo scopo. E' chiaro che la prima operazione produce la presenza di elettroni in eccesso nella banda di conduzione, che sono liberi di muoversi poiché non appartenenti in modo specifico a nessun atomo del semiconduttore, mentre la seconda operazione produce delle lacune, cioè delle mancanze di elettroni, che danno luogo dunque ad un'eccedenza di cariche positive. L'eccesso di elettroni nella zona drogata di tipo n la caratterizza dunque dandole carica negativa, mentre l'eccesso di lacune presente nella zona drogata di tipo p le attribuisce carica positiva. La giunzione può essere propriamente considerata come quel sottile strato di confine tra la zona di tipo p e quella di tipo n ed è caratterizzata da totale assenza di portatori di carica, positivi o negativi. (cfr. Fig. 15)

Figura 15 Giunzione p-n



Quando la giunzione viene sottoposta ad una tensione diretta gli elettroni in eccedenza della zona n, muovendosi verso l'elettrodo positivo, si incontrano con le lacune della zona p che invece sono in movimento verso l'elettrodo negativo e si ricombinano con esse. Tale operazione avviene ovviamente con l'emissione di energia pari al salto di livello energetico che c'è tra la banda di conduzione e quella di valenza, cioè all'energia che l'elettrone deve cedere per assestarsi ad un livello energetico più basso intorno al nucleo della lacuna: tale energia è emessa sotto forma di fotoni cioè di luce. Un notevole numero di fotoni non viene trattenuto dal piccolo spessore del dispositivo e viene rilasciato all'esterno rendendo il sistema una sorgente di luce artificiale.

Il tipo di semiconduttore scelto determina ovviamente la lunghezza d'onda dell'emissione luminosa, l'efficienza del meccanismo di conversione dell'energia, quindi l'efficienza luminosa del dispositivo. I primi LED realizzati erano caratterizzati dal colore rosso della luce emessa e venivano prevalentemente utilizzati nei circuiti elettronici come indicatori. In seguito vennero realizzati LED a luce verde e dispositivi con due LED accoppiati (rosso+verde) che permettevano di ottenere emissioni luminose di colore rosso, verde, o giallo (rosso + verde) a seconda di come venivano fatti funzionare, se singolarmente o in coppia. Notevole sviluppo hanno avuto negli anni '90 gli studi su questi sistemi, volti soprattutto alla ricerca dei materiali semiconduttori più adatti allo scopo, fino ad ottenere, con la disponibilità di LED blue, la possibilità di emettere luce di diverso colore mettendo insieme tre LED con i tre colori fondamentali della luce (rosso, verde, blue). Questi dispositivi potevano produrre luce di qualsiasi colore.

Tipiche applicazioni di questi dispositivi, viste le piccole dimensioni delle sorgenti, sono: i telecomandi ad infrarossi, gli indicatori di stato (luci spia di stand-by di apparecchiature elettroniche), sistemi di retro-illuminazione di display LCD, ma ultimamente si sono diffusi anche nei semafori e nelle luci di "stop" delle autovetture.

L'impiego nel campo dell'illuminazione di ambienti sta notevolmente progredendo grazie a notevoli vantaggi che offrono in particolare in termini di riduzione dei costi di manutenzione e di lunga durata delle sorgenti, accoppiati a buoni valori dell'efficienza luminosa, tanto da poter prevedere in futuro la possibilità di sostituire vari tipi di sorgenti di luce artificiale ad incandescenza o a scarica nei gas nella quasi totalità delle attuali applicazioni.

Per realizzare la possibilità di sostituire sorgenti di luce tradizionali, un certo numero di LED vengono inseriti in un'unica lampada che ha forma e dimensioni simili a quelle di una lampada ad incandescenza o fluorescente o alogena, etc. e che prevede attacchi di tipo Edison a vite o a baionetta, tipicamente presenti in queste sorgenti tradizionali. Poiché i LED sono caratterizzati da bassa o addirittura bassissima tensione di funzionamento ed anche da piccoli valori della potenza elettrica, sebbene con elevati valori dell'efficienza luminosa, i flussi luminosi emessi non sono in genere molto elevati e questo costituisce un

limite per alcune applicazioni, richiedendo, per realizzare un certo illuminamento, un numero elevato di sorgenti. Per fare un esempio, considerato che una lampada ad incandescenza da 40 W emette circa 400 - 500 lumen, un LED di 1 W ad elevata efficienza emette circa 50-60 lm ed è dunque necessario prevederne almeno 8 in un'unica sorgente per ottenere lo stesso flusso della lampada ad incandescenza, ovviamente con un notevole risparmio energetico.

Per contro, oltre ad una buona efficienza luminosa, queste lampade consentono notevoli risparmi in termini di costi di manutenzione per via di una vita media molto lunga che può arrivare anche a 50000 ore. Questa è legata senz'altro al fatto che il meccanismo di emissione della luce non prevede la presenza di elettrodi, che si deteriorano facilmente, come nelle lampade a scarica, o di filamenti di tungsteno che tendono ad assottigliarsi fino a spezzarsi, come avviene nelle lampade ad incandescenza, o di fosfori depositati sulle pareti, come nelle lampade fluorescenti, che perdono la loro efficacia nel tempo e così via. Un altro parametro che caratterizza l'emissione di queste sorgenti è l'angolo di emissione del fascio di luce che varia da 4 a 120°.

E' ovvio che i LED hanno caratteristiche estremamente favorevoli quando l'installazione richiede sorgenti di dimensioni molto piccole o quando il colore della luce emessa deve avere caratteristiche di spiccata saturazione o, infine, di robustezza ed elevata durata. In alcuni casi, il parametro durata è determinante, quando la frequente sostituzione delle sorgenti presenta notevoli difficoltà pratiche, come ad esempio nell'illuminazione di fondi di piscine o di facciate di palazzi di notevole altezza e così via. La luce emessa è priva di radiazioni UV o IR ed il funzionamento è in condizioni di sicurezza poiché avviene normalmente a tensioni basse, comprese tra 3 e 24 V. Infine queste sorgenti risultano insensibili all'umidità e possono funzionare anche a temperature molto basse (fino a -40°C).

ILLUMINAMENTO DI INTERNI

L'illuminazione di ambienti interni ha esigenze e, quindi, presuppone scelte progettuali e modalità di installazione completamente diverse da quelle dell'illuminazione di ambienti aperti. La differenza sostanziale risiede nel fatto che l'attività che si svolge all'interno è generalmente più raffinata che non all'esterno: negli interni si può essere impegnati in lavori grossolani, ma anche in attività molto fini.

In uno spazio chiuso dedicato, per esempio, ad attività lavorativa manuale o affidata a macchinari, l'obiettivo di un impianto di illuminazione è quello di distribuire la luce in modo che il lavoro possa svolgersi senza eccessivo affaticamento degli occhi, che accelera ed aggrava lo stato di stanchezza sia fisica che psicologica, con cali di concentrazione particolarmente preoccupanti sul piano della prevenzione degli infortuni.

In uno spazio chiuso, per esempio, adibito alla esposizione di prodotti da vendere, il compito principale dell'illuminazione, oltre a quello di attrazione e di persuasione con ricorso anche a luci colorate e cinetiche, è quello di esaltare i colori e le tinte anche con elevate luminanze, senza preoccuparsi eccessivamente dell'affaticamento degli occhi: in fabbrica i tempi di permanenza giornaliera sono fissati per contratto mentre la sosta davanti ad una vetrina è normalmente un piacevole svago di breve durata.

In una pinacoteca od in un museo l'illuminazione deve assicurare un'elevata resa dei colori senza irradiare riflessioni fastidiose dalle superfici illuminate e senza ovviamente danneggiare con il calore o con radiazioni ultraviolette le tele, i reperti archeologici, i libri e quant'altro si trova esposto. Il compito visivo, quindi, come detta la norma UNI 10380 del 1994:

"può identificarsi con l'esplicazione della prestazione visiva richiesta da una determinata attività e, cioè, con la visione degli oggetti, dei dettagli e dello sfondo connessi al tipo di mansione da svolgere. La visibilità di un compito visivo dipende principalmente dai seguenti fattori:

*luminanza del compito visivo;
contrasti di luminanza e di colore tra il dettaglio e lo sfondo;
dimensioni angolari e forma del dettaglio;
posizione del dettaglio nel campo visivo;
efficienza dell'apparato visivo dell'osservatore;
tempo di osservazione."*

Il dimensionamento di un impianto di illuminazione per interni richiede fondamentalmente tre tipi di scelte:

- scelta funzionale che dipende dal compito visivo o dalla attività da svolgere, con particolare riguardo alla sicurezza individuale e collettiva, rendendo immediatamente percepibili situazioni di pericolo, limitando l'affaticamento degli occhi e garantendo benessere agli occupanti;

- scelta ambientale che tenga conto dell'insieme di strutture (arredi, particolari architettonici etc.) già esistenti o da inserire con l'impianto in modo che si abbia un insieme armonico ed esteticamente accettabile;
- scelta economica, sia per i costi di realizzo che per quelli di manutenzione, tenendo nel giusto conto anche la durata dell'impianto realizzato.

Inoltre il progetto dell'impianto deve mirare al perseguimento di obiettivi sia di tipo quantitativo che di tipo qualitativo.

L'obiettivo quantitativo si realizza assicurando la giusta quantità di luce sul piano di lavoro richiesta dal particolare compito visivo. A tale scopo il parametro più comune, soprattutto per gli ambienti chiusi, è l'illuminamento (lux) che rappresenta la densità superficiale del flusso luminoso che illumina il compito visivo. Talvolta, soprattutto negli ambienti aperti il parametro più rappresentativo è la luminanza ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$), perché all'esterno può risultare più importante quanto le varie superfici riflettono verso gli occhi di un osservatore.

L'obiettivo qualitativo invece è da ritenersi realizzato se nell'ambiente si ha una giusta resa dei colori, una buona resa del contrasto, se si ha equilibrio delle luminanze e se non si ha abbagliamento. Il controllo dell'abbagliamento impone il controllo anche della direzione di provenienza della luce sia diretta che riflessa.

In un interno si possono realizzare vari tipi di illuminazione, che differiscono tra di loro a seconda del modo in cui gli apparecchi illuminanti vengono utilizzati. In particolare, facendo riferimento alla tabella 11, si possono distinguere i seguenti casi:

Tabella 11: Tipologie di impianti di illuminazione

	Flusso emisfero inferiore (%)	Flusso emisfero superiore (%)
Illuminazione diretta	100-90	10-0
Illuminazione semi-diretta	90-60	40-10
Illuminazione diffusa	60-40	60-40
Illuminazione semi-indiretta	40-10	90-60
Illuminazione indiretta	10-0	100-90

L'illuminazione diretta marca molto le ombre disegnando violenti chiaroscuri: l'attenuazione di questo inconveniente richiede l'installazione di molti punti luce opportunamente dislocati. L'illuminazione diretta è particolarmente adatta in laboratori, uffici, grandi magazzini etc.

L'illuminazione semi-diretta si presta bene per abitazioni, uffici, mense mentre quella indiretta è molto adatta per sale da spettacolo, ristoranti etc.

L'analisi dettagliata delle caratteristiche ambientali e la conoscenza precisa e puntuale dei compiti visivi da svolgere sono preliminari indispensabili al vero progetto. A questo proposito sono elencati in forma breve i suggerimenti consigliati dalla "The British I.E.S. Code for Interior Lighting" (1973) raggruppati in:

- Esigenze generali;
- Condizioni ambientali e requisiti;
- Caratteristiche strutturali.

Esigenze generali

Destinazione d'uso del locale, dislocazioni di mobili, macchinari, impianti, persone addette: possono essere previsti più tipi di impianti di illuminazione.

Possibilità di integrare luce artificiale ed illuminazione naturale.

Illuminazione generale ambientale ed esigenze locali direttamente su particolari piani di lavoro. L'illuminazione generale è quella atta a produrre una distribuzione spaziale il più possibile uniforme ed omogenea in tutto il piano di lavoro.

Richieste di illuminazione direzionale localizzata ad integrazione dell'illuminazione generale per soddisfare esigenze specifiche o per adattare impianti preesistenti a nuove distribuzioni dei posti di lavoro³⁴.

Richieste di particolari rese del colore.

Esigenze di particolari rese del contrasto localizzato.

Controllo dell'abbagliamento.

Requisiti particolari derivanti da sicurezza ed emergenza.

Condizioni ambientali e requisiti

Operatività in ambienti aggressivi che richiedono soluzioni protettive dei corpi illuminanti a tenuta di incendio, di polvere, a tenuta stagna contro gocce in caduta verticale od inclinata, contro gli spruzzi etc.

Temperature estreme come dentro e nelle vicinanze di forni o dentro e nei pressi di celle frigorifere.

Controllo dell'accumulo di calore prodotto dai corpi illuminanti dentro spazi angusti chiusi, come nei controsoffitti, nei soffitti a capriate e nelle vetrine, e necessità di smaltimento mediante ventilazione e raffrescamento dell'aria.

Carico termico dovuto all'impianto d'illuminazione da contabilizzare nel progetto dell'impianto di climatizzazione durante la stagione calda.

Caratteristiche strutturali.

Geometria del locale: dimensioni in pianta ed altezza.

Individuazione e localizzazione dei piani di lavoro.

Altezza di montaggio dei corpi illuminanti.

Caratteristiche fisiche dell'ambiente: riflettività delle pareti, del soffitto, del pavimento, del piano di lavoro, dei mobili, delle finestre, delle porte etc.

Integrazione dell'impianto di illuminazione con altri impianti di servizio coesistenti nell'ambiente come ad esempio gli impianti di ventilazione, di climatizzazione etc.

Caratteristiche strutturali delle superfici di contorno che possono limitare o, comunque, condizionare il posizionamento dei corpi illuminanti quali la struttura del soffitto, la presenza di controsoffitto etc.

Impedimenti ed ostruzioni dovuti a travi, pilastri, soffitti a capriate o a cassettoni, canalizzazioni e tubature di servizio etc.

³⁴ La Norma UNI 10380 del 1994 ritiene ammissibile il ricorso all'illuminazione localizzata del singolo posto di lavoro solo se coordinata con quella generale e solo se esistono esigenze particolari quali:

-compiti visivi impegnativi da svolgere in aree ristrette e ben individuate nel locale;

-compiti visivi che richiedono l'identificazione di contrasti, contorni, forme e strutture: in questi casi la luce deve provenire da direzioni stabilite fisse od opportunamente orientabili, deve avere caratteristiche cromatiche particolari e deve essere idonea a creare determinati livelli di luminanza;

-compiti visivi su superfici con elevati coefficienti di riflessione.

METODI DI CALCOLO

Un impianto di illuminazione serve a realizzare all'interno degli ambienti i requisiti illuminotecnici quantitativi e qualitativi che rendono possibile la fruizione dell'ambiente considerato in condizioni di comfort.

Il requisito quantitativo di base è la realizzazione di un determinato valore di illuminamento sulla superficie su cui si svolge il compito visivo. Questa può essere orizzontale oppure verticale o avere, in particolari casi, qualsiasi tipo di inclinazione.

Tale superficie è detta "*Piano di Lavoro*" e va individuata all'inizio di qualsiasi procedura di dimensionamento dell'impianto.

Esempio di un piano di lavoro verticale è la superficie di un dipinto in mostra in una sala di esposizione che viene illuminata in modo particolare rispetto al contesto in cui è inserita (illuminazione d'accento) per renderne confortevole la percezione visiva.

Più comune è il caso di piano di lavoro orizzontale, tutte le volte che una attività lavorativa si svolge in un ufficio, una fabbrica, un edificio scolastico e così via.

Quando non esiste un piano di lavoro reale se ne considera uno fittizio orizzontale che viene scelto ad una altezza dal pavimento compresa tra 70 e 90 cm per attività comuni oppure a circa 20 cm dal pavimento se il compito visivo è relativo al solo camminamento.

Per il dimensionamento di un impianto di illuminazione per interni si segue una delle due procedure seguenti:

- **Metodo del fattore di utilizzazione**, detto anche metodo dell'illuminamento medio uniforme: metodo semplice, relativamente rapido, con risultati più che soddisfacenti per moltissime esigenze.
- **Metodo punto a punto**: metodo estremamente elaborato, richiede lunghi tempi di calcolo, con risultati indubbiamente più precisi dell'altro. In commercio esiste una moltitudine di softwares dedicati con diversi livelli di elaborazione per i quali c'è solo l'imbarazzo della scelta.

METODO DELL'ILLUMINAMENTO UNIFORME MEDIO O DEL FATTORE DI UTILIZZAZIONE.

Questo metodo di calcolo degli impianti di illuminazione viene utilizzato ogni qualvolta ci si pone l'obiettivo di realizzare un illuminamento medio uniforme su un determinato piano di lavoro mediante una installazione costituita da un certo numero di corpi illuminanti dello stesso tipo.

E' il caso, ad esempio, di locali pubblici destinati ad uffici o di locali commerciali di dimensioni ragguardevoli o di altre sale con varie destinazioni d'uso (spettacolo, riunioni, auditorium etc.) in cui il requisito fondamentale è l'uniformità di illuminamento.

Il piano di lavoro in questi casi è fittizio ed è considerato orizzontale ad una altezza dal pavimento di 80 cm circa.

Per quello che riguarda l'uniformità di distribuzione dell'illuminamento è ovvio che essa non sarà mai perfettamente realizzabile poiché qualsiasi tipo di installazione, anche se

ben dimensionata e realizzata, produrrà dei valori di illuminamento oscillanti intorno al valore medio con una concentrazione nelle posizioni più vicine ai corpi illuminanti ed una attenuazione in posizioni più lontane da essi.

Tali oscillazioni devono essere contenute entro il $\pm 20\%$ intorno al valore medio per dar luogo ad un buon grado di uniformità.

La scelta del corpo illuminante con le sue caratteristiche fotometriche influisce fortemente sul risultato ottenuto. Se il requisito da soddisfare è l'uniformità di illuminamento, un apparecchio con la curva fotometrica "a fascio largo" è certamente più adatto allo scopo poiché diffonde il flusso luminoso su ampie superfici mentre, al contrario, un corpo con curva "a fascio stretto" produce una maggiore concentrazione del flusso ed è più indicato ad illuminazioni di accento piuttosto che a realizzare l'uniformità.

Inoltre, una volta calcolato il numero di corpi illuminanti da installare, sarà necessario disporli in maniera regolare, rispettando distanze ottimali per ottenere l'uniformità desiderata.

Il metodo in oggetto si propone dunque, una volta stabilito il valore dell'illuminamento medio da realizzare e una volta scelto il corpo illuminante e le relative lampade più idonei allo scopo, di calcolare il numero degli apparecchi necessari a realizzare l'illuminamento richiesto sul piano di lavoro, che poi dovranno essere opportunamente installati per realizzare l'uniformità voluta. Per effettuare tale dimensionamento è necessario definire una grandezza, che dà il titolo al metodo, che si chiama "Fattore di utilizzazione".

Fattore di utilizzazione

La scelta del corpo illuminante con le relative lampade consente di determinare il flusso emesso da ciascun corpo illuminante in condizioni iniziali (corpo nuovo appena installato) detto "Flusso uscente".

Se indichiamo con n il numero di lampade ospitate dal singolo corpo illuminante, con W la potenza elettrica assorbita da ciascuna di esse (W), e con η l'efficienza luminosa (lm/W) della lampada stessa, possiamo dire che il flusso uscente Φ_{out} è dato dalla seguente espressione:

$$\Phi_{out} = n \cdot W \cdot \eta$$

Se indichiamo con N il numero di apparecchi, per ora incognito, da installare, possiamo calcolare il flusso che complessivamente esce da tutti gli apparecchi illuminanti in condizioni iniziali e che costituisce, dunque, ciò che, in termini di flusso luminoso, abbiamo a disposizione ad impianto nuovo. Tale flusso, detto "Flusso totale", è dato da:

$$\Phi_{tot} = N \cdot \Phi_{out}$$

Solo una porzione di tale flusso incide sul piano di lavoro, considerato che una parte viene assorbita dalle superfici del corpo illuminante e che una parte di quello che incide sulle pareti viene assorbita dalle pareti stesse, in misura tanto maggiore quanto minore è la loro riflettività. In sostanza, il flusso che effettivamente giunge sul piano di lavoro è dato dalla somma di una *componente diretta*, che va direttamente dal corpo illuminante al piano di lavoro, e di una *riflessa*, che giunge sul piano di lavoro solo dopo aver subito una o più riflessioni dalle pareti di contorno dell'ambiente.

Chiameremo “Flusso utile” tale quantità e la indicheremo con il simbolo Φ_{ut} . Se l’impianto è nuovo, specificheremo che tale flusso è in condizioni iniziali e lo chiameremo, pertanto, “Flusso utile iniziale” $\Phi_{ut,in}$.

Da quanto detto risulta evidente che il flusso utile iniziale è una porzione del flusso totale la cui entità dipende dalle caratteristiche fotometriche del corpo illuminante e da quelle geometriche e di finitura superficiale delle pareti di contorno dell’ambiente.

Definiamo a questo punto *fattore di utilizzazione* il rapporto tra il flusso utile iniziale ed il flusso totale in condizioni di impianto nuovo³⁵:

$$F_u = \frac{\Phi_{ut,in}}{\Phi_{tot}}$$

Il fattore di utilizzazione F_u è ovviamente minore dell’unità e può, quindi, essere espresso anche in percentuale.

L’apparecchio esterno, visto come parte integrante della lampada, limita necessariamente il flusso luminoso uscente assorbendone una quota ma migliora la distribuzione della luce, la adegua alle esigenze, scherma l’abbagliamento intercettando l’emissione luminosa lungo le direzioni che puntano diritte nell’occhio, protegge la lampada da eventuali urti, la ripara dall’aggressione di agenti atmosferici, nel caso di applicazioni esterne, riduce l’insudiciamento delle superfici trasparenti e, ultimo ma non meno importante, veste il punto luce rendendolo accettabile esteticamente e armonizzandolo con l’arredo ambientale.

Il fattore di utilizzazione dipende dalle caratteristiche del corpo illuminante, dalla geometria del locale, di cui si tiene conto con un numero adimensionale detto “Indice del locale”, dalla capacità riflettente delle pareti, dal tipo di sorgente luminosa (lampada incandescente, lampada alogena, lampada fluorescente etc.), e, in modo particolare, dalla curva fotometrica, cioè dalla distribuzione spaziale angolare del flusso luminoso emesso dalla sorgente con il suo corpo illuminante.

Il metodo del fattore di utilizzazione è una procedura globale che ha come obiettivo la valutazione del numero di corpi illuminanti necessario per assicurare il valore medio richiesto dell’illuminamento considerato uniformemente distribuito sul piano di lavoro.

Una successiva verifica, effettuata o sperimentalmente o con il metodo punto a punto, consentirà di stabilire il grado di uniformità dell’illuminamento effettivamente realizzato valutando il cosiddetto *coefficiente di uniformità*, definito come il rapporto tra i valori minimo e massimo dell’illuminamento, e confrontandolo con i valori consigliati dalle Norme. La Norma CIE 29-2 raccomanda che tra l’illuminamento minimo e quello massimo valga il seguente rapporto:

$$\frac{E_{min}}{E_{max}} \geq 0.8$$

L’applicazione della procedura di calcolo prevista dal metodo del fattore di utilizzazione può essere schematizzata seguendo la traccia seguente:

³⁵ Talora in letteratura si trova definito il rendimento η_a di un apparecchio illuminante come il rapporto tra il flusso luminoso uscente dal singolo apparecchio Φ_{out} e quello della sorgente nuda Φ :

$$\eta_a = \frac{\Phi_{out}}{\Phi}$$

I rendimenti variano generalmente dal 100% fino al 70% - 80%. Una sorgente puntiforme senza apparecchio intorno ha un rendimento unitario però ha sicuramente un fattore di utilizzazione basso in quanto manca un qualsiasi apparato che convogli la luce verso la superficie dove deve svolgersi il compito visivo.

1. Scelta del valore più indicato dell'illuminamento.

Le Norme nazionali ed internazionali consigliano e raccomandano i valori dell'illuminamento richiesto in funzione del compito visivo da svolgere o della destinazione d'uso dell'ambiente. Di solito, per ogni compito visivo o per ogni tipo di ambiente, viene assegnata una terna di valori per l'illuminamento legati tra loro da un rapporto pari a 1,5 con arrotondamenti. Questo valore è giustificato dal fatto che l'occhio non percepisce piccole differenze di illuminamento ma solo variazioni almeno del 50%.

Viene indicata una terna di valori perché nello stesso ambiente di lavoro i compiti visivi possono essere differenziati e perché differente può essere l'età media degli utenti. L'età influisce ovviamente sulle capacità di percezione visiva: un compito visivo per persone sotto i 45 anni richiede meno luce di quanto non serva per lo stesso lavoro ma per persone ultrasessantenni.

Il valore medio della terna è consigliato per lo svolgimento del compito visivo in condizioni normali, il valore superiore per gli stessi compiti visivi che richiedono più attenzione o che vengono svolti da persone di capacità visive ridotte, mentre il valore inferiore è suggerito in condizioni meno esigenti, a vantaggio di un sicuro risparmio economico senza ovviamente pregiudicare la sicurezza nello svolgimento delle attività.

Nelle tabelle 12 e 13 vengono riportate le terne di valori dell'illuminamento consigliate dalla UNI 10380 in corrispondenza di vari compiti visivi, relativamente ad ambienti di tipo industriale o civile.

Tabella 12. Valori dell'illuminamento mantenuto per ambienti industriali consigliato dalle Norme UNI 10380

Ambiente o compito visivo	Illum. mantenuto (lx)	Ton. colore	Gruppo resa cr.	Grado abbagl.
OFFICINE DI ASSEMBLAGGIO				
Lavorazioni grezze, assemblaggio di macchinari pesanti	200-300-500	W, I	3	C
Lavorazioni medie, assemblaggio motori e telai di veicoli	300-500-750	I, C	3	C
Lavorazioni delicate, assemblaggio macchinari elettronici e per uffici	500-750-1000	I, C	2	B
Lavorazioni molto delicate, assemblaggio strumenti	1000-1500-2000	C	2	B
INDUSTRIA ELETTROTECNICA ED ELETTRONICA				
Manifattura cavi	200-300-500	I, C	3	C
Assemblaggio apparecchiature telefoniche	300-500-750	W, I, C	2	B
Assemblaggio bobine e trasformatori	500-750-1000			
Assemblaggio ricevitori radio e TV	750-1000-1500	W, I	2	B
Assemblaggio componenti elettronici di ultraprecisione	1000-1500-2000	C	2	B
INDUSTRIA DI LAVORAZIONE DELLE PELLI				
Normali aree di lavoro	200-300-500	W, I	3	C
Pressatura, taglio, cucitura, produzione scarpe etc.	500-750-1000	W, I, C	2	B
Classificazione e controllo di qualità e del colore	750-1000-1500	W, I, C	1°	A-B
CENTRALI ELETTRICHE				

Sala caldaie	50-100-150	W, I	3	D
Sale telefoni ed apparecchiature di comunicazione	150-200-300	W, C	2	B
Sala turbine ed alternatore	150-200-300	W, I	3	C
Sala pompe, contatori, compressori, impianti ausiliari	50-100-150	W, I	3	D
Sala comandi: scrivanie e pannelli verticali	200-300-500	W, I	2	B
INDUSTRIE ALIMENTARI				
Aree di lavoro normale	200-300-500	W, I	2	C
Lavorazioni automatiche	150-200-300	W, I	2	C
Decorazioni a mano ed ispezioni	300-500-750	W, I, C	1B	B
FONDERIE				
Ambienti attigui ai forni	150-200-300	W, I	3	D
Formature grezze, lavorazioni di anime grezze	200-300-500	W, I	3	D
Formature fini, lavorazioni di anime fini, ispezioni	300-500-750	W, I, C	3	B
VETRENERIE E FABBRICHE DI CERAMICA				
Ambienti attigui ai forni	100-150-200	W, I	3	D
Sale per mescolatura, stampi, formatura, cottura	200-300-500	W, I	3	C
Finitura, vetrificazione e smaltatura	300-500-750	W, I	3	C
Colorazione, decorazione	500-750-1000	W, I, C	2	B
Rettificazione di lenti ed ottiche, lavori delicati	750-1000-1500	W, I, C	2	B
ACCIAIERIE E SIMILI				
Produzioni che non richiedono interventi manuali	50-100-150	W, I	3	D
Produzioni che richiedono interventi manuali	100-150-200	W, I	3	C
Postazioni fisse di lavoro	200-300-500	W, I	3	C
Piattaforme di comando ed ispezione	300-50-750	W, I	3	B
CARTIERE				
Produzione di carta e cartone	200-300-500	W, I	3	C
Processi automatici	150-200-300	W, I	3	C
Impastatore ed impianti di preparazione	200-300-500			
Stampaggio	300-500-750			
Ispezione, controllo, classificazione, selezione	300-500-750	W, I, C	2	B
INDUSTRIA TESSILE				
Apertura dei rotoli, cardatura, stenditura	200-300-500	W, I	2	C
Filatura, bobinatura, aspatura, pettinatura, tintura	300-500-750	W, I	1B	B
Montaggio, ritorcitura, tessitura, cucitura	500-750-1000	W, I, C	1B	B
Stiratura	300-500-750			

Ispezione	750-1000-1500			
FALEGNAMERIE, MOBILIFICI				
Segherie	150-200-300	W, I	2	B-C
Lavori al banco, assemblaggio	200-300-500	W, I	2	B
Lavorazione fine del legno	300-500-750	W, I, C	2	A-B
Finitura, ispezione e controllo finale	500-750-1000	I, C	1B	A-B
CEMENTIFICI				
Fornaci, frantumatura e molatura	100-150-200	W, I	3	D
INDUSTRIA CHIMICA				
Processi automatici	50-100-150	W, I	3	D
Impianti con manutenzione occasionale	100-150-200	W, I	3	D
Aree interne di impianti	200-300-500	W, I	3	C
Sale comandi e di controllo, laboratori	300-500-750	W, I, C	2	B
Produzione e manifattura farmaci	300-500-750	W, I, C	2	B
Ispezione	500-750-1000	I, C	2	B
Controllo colori	750-1000-1500	C	1A	A-B
Produzione pneumatici	300-500-750	W, I, C	3	C
OFFICINA MACCHINE E MONTAGGIO				
Lavori occasionali	150-200-300	W, I	3	C
Lavori grossolani al banco, saldatura	200-300-500	W, I	3	C
Lavori medi al banco, assistenza macchine automatiche	300-500-750	W, I	3	C
Lavori delicati al banco, macch. Autom. Sofisticate, test	500-750-1000	W, I, C	3	B
Lavorazioni molto delicate, calibratura, ispezioni	1000-1500-2000			
INDUSTRIA AEROMOBILI				
Ispezione e riparazioni	300-500-750	W, I	3	B
Prova motori aeromobile	500-750-1000	I, C	3	B
PITTURA E VERNICIATURA A SPRUZZO				
Immersione, verniciatura a spruzzo preliminare	200-300-500	W, I	1B	C
Pittura, verniciatura a spruzzo e finiture normali	300-500-750	W, I	1B	C
Pittura, verniciatura a spruzzo e finiture delicate	500-750-1000	W, I	1B	B
Ritocchi ed accompagnamento del colore	750-1000-1500	I, C	1A	B
STAMPA E LEGATORIA				
Sala macchine di stampa	300-500-750	W, I	2	B
Composizione e lettura bozze	500-750-1000	W, I, C	1B	B
Correzione bozze, ritocchi, incisioni	750-1000-1500	I, C	1A	B

Riproduzione in colore e stampa	1000-1500-2000	C	1B	B
Incisione su acciaio e rame	1500-2000-3000	C	1B	B
Rilegatura	300-500-750	W, I	2	B
Rifinitura, stampaggio in rilievo	500-750-1000	I, C	1B	B
PRODUZIONE ABBIGLIAMENTO				
Taglio e cucitura	500-750-1000	I, C	2	B
Controllo ed ispezione	750-1000-1500	I, C	2	A-B
Stiratura	300-500-750	W, I, C	2 B	

Tabella 13 Valori dell'illuminamento mantenuto per ambienti civili consigliato dalle Norme UNI 10380

NEGOZI, MAGAZZINI, SUPERMERCATI				
Aree di circolazione	150-200-300	I	1B	B
Esposizione merci	300-500-750	I	1B	B
Vetrine	500-750-1000	W, I, C	1B	B
UFFICI				
Dattilografia, sale per computers	300-500-750	W, I	1B	B
Uffici di programmazione e di disegno	500-750-1000	W, I	1B	B
Sale riunioni	300-500-750	W, I	1B	B
SCUOLE E UNIVERSITA'				
Illuminazione generale aule di scuola	300-500-750	W, I	1B	B
Lavagna aule di scuola	300-500-750	W, I	1B	B
Laboratori artistici e scientifici	500-750-1000	W, I, C	1B	B
Illuminazione generale aule universitarie	300-500-750	W, I	1B	B
Lavagna aule universitarie	500-750-1000	W, I	1B	B
Banchi per dimostrazioni aule universitarie	500-750-1000	W, I	1B	B
Laboratori, officine e sale per l'istruzione artistica	300-500-750	W, I	1B	B
Sale per assemblee	150-200-300	W, I	1B	B
CHIESE				
Navate, banchi	50-100-150	W, I, C	2	B
Coro, altare, pulpito	150-200-300	W, I, C	2	B
AUDITORIA				
Teatri e sale concerti	50-100-150	W, I	1B	B
Usi multipli	150-200-300	W, I	1B	B
EDILIZIA GENERALE: AMBIENTI COMUNI				
Corridoi, aree di circolazione	50-100-150	W, I	2	D
Scale, ascensori	100-150-200	W, I	2	D

Magazzini e depositi	100-150-200	W,I	3	D
ABITAZIONI ED ALBERGHI				
Zone di conversazione e passaggio	50-100-150	W	1A	A
Area di lettura	200-300-500	W	1A	A
Area di scrittura	300-500-750	W	1A	A
Zona dei pasti	100-150-200	W	1A	A
Cucina	200-300-500	W	1A	A
Bagno: illuminazione generale	50-100-150	W	1A	B
Bagno: zona specchio	200-300-500	W	1A	B
Camere: illuminazione generale	50-100-150	W	1A	B
Camere: zona armadi	200-300-500	W	1A	B
Camere: letti	200-300-500	W	1A	B
Camere: stiratura, cucitura e rammendo	500-750-1000	W	1A	A
AMBIENTI SPORTIVI				
Bocciodromi	300-500	I	1B	A
Palestre	300-500	I	1B	A
Piscine	300-500	I	1B	A
Tennis, pallavolo	500-750	I	1B	A
BIBLIOTECHE				
Scaffalature	150-200-300	W, I	2	C
Tavoli	300-500-750	W, I	1B	B
Area di catalogazione e classificazione	200-300-500	W, I	1B	B
Legatura	200-300-500	W, I	2	B
OSPEDALI				
Corsie: illuminazione generale	50-100-150	W	1A	A
Corsie: esami	200-300-500	W	1A	A
Corsie: lettura	150-200-300	W	1A	A
Corsie: illuminazione notturna	3-5-10	W	1A	
Locali per esami: illuminazione generale	300-500-750	W	1A	A
Locali per esami: ispezioni	750-1000-1500	W, I	1A	A
Terapie intensive	200-300-500	W	1A	A
Chirurgia: illuminazione generale	500-750-1000	I	1A	A
Chirurgia: illuminazione localizzata	10000-20000-30000	I, C	1A	A
Sale autopsia: illuminazione generalizzata	5000-10000-15000	I, C	1A	A
Sale autopsia: illuminazione localizzata	5000-10000-15000	I, C	1A	A

Laboratori e farmacie: illuminazione generalizzata	300-500-750	I, C	1A	A
Laboratori e farmacie: illuminazione localizzata	500-750-1000	I, C	1A	A
Locale per consulti: illuminazione generale	300-500-750	W, I	1A	A
Locale per consulti: illuminazione localizzata	500-750-1000	W, I	1A	A

2. Determinazione dei parametri che definiscono le caratteristiche dell'ambiente da illuminare

La molteplicità delle geometrie dei locali può essere utilmente razionalizzata mediante la definizione di un opportuno numero adimensionale, il già citato "Indice del locale", che, a parità di compito visivo, considera simili, dal punto di vista illuminotecnico, ambienti con volumetrie e planimetrie diverse.

Nel caso di illuminazione diretta per un ambiente a geometria parallelepipedica l'indice del locale vale:

$$I = \frac{ab}{h(a+b)}$$

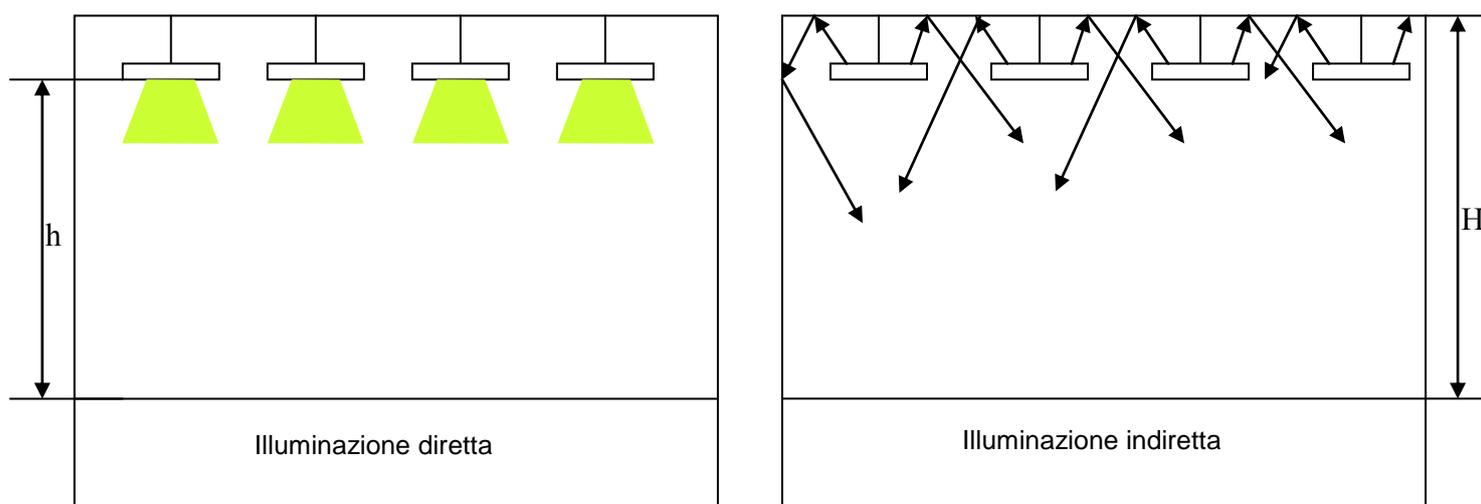
dove a e b sono le dimensioni in pianta mentre h è la distanza tra il piano di sospensione dei corpi illuminanti ed il piano di lavoro.

Se si adotta la soluzione dell'illuminazione indiretta l'indice del locale è definito dalla seguente:

$$I = \frac{ab}{H(a+b)}$$

dove H è la distanza tra il piano di lavoro ed il soffitto che funziona da sorgente per riflessione diffusa (cfr. Figura 16).

Figura 16: Indice del locale



L'ambiente da illuminare collabora con l'impianto di illuminazione e contribuisce attivamente alla qualità del risultato anche attraverso le superfici di contorno a causa della loro capacità di riflettere la luce. I coefficienti di riflessione dipendono dalla natura dei materiali delle pareti, dai colori e dal trattamento superficiale delle stesse. E' sufficiente la

conoscenza dei coefficienti di riflessione medi delle pareti, del soffitto e del pavimento. Generalmente la riflessione viene indicata con un numero a tre cifre: la prima cifra indica il coefficiente di riflessione percentuale del soffitto, la seconda quello delle pareti mentre la terza il coefficiente di riflessione del pavimento. Ad esempio il numero 751 indica un locale con i seguenti coefficienti medi di riflessione:

soffitto	70%
pareti	50%
pavimento	10%.

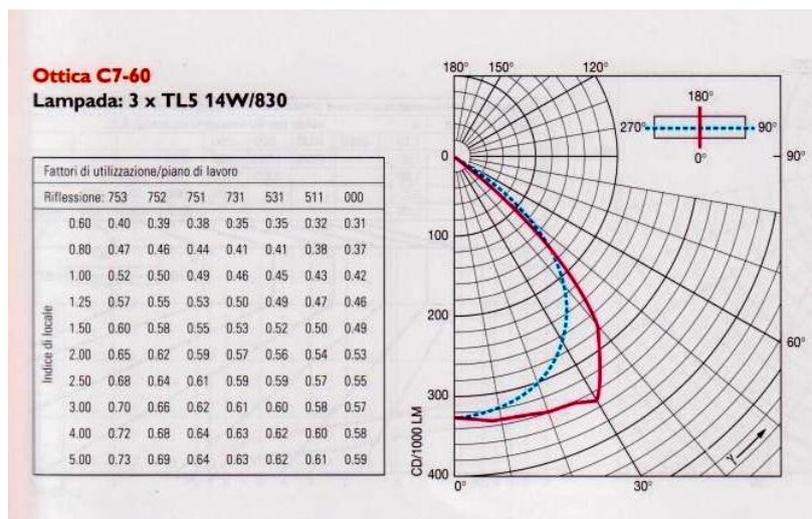
3. Scelta del tipo di apparecchio

Gli apparecchi illuminanti possono essere di diversi tipi per quanto riguarda la natura della sorgente, la conformazione dell'apparecchio di contorno e la modalità di installazione; ma il parametro, che più di ogni altro, caratterizza il corpo illuminante dal punto di vista illuminotecnico è la curva fotometrica, ossia la distribuzione angolare dell'intensità luminosa irradiata dall'apparecchio illuminante. In genere le curve fotometriche sono fornite dalle ditte costruttrici con valori riferiti ad un flusso luminoso standardizzato pari a 10^3 lm. Per le varie tipologie di apparecchi esistenti si hanno fattori di utilizzazione diversi che le ditte produttrici forniscono attraverso opportune tabelle.

4. Determinazione del fattore di utilizzazione

A questo punto della procedura è possibile determinare il fattore di utilizzazione per l'apparecchio illuminante mediante tabelle del tipo di quella mostrata in Figura 17.

Figura 17 Tabella per la determinazione del Fattore di utilizzazione (da PHILIPS)



Le ditte costruttrici forniscono i fattori di utilizzazione in funzione dei parametri geometrici dell'ambiente (indice del locale), delle caratteristiche riflettenti dell'involucro (terne dei coefficienti di riflessione del soffitto, pareti e pavimento) e delle caratteristiche del corpo illuminante.

5. Calcolo del numero di apparecchi per l'illuminamento mantenuto

Dalla definizione di fattore di utilizzazione si ha per un impianto nuovo:

$$\Phi_{tot} = \frac{\Phi_{ut,in}}{F_u}$$

Se E indica il valore dell'illuminamento scelto nella terna di valori riportati dalle Norme ed S l'area del piano di lavoro, nell'ipotesi di distribuzione uniforme dell'illuminamento sul piano di lavoro, propria del metodo, sempre in condizioni di impianto nuovo, si ha:

$$E = \frac{\Phi_{ut,in}}{S} \Rightarrow \Phi_{ut,in} = E \cdot S$$

Da cui:

$$\Phi_{tot} = \frac{E \cdot S}{F_u}$$

Confrontando le relazioni che esprimono il flusso totale uscente dagli apparecchi si ricava facilmente il numero di corpi illuminanti necessario per assicurare lo svolgimento del compito visivo in condizioni di impianto nuovo:

$$N = \frac{E \cdot S}{F_u \cdot \Phi_{out}}$$

A questo punto appare necessaria la definizione di due fattori correttivi che consentono di aggiustare il calcolo del numero di apparecchi illuminanti in condizioni operative normali, quando, cioè, gli apparecchi e le lampade, inevitabilmente invecchiati e con le superfici trasparenti insudiciate esteriormente per il deposito di polvere e vapori condensati ed altro, riducono il loro flusso luminoso rispetto a quello iniziale.

I fattori correttivi inseriti da subito nel calcolo di progetto dell'impianto comportano certamente un iniziale sovradimensionamento dell'impianto e una temporanea lievitazione dei costi di esercizio che con il trascorrere del tempo scompaiono normalizzandosi su valori più giusti rispetto alle normali condizioni di esercizio.

Fattore di decadimento

Il primo fattore correttivo è il cosiddetto *fattore di decadimento* "d" che è definito come rapporto tra il flusso mantenuto emesso dopo un certo tempo commerciale (a regime), ed il flusso della sorgente nuova:

$$d = \frac{\Phi_{regime}}{\Phi_{out}}$$

Per una normale lampada ad incandescenza il decadimento dipende fortemente dall'annerimento del bulbo di vetro che perde progressivamente la sua trasparenza iniziale a seguito della sublimazione del tungsteno.

Per le lampade fluorescenti l'invecchiamento si evidenzia con il ridursi dell'efficacia dei fosfori, con il deteriorarsi degli elettrodi metallici sotto il continuo bombardamento soprattutto dei più massivi ioni positivi etc..

Il fattore di decadimento o deprezzamento è un numero minore o uguale all'unità (vale 1 quando l'apparecchio è nuovo) e viene di solito fornito dai costruttori, ma, in mancanza di informazioni precise, può essere assunto dalla Tabella 14 seguente.

Tabella 14: Valori tipici del fattore di decadimento

Tipo di lampada	Decadimento
Lampade ad incandescenza	0.90
Lampade a fluorescenza	0.88
Lampade a vapori di sodio	0.85
Lampade a vapori di mercurio	0.85
Lampade a luce miscelata	0.86

Fattore di manutenzione

L'altro fattore correttivo è il cosiddetto *fattore di manutenzione* "m" che dipende dal grado di pulizia e dalla frequenza degli interventi di pulizia effettuati nell'ambiente da illuminare. La sporcizia si deposita prevalentemente sulle superfici orizzontali risparmiando quasi del tutto quelle verticali dove comunque può accumularsi per effetto delle forze di adesione e di attrazione di natura elettrostatica sulla sporcizia inerte in movimento per gravità o per ventilazione. Le cause più comuni di insudiciamento sono la polvere, la segatura, i vapori grassi ed oleosi liberati in atmosfera nei processi di cottura e di trattamento ad alta temperatura, i vapori fuoriusciti da vasche a cielo aperto, le particelle di sostanze trascinate dai vapori, fumi, sfilacciate di tessuti, ceneri, vapori di vernici e di colle, polveri di marmo e di legno etc. Nella tabella 15 vengono indicati alcuni valori di riferimento del fattore di manutenzione

Tabella 15: Valori consigliati per il fattore di manutenzione

Pulizia	Atmosfera sporca	Atmosfera pulita
Frequente	0.85	0.95
Normale	0.80	0.90
Scarsa	0.75	0.85

Noti il fattore di manutenzione e quello di decadimento, introduciamo il cosiddetto "flusso utile mantenuto" $\phi_{ut,mt}$, il flusso cioè che giunge sul piano di lavoro (utile) in condizioni di esercizio di regime dell'impianto (mantenuto). Tra il flusso utile iniziale e quello mantenuto esiste, naturalmente, la seguente relazione:

$$\phi_{ut,mt} = \phi_{ut,in} \cdot m \cdot d$$

In condizioni di regime, si ha, sempre nella ipotesi di uniformità dell'illuminamento sul piano di lavoro, che sta alla base del metodo:

$$E = \frac{\phi_{ut,mt}}{S} \Rightarrow \phi_{ut,mt} = E \cdot S \Rightarrow \phi_{ut,in} \cdot m \cdot d = E \cdot S$$

Ricordando che:

$$F_u = \frac{\Phi_{ut,in}}{\Phi_{tot}}$$

Si ha:

$$\Phi_{ut,in} = \Phi_{tot} \cdot F_u = N \cdot \Phi_{out} \cdot F_u$$

Da cui si ottiene:

$$N \cdot \Phi_{out} \cdot F_u \cdot m \cdot d = E \cdot S \Rightarrow N = \frac{E \cdot S}{F_u \cdot \Phi_{out} \cdot m \cdot d}$$

In letteratura la formula precedente è a volte scritta con il cosiddetto “*fattore di perdita luminosa*”, dato dal prodotto tra il fattore di decadimento e quello di manutenzione:

$$F = m \cdot d$$

In questo caso assume la forma seguente:

$$N = \frac{E \cdot S}{F_u \cdot \Phi_{out} \cdot F}$$

Una volta trovato il numero di corpi illuminanti da installare deve essere determinata la loro distribuzione più adatta al conseguimento di una opportuna ed adeguata sovrapposizione dei fasci di luce sul piano di lavoro senza il fastidio dovuto alla formazione di chiazze chiare e scure e con l’obiettivo fondamentale di realizzare il massimo grado di uniformità possibile. Le Norme CIE 52,1982 propongono una soluzione tipo per un locale a geometria rettangolare con il rapporto tra le dimensioni in pianta dato da:

$$\frac{a}{b} = 1.6$$

distinguendo tra corpi illuminanti disposti in numero di M parallelamente al lato più lungo a ed in numero di N parallelamente all’altro lato. Per il locale di riferimento i valori di M ed N sono funzione dell’indice del locale come riportato in Tabella 16:

Tabella 16: Valori consigliati di M ed N per una corretta distribuzione dei corpi illuminanti

Indice del locale	0.6	0.8	1.0	1.25	1.5	2.0	2.5	3	4	5	10	20
M	2	2	3	3	4	4	5	6	8	10	20	38
N	1	2	2	3	3	4	4	4	5	6	12	24

Un altro criterio per la distribuzione dei corpi illuminanti si basa sul parametro usualmente denominato “Massima spaziatura ammissibile” d_{\max} tra i centri o tra gli assi di simmetria dei corpi illuminanti:

$$d_{\max} = SC \cdot h$$

dove h è la distanza in metri tra il piano di lavoro ed il piano di montaggio dei corpi illuminanti, mentre SC , detto *Criterio di Spaziatura*, è un numero fornito dal costruttore o in alternativa, ricavabile dalle tabelle I.E.S. che indicano il valore di SC per tutte le tipologie dei corpi illuminanti standardizzati. Le file dei corpi illuminanti vicine alle pareti è bene che distino da queste tra la terza parte e la metà della distanza massima ammissibile tra due file consecutive.

Per la scelta del piano di sospensione delle sorgenti si può tenere conto delle seguenti valutazioni circa il rapporto di sospensione r_s :

$$r_s = \frac{h'}{h'+h}$$

con

$$h' \leq \frac{h}{2} \quad 0 \leq r_s \leq \frac{1}{3}$$

dove h è la distanza tra il piano di sospensione delle lampade ed il piano di lavoro, mentre h' è la distanza tra il piano delle lampade ed il soffitto. Il rispetto di tale regola dovrebbe garantire una buona uniformità di distribuzione della luce che, comunque, deve essere verificata per validarne la conformità alle norme mediante il metodo punto a punto o mediante misure in alcuni punti più significativi.

METODO DELLE CAVITÀ ZONALI

Il fattore di utilizzazione F_u ed il fattore di perdita luminosa F , necessari, come già visto, per determinare il numero di apparecchi illuminanti in grado di fornire sul piano di lavoro un illuminamento uniforme di valore pari a quello di progetto, possono essere determinati con una procedura alternativa, anche se analoga, a quella dell'Indice del locale, detta delle “Cavità zonali” (Zonal Cavity) raccomandata dalla I.E.S. Essa si basa sull'individuazione, nell'ambiente considerato, di tre cavità definite nel modo seguente:

- CAVITÀ PAVIMENTO (Floor Cavity):** porzione del volume dell'ambiente delimitata dal pavimento e dal piano di lavoro;
- CAVITÀ AMBIENTE (Room Cavity):** porzione del volume dell'ambiente compresa tra il piano del lavoro ed il piano di montaggio degli apparecchi illuminanti;
- CAVITÀ SOFFITTO (Ceiling Cavity):** porzione del volume dell'ambiente compresa tra il piano di montaggio degli apparecchi illuminanti ed il soffitto.

Per ciascuna cavità è possibile individuare un'altezza h ed un coefficiente adimensionale CR , detto “Rapporto di cavità (Cavity Ratio)”, che la caratterizzano geometricamente. In corrispondenza di ciascuna delle tre cavità le due grandezze considerate diventano:

$h = h_{fc}$ (altezza della cavità pavimento); FCR (Floor Cavity Ratio):

$$FCR = 5 \frac{a+b}{a \cdot b} h_{fc}$$

$h = h_{rc}$ (altezza della cavità ambiente); RCR (Room Cavity Ratio):

$$RCR = 5 \frac{a+b}{a \cdot b} h_{rc}$$

$h = h_{cc}$ (altezza della cavità soffitto); CCR (Ceiling Cavity Ratio):

$$CCR = 5 \frac{a+b}{a \cdot b} h_{cc}$$

Determinazione del fattore di utilizzazione col metodo delle cavità zonali

Il fattore di utilizzazione viene determinato, secondo il metodo delle cavità zonali, dalle tabelle fornite dai costruttori che adottano la procedura I.E.S. o da quelle prodotte dalla I.E.S. stessa per una cinquantina di tipici apparecchi illuminanti.

Per ogni apparecchio illuminante esso è determinato in funzione del rapporto di cavità ambiente, della riflettività delle pareti laterali (ρ_w) e della “riflettività effettiva” della cavità soffitto (ρ_{cc}). Quest’ultima può essere differente dalla riflettività del solo soffitto sia per la eventuale diversa finitura superficiale delle pareti laterali della cavità sia per la sua forma. L’importanza attribuita alla geometria della cavità del soffitto può più facilmente essere compresa tenendo conto che il flusso luminoso rinviato verso il piano di lavoro dalle superfici laterali della cavità è sicuramente minore di quello rinviato da una superficie di pari area ma disposta orizzontalmente in quanto diversi sono i fattori di forma o di intercettazione.

La riflettività effettiva della cavità soffitto si può determinare da una opportuna tabella fornita dalla I.E.S. in funzione della riflettività della base della cavità e di quella delle pareti laterali. Dalla medesima tabella è inoltre possibile ricavare il valore della riflettività effettiva della cavità pavimento (ρ_{fc}).

I valori tabulati del fattore di utilizzazione, ricavati per un valore di $\rho_{fc} = 20\%$, vengono corretti per valori diversi della riflettività effettiva della cavità pavimento mediante un opportuno fattore di correzione di solito fornito dalla medesima I.E.S.

Determinazione del Fattore di perdita luminosa totale LLF (Light Loss Factor)

Come già sottolineato, il flusso luminoso uscente dagli apparecchi illuminanti in condizioni di funzionamento a regime è certamente inferiore a quello stimato in condizioni di impianto nuovo. Durante la vita dell’impianto, infatti, intervengono numerose cause di deprezzamento del flusso luminoso, alcune delle quali, dette “controllabili”, possono

essere in qualche modo eliminate mediante opportuni interventi di manutenzione, mentre su altre, dette "incontrollabili", non è possibile esercitare alcuna azione di controllo. Queste ultime sono infatti legate a fatti accidentali, quali ad esempio una variazione nella tensione di alimentazione della lampada, o a fenomeni di naturale deterioramento dei materiali di cui sono fatti gli apparecchi illuminanti, o ancora all'uso di accessori (alimentatori, reattori etc.) di caratteristiche diverse rispetto a quelli utilizzati per determinare le risposte fotometriche dell'apparecchio. Le principali cause "controllabili" di deprezzamento del flusso luminoso sono, al contrario, classificate e stimate dalla I.E.S. mediante i seguenti coefficienti di deprezzamento:

Fattore di Deprezzamento per sporcizia sulle pareti dell'ambiente RSDD (Room Surface Dirt Depreciation)

La sporcizia che si deposita sulle pareti dell'ambiente causa una attenuazione del flusso luminoso da queste rinviato verso il piano di lavoro. Tale fattore è sicuramente più significativo nel caso di illuminazione prevalentemente indiretta soprattutto in ambienti di piccole dimensioni. La determinazione del fattore RSDD si effettua secondo i seguenti passaggi:

- determinazione del tipo di illuminazione;
- determinazione del "Deprezzamento % aspettato" fornito in funzione dell'intervallo di tempo in mesi che intercorre tra due interventi di pulizia delle pareti ed in funzione delle categorie di manutenzione dei corpi illuminanti.

Nelle tabelle seguenti, ricavate da grafici forniti dalla I.E.S., sono riportati i valori del deprezzamento in funzione del "livello di sporco ambiente" che può essere:

VC	Very Clean = molto pulito	C	Clean = pulito
M	Medium = sporco medio	D	Dirty = sporco
VD	Very Dirty = molto sporco.		

Tabella 17

Mesi	Cat. I					Cat. II					Cat. III				
	VC	C	M	D	VD	VC	C	M	D	VD	VC	C	M	D	VD
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0.98	0.97	0.95	0.92	0.90	0.99	0.97	0.95	0.93	0.92	0.97	0.95	0.94	0.93	0.90
6	0.97	0.95	0.93	0.88	0.82	0.98	0.96	0.93	0.90	0.88	0.95	0.93	0.91	0.88	0.84
9	0.97	0.94	0.91	0.86	0.77	0.97	0.95	0.91	0.88	0.85	0.93	0.91	0.88	0.85	0.81
12	0.96	0.93	0.89	0.83	0.72	0.97	0.93	0.90	0.86	0.82	0.92	0.90	0.86	0.82	0.78
15	0.95	0.92	0.88	0.82	0.69	0.96	0.92	0.87	0.84	0.80	0.91	0.88	0.84	0.81	0.76
18	0.95	0.91	0.87	0.80	0.65	0.95	0.91	0.86	0.83	0.78	0.90	0.87	0.83	0.79	0.74
21	0.95	0.90	0.86	0.79	0.63	0.95	0.90	0.85	0.82	0.76	0.88	0.85	0.81	0.77	0.71
24	0.94	0.89	0.85	0.78	0.61	0.94	0.89	0.85	0.80	0.74	0.87	0.84	0.80	0.75	0.69
27	0.93	0.88	0.83	0.77	0.59	0.94	0.88	0.84	0.78	0.73	0.86	0.83	0.78	0.73	0.67
30	0.93	0.87	0.82	0.76	0.58	0.94	0.87	0.83	0.77	0.72	0.85	0.82	0.76	0.71	0.65

33	0.93	0.86	0.80	0.74	0.56	0.93	0.86	0.82	0.76	0.71	0.84	0.80	0.75	0.70	0.63
36	0.92	0.85	0.80	0.73	0.55	0.93	0.86	0.81	0.75	0.70	0.83	0.79	0.74	0.68	0.61

Mesi	Cat.IV					Cat.V					Cat.VI				
	VC	C	M	D	VD	VC	C	M	D	VD	VC	C	M	D	VD
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0.98	0.96	0.93	0.90	0.82	0.98	0.95	0.92	0.88	0.85	0.98	0.96	0.94	0.81	0.89
6	0.96	0.93	0.89	0.83	0.72	0.96	0.93	0.87	0.83	0.77	0.95	0.92	0.90	0.85	0.81
9	0.95	0.91	0.85	0.77	0.65	0.95	0.90	0.84	0.80	0.73	0.94	0.88	0.85	0.79	0.74
12	0.93	0.88	0.81	0.72	0.61	0.93	0.88	0.82	0.77	0.71	0.92	0.85	0.81	0.73	0.67
15	0.92	0.86	0.77	0.68	0.57	0.91	0.86	0.80	0.75	0.68	0.91	0.83	0.77	0.69	0.62
18	0.91	0.84	0.74	0.64	0.53	0.90	0.85	0.79	0.74	0.66	0.89	0.81	0.73	0.65	0.57
21	0.90	0.82	0.72	0.62	0.51	0.89	0.84	0.77	0.72	0.65	0.87	0.78	0.79	0.61	0.53
24	0.89	0.80	0.69	0.59	-	0.88	0.83	0.76	0.71	0.64	0.86	0.76	0.66	0.57	-
27	0.88	0.78	0.66	0.56	-	0.87	0.82	0.75	0.69	0.63	0.85	0.75	0.63	0.54	-
30	0.87	0.76	0.65	0.55	-	0.87	0.81	0.75	0.68	0.61	0.83	0.73	0.60	0.51	-
33	0.86	0.75	0.63	0.53	-	0.86	0.80	0.74	0.67	0.60	0.82	0.71	0.57	-	-
36	0.86	0.74	0.61	0.52	-	0.85	0.79	0.73	0.65	0.59	0.81	0.70	0.54	-	-

Per stabilire a quale delle cinque tipologie di sporco appartenga l'ambiente considerato si può utilizzare la Tabella seguente:

Tabella 18 Livelli di sporco ambientale.

	VC	C	M	D	VD
Sporco prodotto in ambiente	No	Molto poco	Non eccessivo	Accumulo rapido	Accumulo continuo
Sporco da ambienti vicini.	No	Molto poco	Poco	Molto	Moltissimo
Ventilazione, Filtraggio	Eccellente	Sup. alla media	Inf. alla media	Solo ventilatori o soffianti	Nessuna
Adesività	Nessuna	Inf. alla media	Abbastanza	Alta	Alta

Una volta ricavato il valore del Deprezzamento (%) aspettato è possibile accedere alla Tabella 19 in cui il fattore RSDD è fornito anche in funzione del fattore RCR e del tipo di illuminazione.

Tabella 19: Determinazione dell'RSDD

RSDD (%)	TIPO DI DISTRIBUZIONE DELLA LUCE																			
	DIRETTA				SEMI-DIR.				DIR.-INDIR.				SEMI-INDIR.				INDIRETTA			
	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
RCR																				
1	98	96	94	92	97	92	89	84	94	87	80	76	94	87	80	73	90	80	70	60
2	98	96	94	92	96	92	88	83	94	87	80	75	94	87	79	72	90	80	69	59
3	98	95	93	90	96	91	87	82	94	86	79	74	94	86	78	71	90	79	68	58
4	97	95	92	90	95	90	85	80	94	86	79	73	94	86	78	70	89	78	67	56

		TIPO DI DISTRIBUZIONE DELLA LUCE																		
5	97	94	91	89	94	90	84	79	93	86	78	72	93	86	77	69	89	78	66	55
6	97	94	91	88	94	89	83	78	93	85	78	71	93	85	76	68	89	77	66	54
7	97	94	90	87	93	88	82	77	93	84	77	70	93	84	76	68	89	76	65	53
8	96	93	89	86	93	87	81	75	93	84	76	69	93	84	76	68	88	76	64	52
9	96	92	88	85	93	87	80	74	93	84	76	68	93	84	75	67	88	75	63	51
10	96	92	87	83	93	86	79	72	93	84	75	67	92	83	75	67	88	75	62	50

Fattore di deprezzamento per sporcizia sul corpo illuminante LDD (Luminaire Dirt Depreciation)

Anche lo sporco che si deposita sull'apparecchio illuminante, in particolare quello aderente (grassi, vapori, polveri etc.) genera un importante deprezzamento del flusso luminoso rispetto a quello teoricamente uscente da esso.

I cataloghi delle sorgenti luminose pubblicati e diffusi dai costruttori forniscono in genere una grandezza detta "Categoria di Manutenzione" dell'apparecchio. In mancanza di dati specifici questa può essere determinata mediante la seguente tabella 20.

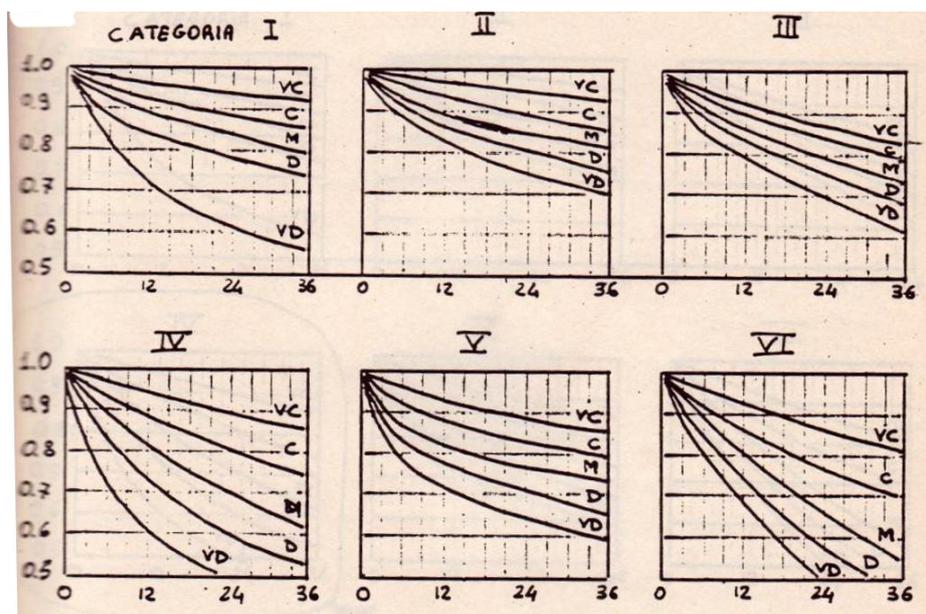
In tale tabella la categoria di manutenzione varia in funzione delle caratteristiche di chiusura inferiore e superiore. Il suo valore viene individuato in corrispondenza del contemporaneo verificarsi di entrambe le condizioni indicate.

Tabella 20 Categorie di manutenzione dei corpi illuminanti

Cat.	Chiusura superiore	Chiusura inferiore
I	Nessuna	Nessuna
II	<ul style="list-style-type: none"> Nessuna. Trasparente con almeno il 15% di flusso luminoso verso l'alto attraverso aperture. Traslucida con almeno il 15% di flusso luminoso verso l'alto attraverso aperture. Opaca con almeno il 15% di flusso luminoso verso l'alto attraverso aperture. 	<ul style="list-style-type: none"> Nessuna. Louvers o "nido d'ape".
III	<ul style="list-style-type: none"> Trasparente con meno del 15% di flusso luminoso verso l'alto attraverso aperture. Traslucida con meno del 15% di flusso luminoso verso l'alto attraverso aperture. Opaca con meno del 15% di flusso luminoso verso l'alto attraverso aperture. 	<ul style="list-style-type: none"> Nessuna. Louvers o "nido d'ape".
IV	<ul style="list-style-type: none"> Trasparente senza aperture. Traslucida senza aperture. Opaca senza aperture. 	<ul style="list-style-type: none"> Nessuna. Louvers o "nido d'ape".
V	<ul style="list-style-type: none"> Trasparente senza aperture. Traslucida senza aperture. Opaca senza aperture. 	<ul style="list-style-type: none"> Trasparente senza aperture. Traslucida senza aperture.
VI	<ul style="list-style-type: none"> Nessuna Trasparente senza aperture. Traslucida senza aperture. Opaca senza aperture. 	<ul style="list-style-type: none"> Trasparente senza aperture. Traslucida senza aperture. Opaca senza aperture.

Se questo abbinamento avviene per più di una categoria, si sceglie la categoria di valore più basso. Il valore così determinato della Categoria di Manutenzione consente di selezionare una delle sei curve riportate in Figura 18 in cui il fattore LLD viene stimato in funzione del livello di sporco in ambiente e dell'intervallo di tempo in mesi che intercorre, secondo il piano di manutenzione, tra due consecutivi interventi di pulizia degli apparecchi.

Figura 18



Fattore di deprezzamento delle lampade LLD (Lumen Lamp Depreciation)

Il normale esercizio delle lampade causa un deprezzamento del flusso luminoso emesso per fenomeni di invecchiamento naturale (ad esempio assottigliamento del filamento di tungsteno ed annerimento del bulbo nelle lampade ad incandescenza, degradazione dei fosfori nelle lampade fluorescenti etc.). La I.E.S. definisce il fattore di deprezzamento delle lampade, LLD, come il rapporto tra il flusso emesso da una lampada al 70% della sua vita media e quello emesso dalla lampada nuova.

Alcuni costruttori forniscono i dati di tale grandezza riferiti alle sorgenti di loro produzione. In assenza di tali informazioni si possono utilizzare, con buona approssimazione, i valori indicati nella Tabella 21 per alcuni tipi di lampade.

Tabella 21 Decadimento del flusso luminoso per alcuni tipi di lampade

Tipi di lampade	VITA MEDIA (h)	LLD (%)
Incandescenza	1000	0.85
Incandescenza ad alogeni	2000	0.95
Fluorescenza (tubolari)	7500	0.90
Vap. di mercurio ad alta press.	12000	0.80
Alogenuri metallici	6000	0.70
Vapori di sodio ad alta press.	12000	0.90
Vapori di sodio a bassa press.	10000	0.85

Fattore di fuoriusso delle lampade LBO (Lamp Burn-out Factor)

Il flusso luminoso utile sul piano di lavoro può essere significativamente abbassato per la presenza di lampade andate fuori uso non tempestivamente sostituite. Il piano di manutenzione può essere infatti attuato in alcuni casi, soprattutto in applicazioni industriali di grandi dimensioni, prevedendo la contemporanea periodica sostituzione di tutte le lampade ad intervalli di tempo opportunamente stabiliti. In questo caso, durante il normale esercizio dell'impianto, alcune lampade possono essere non funzionanti.

Il fattore LBO si definisce come il rapporto tra il numero minimo stimato di lampade che rimangono sempre accese ed il numero totale delle lampade stesse installate. Nei casi in cui le lampade fuori uso siano tempestivamente sostituite il fattore LBO assume il valore unitario.

I quattro fattori di deprezzamento consentono, una volta stimati singolarmente come indicato, di determinare il fattore di perdita luminosa totale LLF nel modo seguente:

$$LLF = LDD \cdot RSDD \cdot LLD \cdot LBO$$

METODO PUNTO A PUNTO

Il metodo dell'illuminamento uniforme medio o del "Fattore di utilizzazione" consente di effettuare un primo dimensionamento dell'impianto di illuminazione di un ambiente con la determinazione del numero di sorgenti luminose necessarie ad illuminare in modo mediamente uniforme il piano di lavoro.

I risultati ottenuti possono in una successiva fase essere sottoposti ad una verifica dell'effettiva distribuzione spaziale (punto per punto) dell'illuminamento realizzato e del grado di uniformità raggiunto mediante un metodo punto a punto. Inoltre quest'ultimo consente di effettuare un dimensionamento più preciso dell'impianto di illuminazione soprattutto quando applicato in appositi soft-wares di calcolo mediante i quali è possibile effettuare in tempi estremamente ridotti il calcolo dell'illuminamento in un gran numero di punti del piano di lavoro.

Il metodo punto a punto si basa sul concetto che l'illuminamento in un punto è dato dalla somma dei contributi dovuti, rispettivamente, alla componente diretta ed a quella indiretta, come espresso dalla:

$$E_P = (E_{P,d} + E_{P,ind}) \cdot F$$

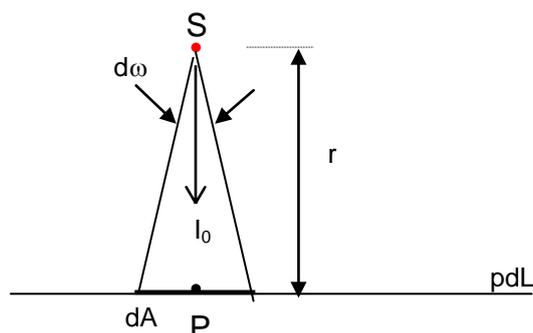
in cui E_P indica l'illuminamento nel punto P, $E_{P,d}$ e $E_{P,ind}$ le sue componenti diretta ed indiretta ed F il già noto fattore di deprezzamento.

I due contributi vanno calcolati in maniera distinta l'uno dall'altro nei modi indicati di seguito.

Determinazione della componente diretta (Legge dell'inverso del quadrato della distanza)

Consideriamo un punto P appartenente al piano di lavoro e la superficie infinitesima dA presa su tale piano nell'intorno di P.

Figura 19



Se $d\Phi$ è il flusso luminoso infinitesimo incidente perpendicolarmente su dA , si ha:

$$E_{P,d} = \frac{d\Phi}{dA}$$

Considerando il flusso luminoso $d\Phi$ prodotto da una sorgente luminosa puntiforme S posta a distanza r dal piano di lavoro di cui sia nota la distribuzione spaziale delle intensità luminose (curva fotometrica), si potrà scrivere:

$$d\Phi = I_0 \cdot d\omega$$

essendo I_0 l'intensità luminosa (cd) in direzione normale al piano di lavoro e $d\omega$ l'angolo solido infinitesimo (sr) nell'intorno della direzione di I_0 .

Del resto, per la superficie dA disposta ortogonalmente ad r , vale la:

$$dA = r^2 \cdot d\omega$$

per cui si ottiene:

$$E_{P,d} = \frac{d\Phi}{dA} = I_0 \cdot \frac{d\omega}{r^2 \cdot d\omega} = \frac{I_0}{r^2}$$

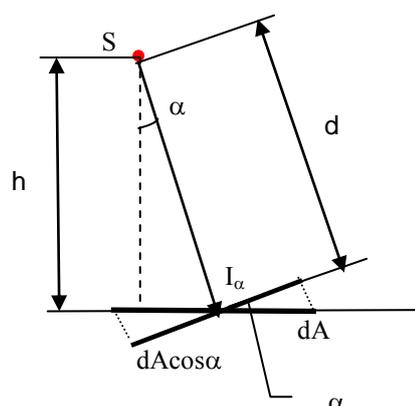
che esprime la nota legge dell'inverso del quadrato della distanza, per la quale "l'illuminamento diretto in un punto P appartenente ad una superficie perpendicolare alla direzione di propagazione dell'intensità luminosa risulta inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente".

Nella maggior parte dei casi è necessario calcolare l'illuminamento diretto ottenuto con incidenza obliqua dell'intensità luminosa sul piano di lavoro. Si presentano generalmente i due casi seguenti:

1) *Illuminamento con incidenza obliqua su superficie orizzontale*

Consideriamo il punto P appartenente ad un piano orizzontale, su cui incide il flusso luminoso $d\Phi$ generato dalla sorgente S . E' questo un tipico caso di illuminamento su un piano con incidenza obliqua (cfr. Elementi di Fotometria)

Figura 20



ha: Come già dimostrato nel capitolo “Elementi di Fotometria” di questa dispensa si

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{I_\alpha \cdot d\omega}{dA} = \frac{I_\alpha \cdot \frac{dA \cdot \cos \alpha}{d^2}}{dA} = \frac{I_\alpha}{d^2} \cdot \cos \alpha$$

E' evidente che, al variare della posizione di P sul piano di lavoro, variano d ed α , mentre h rimane costante.

Essendo:

$$h = d \cdot \cos \alpha$$

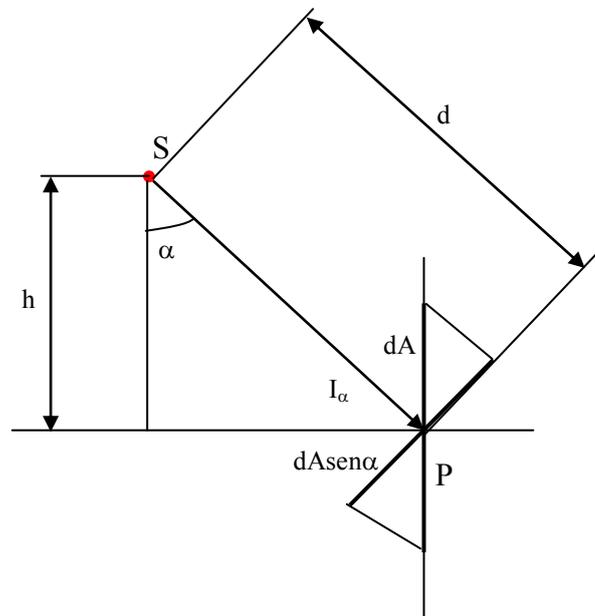
si ottiene:

$$E_{P,d} = \frac{I_\alpha}{d^2} \cdot \cos \alpha = \frac{I_\alpha}{h^2} \cdot \cos^3 \alpha$$

2) Illuminamento con incidenza obliqua su superficie verticale

In maniera del tutto analoga si calcola l'illuminamento nel punto P appartenente ad una superficie verticale.

Figura 21



In questo caso, se dA è la superficie infinitesima sul piano verticale nell'intorno di P e dA_\perp la sua proiezione in direzione normale a quella di vista, si ha:

$$dA_\perp = dA \cdot \sin \alpha$$

Per cui:

$$E_{P,d} = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{d\Phi}{dA_{\perp}} \cdot \cos\alpha = \frac{I_{\alpha}}{r^2} \cdot \cos\alpha = \frac{I_{\alpha}}{h^2} \cdot \cos^2\alpha \cdot \cos\alpha$$

Per calcolare l'illuminamento diretto totale nel punto P, dovuto a tutte le sorgenti installate, è sufficiente sommare i contributi singoli di ciascuna di esse (sovrapposizione degli effetti).

Tale procedura risulta semplificata quando l'impianto è costituito da un certo numero di sorgenti dello stesso tipo, come illustrato nel seguente esempio di calcolo.

ESEMPIO

Calcolare l'illuminamento diretto prodotto in un punto P del piano di lavoro orizzontale dell'ambiente di figura in cui sia installato un impianto costituito da 4 corpi illuminanti con 2 lampade fluorescenti da 36 W ciascuno, caratterizzati dalla distribuzione delle intensità indicata nella tabella seguente. In essa vengono riportati sia i valori delle intensità relativi ad 1 klm, che quelli effettivi relativi al flusso luminoso emesso realmente dalla sorgente.

Per passare dagli uni agli altri si procede nel modo seguente.

Si indichi con η l'efficienza luminosa delle lampade installate.

$$\eta = 60 \text{ lm/W}$$

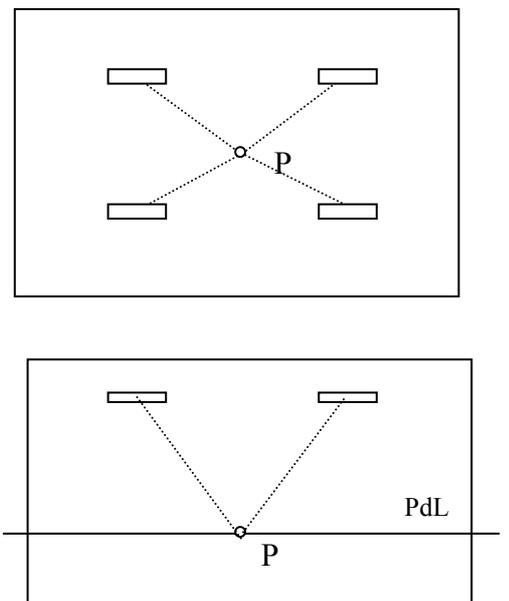
Ogni corpo illuminante emette un flusso luminoso pari a

$$\Phi = 2 \times 36 \times 60 = 4320 \text{ lm}$$

Per calcolare l'intensità effettivamente emessa da ciascuna sorgente si moltiplica il valore relativo ad 1 klm per il rapporto tra Φ e 1000 lm, cioè 4,32.

L'altezza di montaggio h dei corpi illuminanti sia pari a 2,2 m.

α (°)	I_{α} (cd/klm)	I_{α} (cd)
5	218.0	941.76
15	220.0	950.4
25	224.0	967.68
35	222.0	959.04
45	187.0	807.84
55	99.0	427.68
65	15.5	66.96
75	3.5	15.12
85	1.0	4.32
95	0	0
105	0	0
115	0	0
125	0	0
135	0	0
145	0	0
155	0	0
165	0	0
175	0	0



Ciascun corpo illuminante fornisce un contributo all'illuminamento diretto che può essere calcolato conoscendo la distribuzione delle intensità nel piano verticale passante per il punto e per il corpo illuminante considerato. Nel caso in esame viene fornita un'unica distribuzione di valori delle intensità, trattandosi di un corpo illuminante con solido fotometrico a simmetria sferica e quindi con la stessa curva fotometrica su qualsiasi piano di sezione considerato.

E' possibile costruire la seguente tabella che consente di calcolare l'andamento di E_d al variare di α e della distanza orizzontale a tra punto e sorgente.

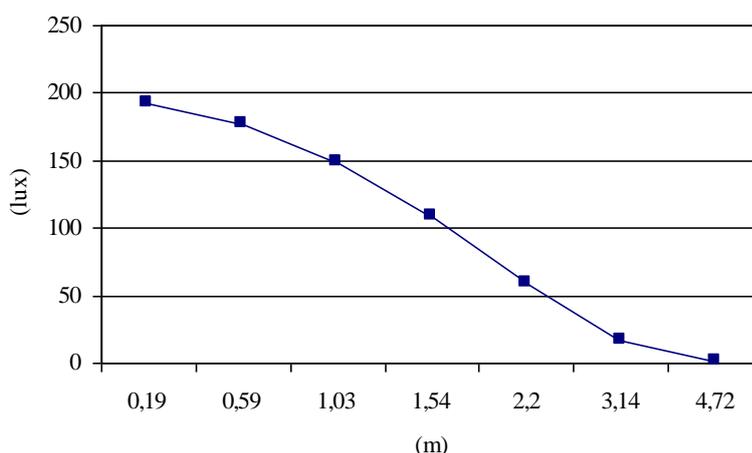
α	$\cos^3 \alpha$	$a = h \operatorname{tg} \alpha$ (m)	I_α (cd)	$E_d = (I_\alpha/h^2) \cos^3 \alpha$ (lux)
5	0.989	0.19	941.76	192.4
15	0.901	0.59	950.4	176.9
25	0.744	1.03	967.68	148.7
35	0.550	1.54	959.04	109.0
45	0.354	2.2	807.84	59.1
55	0.189	3.14	427.68	16.7
65	0.075	4.72	66.96	1.04
75	0.017	8.21	15.12	0.05
85	0.0007	25.14	4.32	0.00

Risulta evidente dalla tabella che i contributi all'illuminamento possono essere considerati non trascurabili per angoli di vista non superiori a 65° . Del resto a tali angoli corrispondono anche valori di a presumibilmente troppo elevati. Questo fattore è facilmente verificabile da un'analisi geometrica e dimensionale dell'ambiente.

Nel grafico seguente si illustra l'andamento degli illuminamenti diretti in funzione della distanza a . Da tale curva è possibile rilevare il contributo all'illuminamento nel punto P per qualsiasi corpo illuminante di cui sia nota la distanza a (rilevabile in pianta). Sommando i contributi dovuti a ciascun corpo illuminante si calcola l'illuminamento diretto totale nel punto P.

Se si considera un secondo punto dello stesso ambiente in cui si voglia calcolare l'illuminamento si utilizza la medesima curva con le stesse modalità. E' evidente la semplificazione del calcolo dovuta alla presenza di corpi dello stesso tipo.

Illuminamento diretto in funzione della distanza orizzontale



Il metodo punto a punto risulta molto utile nel caso in cui si voglia dimensionare un impianto di illuminazione localizzata in cui è necessario illuminare una superficie di piccole dimensioni. In questo caso, poiché di solito vengono utilizzati corpi illuminanti a fascio stretto posizionati a piccola distanza dal piano di lavoro, non esiste componente riflessa dell'illuminamento, ma soltanto componente diretta. Utilizzando la legge dell'inverso del quadrato della distanza è possibile, per una data sorgente di cui siano note le caratteristiche fotometriche, costruire un grafico che fornisce i valori degli illuminamenti

medio e massimo a distanze fisse dalla sorgente, per agevolare il calcolo di un eventuale impianto di illuminazione localizzata.

Allo stesso modo, il metodo punto a punto risulta molto utile per effettuare il dimensionamento di un impianto che debba realizzare illuminazione d'accento.

Determinazione della componente indiretta

In molti casi, per calcolare l'illuminamento in un punto del piano di lavoro, è necessario valutare, accanto alla componente diretta dell'illuminamento, quella indiretta determinata dal flusso luminoso che giunge sul piano di lavoro dopo aver subito una o più riflessioni da parte delle varie superfici dell'ambiente.

Ovviamente, ad ogni riflessione successiva corrisponde una attenuazione dell'energia luminosa trasportata ed in taluni casi, quando ad esempio la riflettività delle suddette superfici assume valori molto piccoli, tale contributo può considerarsi trascurabile. Al contrario esso risulta tanto più significativo quanto più riflettenti sono le superfici dell'ambiente.

Un primo metodo per la determinazione della componente riflessa dell'illuminamento presuppone che esso si distribuisca uniformemente sul piano di lavoro. Per questo motivo viene indicato col nome di "*Metodo dell'illuminamento indiretto medio*".

Tale ipotesi è naturalmente poco verosimile ma consente di effettuare una stima approssimata della componente riflessa tanto più attendibile quanto minore è il peso che essa esercita sull'illuminamento totale.

In questa ipotesi l'illuminamento indiretto realizzato nel generico punto P del piano di lavoro di area S da N corpi illuminanti installati nell'ambiente, ciascuno dei quali emetta un flusso luminoso complessivo pari a Φ , viene determinato mediante la:

$$E_{P,ind} = \frac{N \cdot \Phi}{S} \cdot \frac{\rho_m}{1 - \rho_m}$$

in cui ρ_m indica la riflettività media pesata di tutte le superfici del locale che contribuiscono a riflettere il flusso luminoso sul piano di lavoro e può essere determinata nel modo seguente:

$$\rho_m = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^N S_i}$$

essendo ρ_i la riflettività della *i*-esima superficie S_i dell'ambiente.

In alternativa a quello illustrato è possibile utilizzare un metodo per la determinazione della componente riflessa dell'illuminamento elaborato dalla I.E.S. che tiene conto della diversa distribuzione di tale contributo nei vari punti del piano di lavoro. Esso risulta pertanto più accurato e particolarmente adatto a locali di forma rettangolare o quadrata.

Nel metodo I.E.S. l'illuminamento riflesso nel punto P è dato dalla:

$$E_{P,ind} = N \cdot \Phi \cdot \frac{RRC}{S}$$

in cui viene indicata con S l'area del piano di lavoro (m²) e con RRC (Reflected Radiation Coefficient) il Coefficiente di Radiazione Riflessa.

Quest'ultimo viene determinato nel modo seguente:

$$RRC = L_{CW} + RPM(L_{CC} - L_{CW})$$

dove:

L_{CC}: Coefficiente di luminanza del soffitto;

L_{CW}: Coefficiente di luminanza delle pareti;

RPM: Moltiplicatore di posizione (Room Position Multiplier).

L_{CC} ed L_{CW} sono tabulati, analogamente al fattore di utilizzazione, in riferimento alle caratteristiche fotometriche del corpo illuminante scelto, alle riflettività delle pareti e del soffitto dell'ambiente ed al rapporto di cavità ambiente, mentre l'RPM tiene conto della posizione del punto sul piano di lavoro determinata mediante l'attribuzione di una coppia di coordinate alfanumeriche i cui riferimenti sono presi sugli assi di una griglia a maglie rettangolari costruita sulla pianta del locale.

Nota la coppia di coordinate che indicano la posizione del punto P sul piano di lavoro, si può determinare il fattore RPM relativo a tale posizione, utilizzando una opportuna tabella fornita dalla I. E. S.

ASPETTI QUALITATIVI DI UN IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE

Un buon impianto di illuminazione deve realizzare condizioni di benessere visivo per gli occupanti dell'ambiente in cui viene installato tenendo conto, oltre che degli aspetti quantitativi già esaminati, anche di alcune caratteristiche qualitative che concorrono al benessere degli utenti. Tra queste, in particolare, vanno considerate le seguenti:

Buon equilibrio tra le luminanze presenti;

Assenza di abbagliamento;

Idoneità delle caratteristiche cromatiche delle sorgenti al compito visivo.

E' ovvio che le esigenze qualitative dell'impianto di illuminazione dipendono dalla specificità dei compiti visivi che caratterizzano l'ambiente in cui è installato l'impianto stesso. Alcune situazioni comportano esigenze più raffinate di altre: altro è, ad esempio, la resa cromatica che devono avere le sorgenti installate in un interno destinato ad ufficio o a residenza, altro è quella propria di sorgenti preposte alla illuminazione di dipinti in mostra in una pinacoteca.

Equilibrio tra le luminanze ed abbagliamento

Di solito il compito visivo di un osservatore occupa solo una parte del suo campo visivo, che invece investe anche altre superfici o porzioni di superfici di contorno rispetto ad esso. L'occhio dell'osservatore si adatta pertanto ad un livello di luminanza medio tra quello del compito visivo e quello delle altre superfici presenti nel campo visivo che lo riguarda.

Il grado di adattamento dipende dalle luminanze in gioco, dalla loro posizione reciproca e dalle dimensioni di ciascuna di esse.

Le attività che prevedono lo svolgimento di un compito visivo costante nel tempo, come ad esempio la lettura di un libro, richiedono, ai fini del comfort visivo, un rapporto tra le luminanze del compito e dello sfondo compreso all'incirca tra 1/3 e 3. Al contrario, nel caso in cui l'osservatore sposta spesso lo sguardo modificando il campo visivo, come ad esempio nella battitura di un manoscritto, tale rapporto deve essere compreso tra 1/10 e 10.

E' molto importante inoltre, per una buona qualità dell'illuminazione, controllare adeguatamente la direzione di provenienza della luce, onde evitare che luminanze di livello elevato entrino nel campo visivo dell'osservatore creando contrasti eccessivi rispetto al compito principale. Queste possono essere relative sia a corpi illuminanti sia a superfici riflettenti, particolarmente rischiose se danno luogo a riflessioni speculari.

Quando il contrasto tra le luminanze risulta superiore a valori di riferimento, tollerabili dall'occhio umano senza particolari disagi, si può verificare il noto fenomeno dell'abbagliamento visivo, che consiste in un significativo disagio visivo originato proprio da un eccessivo contrasto tra le luminanze che compaiono nel campo visivo dell'osservatore. Tale fenomeno si può verificare con diversi livelli di intensità, originando, a seconda dei casi, una condizione di *abbagliamento disturbante* o *debilitante*. Nel primo caso il grado di discomfort è tale da originare un disturbo nella percezione visiva causato dal fatto che i sensori (coni e bastoncelli) responsabili del fenomeno della visione, essendo sensibili all'energia luminosa trasportata dal fascio di luce incidente, sono sollecitati da messaggi visivi con contenuto energetico diverso e devono adattare la loro risposta contemporaneamente a due stimoli diversi. Nel secondo caso il grado di discomfort è più elevato e provoca la momentanea perdita delle capacità visive. Infatti l'energia proveniente dalla superficie di più elevata luminanza è talmente in contrasto con quella della superficie più in ombra che l'adattamento del ricettore a questo elevato contenuto energetico impedisce di percepire il messaggio meno luminoso.

Tipico esempio di abbagliamento disturbante è quello provocato dai fari "abbaglianti" di una autovettura sugli occhi di un automobilista che percorre la stessa strada in verso opposto, quando lo sfondo del compito è oscuro (regime notturno); le medesime sorgenti non provocano invece alcun disagio se intercettate dall'occhio di un osservatore in regime diurno quando la luminanza dello sfondo del compito è confrontabile a quella dei fari considerati.

Il fenomeno dell'abbagliamento si verifica anche quando la percezione delle due luminanze diverse avviene non contemporaneamente ma in rapida sequenza una dopo l'altra. Tale situazione si verifica ad esempio quando apriamo una finestra in un ambiente scuro lasciando che le intense radiazioni solari di una giornata estiva investano gli occhi di una persona appena svegliatasi da un sonno profondo. E' questo un tipico esempio di abbagliamento debilitante.

L'abbagliamento può essere generato sia da corpi illuminanti ad elevata luminanza (abbagliamento diretto) che da superfici lucide fortemente riflettenti (abbagliamento riflesso).

Tra i vari metodi utilizzabili per determinare l'esistenza e l'intensità del fenomeno di abbagliamento, prendiamo in considerazione il metodo C.I.E. delle "Curve di luminanza" proposto anche dalla UNI 10380, che si articola nei seguenti passaggi:

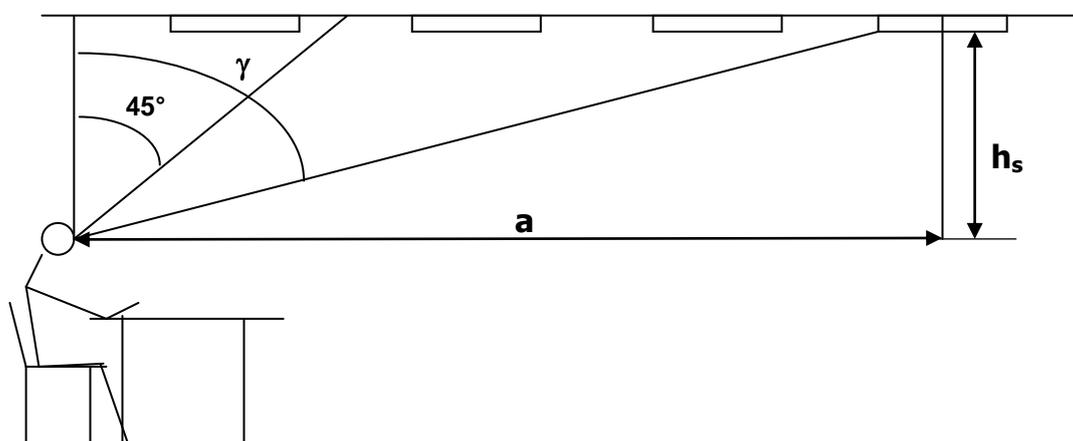
1. Definizione della classe di qualità dell'impianto di illuminazione;
2. Determinazione della curva di luminanza dell'apparecchio considerato;
3. Confronto con la curva di luminanza di riferimento scelta in funzione della classe di qualità suddetta e del livello di illuminamento realizzato nell'ambiente.

La seguente tabella 22 consente di determinare la classe di qualità dell'impianto relativamente al compito visivo svolto.

Tabella 22 classe di qualità dell'impianto di illuminazione in funzione del compito visivo svolto.

Classe di qualità ai fini della limitazione dell'abbagliamento	Compito visivo
A	Molto difficoltoso
B	Con prestazioni visive elevate
C	Con prestazioni visive normali
D	Con prestazioni visive modeste
E	Con prestazioni visive elevate in assenza di una posizione di lavoro precisa (occupanti mobili)

Figura 22: Definizione dell'angolo di irraggiamento



Con riferimento alla Figura 22, per una data posizione reciproca tra sorgente ed osservatore, si definisce angolo di irraggiamento il seguente:

$$\gamma = \arctg \frac{a}{h_s}$$

Tale angolo definisce i limiti del campo visivo dell'osservatore ed è da considerarsi a rischio quando è compreso tra 45° e 85°.

In Figura 23 sono riportate le curve di luminanza di riferimento del tipo A, utilizzabili per apparecchi senza bordi laterali luminosi (sono considerati tali anche quelli con bordi laterali luminosi di altezza minore di 30 mm), o con bordi laterali luminosi paralleli alla direzione di osservazione; nella Figura 24 sono invece riportate le curve di luminanza di tipo B, utilizzabili per apparecchi con bordi laterali luminosi esclusi quelli con bordi laterali luminosi paralleli alla direzione di osservazione.

Figura 23: Curve di luminanza tipo A

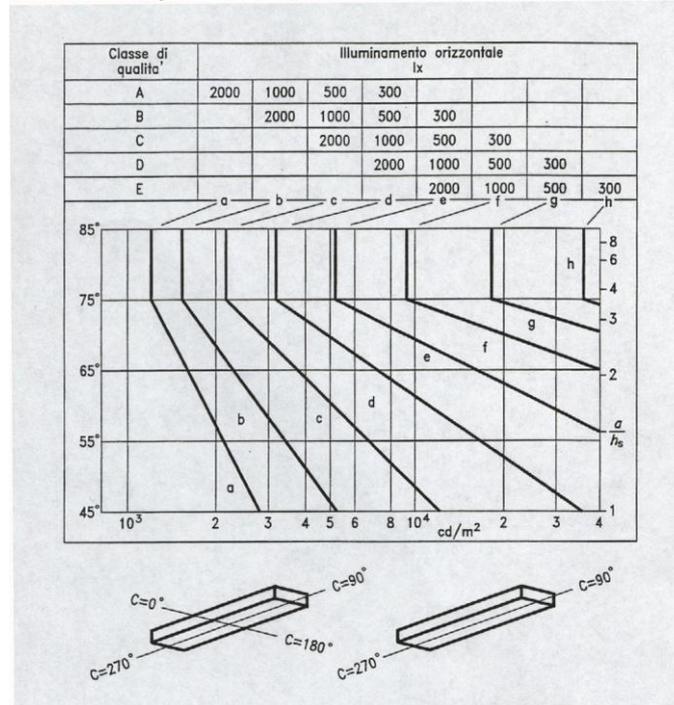
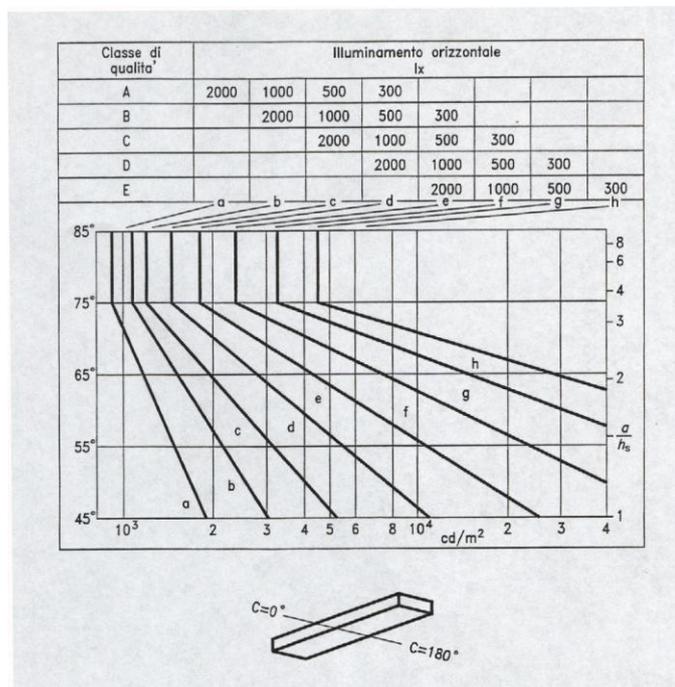


Figura 24: Curve di luminanza tipo B



Tali curve vengono utilizzate per determinare l'esistenza o meno del fenomeno di abbagliamento provocato eventualmente da corpi illuminanti. Il metodo prevede il calcolo della luminanza del corpo illuminante considerato secondo gli angoli di osservazione che vanno da 45° ad 85° ed il confronto con una delle curve di riferimento selezionate in base alla classe di qualità dell'impianto e all'illuminamento realizzato nell'ambiente.

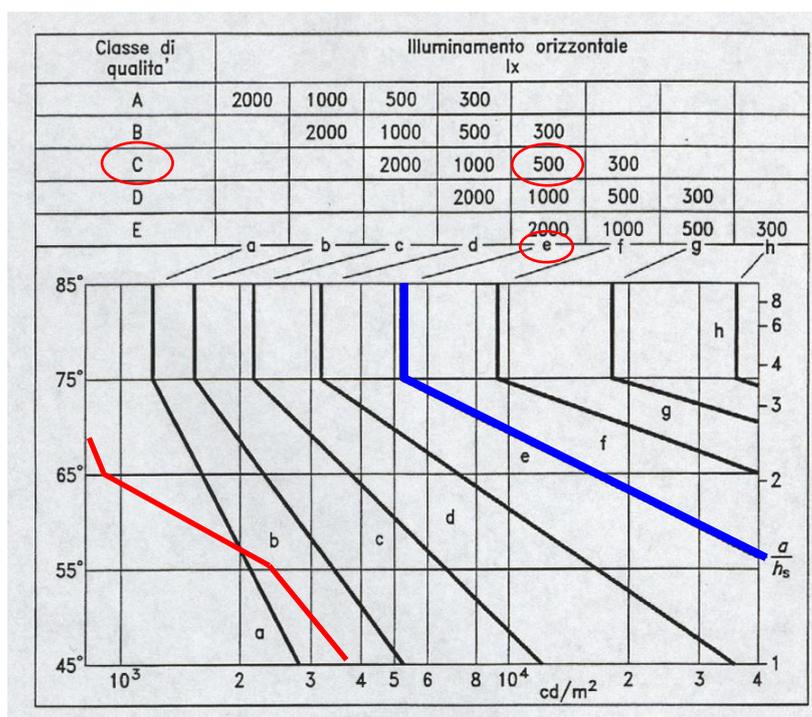
A titolo di esempio consideriamo il corpo illuminante già utilizzato nel paragrafo precedente, i cui dati di intensità luminosa per angoli compresi tra 45° e 85° sono i seguenti:

α (°)	I_{α} (cd/klm)	I_{α} (cd)
45	187.0	807.84
55	99.0	427.68
65	15.5	66.96
75	3.5	15.12
85	1.0	4.32

Supponendo che il corpo illuminante preso in considerazione abbia una superficie di 0,3 m², si hanno i seguenti valori di luminanza:

α (°)	I_{α} (cd/klm)	I_{α} (cd)	S(m ²)	L_{α} (cd/m ²)
45	187.0	807.84	0,3	3808,19
55	99.0	427.68	0,3	2485,46
65	15.5	66.96	0,3	528,14
75	3.5	15.12	0,3	8,16
85	1.0	4.32	0,3	7,22

Nella figura seguente (curve di riferimento tipo A) viene effettuato il confronto tra la curva e, selezionata in base alla classe di qualità (C: compito visivo con prestazioni normali), all'illuminamento su superficie orizzontale (500 lux) e la curva di luminanza del corpo illuminante ottenuta riportando sul diagramma i valori calcolati della luminanza ai vari angoli di vista.



Risulta evidente che la curva di luminanza del corpo illuminante è tutta a sinistra di quella di riferimento, per cui questa installazione non genera alcun rischio di abbagliamento nell'ambiente considerato. Il corpo illuminante scelto è, infatti, caratterizzato da valori bassi

di luminanza (solitamente sono così i corpi illuminanti con sorgenti fluorescenti lineari) e potrebbe creare qualche fastidio solo per una classe A con illuminamento 2000 lux (curva a), tra 45 e poco meno di 60°.

Nel caso un corpo illuminante produca fenomeni di abbagliamento, è possibile ridurre la luminanza utilizzando appositi accessori (lamelle schermanti perpendicolari alla direzione prevalente di vista, a nido d'ape, etc.) che le stesse ditte produttrici propongono, oppure diminuendo la potenza installata in ciascun corpo illuminante. Quest'ultima soluzione può essere utilizzata se si prevede un maggior numero di corpi illuminanti con una potenza installata inferiore per produrre lo stesso illuminamento sul piano di lavoro.

Idoneità delle caratteristiche cromatiche delle sorgenti al compito visivo

Le sorgenti luminose installate in un ambiente devono avere opportune caratteristiche cromatiche che le rendano idonee al particolare compito visivo cui è destinato l'ambiente in cui sono posizionate.

Come già accennato nel capitolo riguardante le sorgenti luminose, va innanzitutto selezionata la temperatura di colore delle sorgenti, che è il parametro che determina la sensazione di luce calda, fredda o neutra.

In particolare, una temperatura di colore inferiore a 3300 K è sinonimo di una luce bianco-calda, mentre se è superiore a 5300 K la sorgente produce una luce bianco-fredda. E' da considerarsi bianco-neutra invece una luce in cui la sorgente abbia una temperatura di colore intermedia tra i due valori indicati.

La luce bianco calda è più ricca di toni giallo/rossi e si addice ad interni residenziali, quali civili abitazioni, pensioni, alberghi, case per vacanze etc. o ad ambienti destinati ad attività per le quali è richiesta una atmosfera accogliente e stimolante.

La luce bianco fredda è più ricca di toni blue/verdi e si addice ad interni o esterni destinati ad attività per le quali è richiesta una atmosfera riposante o per attività di precisione o con maggiori esigenze cromatiche.

In alcune applicazioni riveste particolare importanza anche un'altra caratteristica cromatica della sorgente, definita dal suo *Indice di resa Cromatica*, che rappresenta, come già definito nel capitolo riguardante le sorgenti luminose, la fedeltà, espressa in termini percentuali, con cui è percepito il colore di una superficie illuminata dalla sorgente in oggetto rispetto alla percezione della medesima superficie quando è illuminata da una sorgente di riferimento.

La resa cromatica di una sorgente è importante quando la percezione del colore dell'oggetto illuminato è essenziale alla definizione delle condizioni di benessere visivo (es. percezione visiva di opere d'arte).

In questo caso vanno privilegiate sorgenti ad elevato R_a (classi 1A ed 1B), cioè ad incandescenza, alogene, fluorescenti pentafosfori.

Negli interni comuni valori accettabili di R_a (60÷90) si ottengono, oltre che con lampade ad incandescenza, anche con lampade a scarica del tipo fluorescenti trifosfori o ad alogenuri.

In alcune applicazioni (es: *illuminazione di strade a scorrimento veloce*) si preferiscono sorgenti a basso R_a (classi 3 e 4), ma con elevatissima efficienza luminosa per ovvie ragioni di risparmio energetico (es: lampade al sodio a bassa pressione).

LA LUCE NATURALE

La luce naturale è da considerarsi un elemento di fondamentale importanza nella progettazione architettonica per gli aspetti che coinvolge: percezione spaziale degli ambienti, sensazione del trascorrere del tempo secondo il ciclo diurno (ritmo circadiano), benessere visivo degli occupanti degli ambienti realizzati, risparmio energetico, compatibilità ambientale, sostenibilità.

Le condizioni di benessere ambientale sono fortemente influenzate dalla presenza di luce naturale all'interno dei locali occupati. Vari lavori scientifici hanno dimostrato che le attività lavorative vengono svolte con maggior profitto e con più elevata efficienza in ambienti in cui sono presenti sorgenti di luce naturale, piuttosto che in luoghi che ne siano privi, ma anche la sola permanenza degli individui in uno spazio chiuso è più confortevole se questo risulta illuminato con luce naturale. La percezione dello scorrere del tempo, legata alle diverse condizioni di illuminazione che si verificano all'interno degli ambienti nelle varie ore del giorno, è infatti un fattore di fondamentale importanza per la condizione psicologica dell'individuo. Erroneamente si pensa che l'assenza di luce naturale possa essere compensata da un buon impianto di illuminazione artificiale. Sostanziali sono infatti le differenze tra i due tipi di illuminazione e non sempre un livello di illuminamento più elevato (ottenibile con un impianto di luce artificiale) garantisce un grado superiore di comfort.

La luce naturale proviene dall'esterno dell'edificio, dal sole e dalla volta celeste. Per l'esattezza, l'unica vera sorgente di luce naturale è da considerarsi il sole, ma è possibile separare il contributo proveniente direttamente da esso (componente diretta) da quello che giunge sull'edificio solo dopo essere stato opportunamente filtrato dagli strati d'aria e altri gas, pulviscolo, sostanze inquinanti che costituiscono l'atmosfera che ci circonda (componente diffusa). Questa seconda parte della energia raggiante che giunge sull'edificio la si considera come originata da una sorgente estesa detta "volta celeste".

Anche quando la componente diretta della luce naturale è assente, a causa, ad esempio, di condizioni climatiche avverse (cielo coperto) o della particolare esposizione della superficie irraggiata che non presenta interfaccia diretta con il sole (Nord, oppure altro orientamento in fasce orarie non interessate da irraggiamento diretto), la componente diffusa è sempre presente.

La componente diretta della luce naturale ha una direzione di provenienza ben precisa, determinabile una volta nota la posizione del sole nel cielo (coordinate solari), mentre quella diffusa, per sua stessa natura, non ha una direzione specifica di provenienza ma interessa tutte le direzioni spaziali. Questa differenziazione ha notevoli conseguenze sull'interazione tra la luce e l'edificio, poiché mentre la componente diretta è intercettabile, quindi schermabile, quella diffusa no, se non integralmente. D'altra parte, le caratteristiche architettoniche di un edificio, quali la forma, l'orientamento, le dimensioni e la collocazione delle superfici vetrate, condizionano la quantità di luce naturale disponibile all'interno e la sua distribuzione spaziale.

Altra caratteristica peculiare della luce naturale è la sua variabilità temporale, per cui non è prevedibile il flusso luminoso che entra in un edificio attraverso le aperture poiché esso può variare in funzione di cambiamenti climatici più o meno repentini, del passaggio di nubi temporanee, delle condizioni ambientali esterne che sono sempre sottoposte ad un regime variabile. Questo rende poco prevedibile il flusso luminoso entrante attraverso le finestre e non definibile univocamente la disponibilità di luce naturale all'interno di un edificio.

IL SOLE

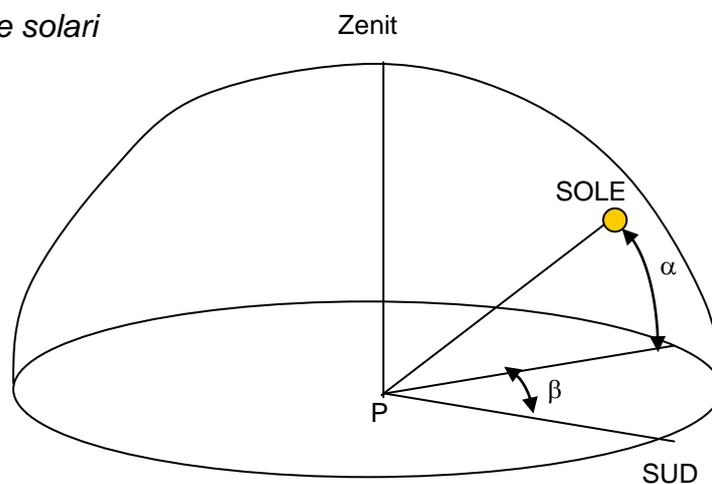
Il contributo diretto all'illuminamento su una data superficie dipende dalla posizione istantanea del sole, che è considerato una sorgente puntiforme vista l'enorme distanza dalla terra, e dall'intensità della radiazione emessa. La posizione del sole sulla volta celeste è definita dalle coordinate solari: *azimut* ed *altezza*.

Con riferimento alla figura 1, definiamo:

Azimut: coordinata angolare presa sul piano orizzontale passante per il punto considerato individuata dalla direzione Sud e dalla traccia su tale piano del piano contenente il punto P ed il sole;

Altezza : coordinata angolare presa sul piano verticale contenente il punto P ed il sole, individuata dalla congiungente sole-punto P e dalla traccia sul piano orizzontale del piano verticale suddetto

Figura 25: Coordinate solari



Altezza α e Azimut β permettono di determinare la posizione istantanea del sole per un dato punto P sulla terra in un dato giorno e ad una data ora. Sono reperibili da opportune tabelle o, in alternativa, calcolabili mediante le due formule indicate, in funzione della declinazione dell'asse terrestre (D), della latitudine del sito (L) dell'angolo orario (U) espresso in gradi.

$$\alpha = \arcsen(\sen L \cdot \sen D + \cos L \cdot \cos U)$$

$$\beta = \arcsen(\cos D \cdot \sen U + \cos \alpha)$$

Declinazione D ed Angolo orario U sono a loro volta esprimibili in funzione del giorno giuliano (J), che vale 1 per il primo gennaio e 365 per il 31 dicembre, e dell'ora del giorno (h) compresa tra 0 e 24, secondo le formule seguenti:

$$D = 23,45 \cdot \sen \left[\frac{360}{368} \cdot (J + 284) \right]$$

$$U = 15 \cdot (12 - h)$$

La distribuzione spettrale dell'energia raggiante emessa dal sole al di fuori dell'atmosfera è simile a quella di un corpo nero a circa 6000 K

Polveri, spore, gocce in sospensione nell'atmosfera operano una azione di filtro in grado di attenuare l'intensità della radiazione incidente sulla superficie terrestre e di tagliare le radiazioni al di sotto dei 300 e al di sopra dei 3000 nm

L'intensità delle radiazioni rilevabili al suolo e la loro distribuzione spettrale dipende dunque dalle condizioni igrometriche, dalla presenza di polveri e dallo spessore dell'atmosfera attraversata, che è a sua volta funzione dell'altezza del sole sull'orizzonte.

LA VOLTA CELESTE

La sorgente di luce diffusa, denominata volta celeste, è piuttosto complessa da schematizzare, poiché, come già accennato, essa è caratterizzata da una distribuzione non uniforme della luminanza, che varia, nelle varie porzioni di superficie, anche in senso temporale in funzione di eventi climatici accidentali o consolidati, quali presenza di nubi, significativi strati di umidità, grado di inquinamento, etc.

La volta celeste può essere considerata solo in prima approssimazione una superficie lambertiana, in quanto la sua luminanza è variabile in funzione della posizione del sole sulla volta celeste: l'area della volta celeste intorno alla posizione del sole ha luminanza maggiore della restante parte della stessa, per cui, anche in assenza di componente diretta, le varie porzioni di volta celeste che contribuiscono all'ingresso di luce naturale all'interno di un edificio danno diverso contributo in funzione della posizione reciproca tra superficie irraggiata e specchio di cielo da essa inquadrato.

Sono stati approntati dei modelli di luminanza della volta celeste in riferimento ad alcune condizioni di luminanza standard che rispondono a situazioni definibili di riferimento ma che non hanno una precisa corrispondenza con situazioni reali. Queste ultime, infatti, non sono prevedibili e solo in prima approssimazione possono essere ricondotte a quelle definite da uno dei modelli descritti. Di seguito vengono date le caratteristiche fondamentali dei modelli di cielo codificati a livello internazionale.

Cielo Coperto

Esistono due modelli di cielo coperto, accomunati dalla caratteristica di definire un tipo di cielo che prevede uno strato di nubi sufficiente a rendere impossibile la percezione della posizione occupata dal sole sulla volta celeste.

Il primo, detto *Cielo Coperto Uniforme (Uniform Overcast sky)* prevede una luminanza uniforme dell'intera volta celeste ed è riconducibile alla condizione ambientale esterna tipica di un'atmosfera industriale ad elevato grado di inquinamento oppure a condizioni di elevata umidità (foschia, nebbia) tipiche di alcune zone del nostro paese (Pianura Padana). Questo tipo di cielo può essere considerato una superficie lambertiana in cui la luminanza di qualsiasi punto L_p coincide con quella zenitale L_z .

Il secondo invece, denominato *Cielo Coperto Standard CIE (CIE Standard Overcast Sky)* prevede una luminanza crescente dall'orizzonte allo zenit ed è tipico di alcune località montane con atmosfera invernale limpida e secca. Esso è descritto dall'equazione di Moon e Spencer e adottata ufficialmente dalla CIE³⁶:

³⁶ Commission International de l'Eclairage

$$L_p = L_z \cdot \frac{(1 + 2 \cdot \text{sen} \alpha)}{3}$$

essendo α l'altezza del sole, L_p ed L_z , rispettivamente, la luminanza del punto considerato sulla volta celeste ed allo zenit.

Le curve isoluminanza di questo modello di cielo sono circolari con centro nello zenit, prevedono un valore costante nel tempo del rapporto $\frac{L_p}{L_z}$, mentre i valori assoluti della

luminanza puntuale variano nel tempo in funzione di quella zenitale che a sua volta dipende, istante per istante, dalla posizione del sole.

Con le ipotesi di cielo coperto si realizzano valori piuttosto bassi dell'illuminamento esterno su un piano orizzontale non schermato, compresi mediamente tra 5000 e 7000 lux.

Cielo Sereno

La distribuzione delle luminanze tipica di un cielo sereno è variabile nel tempo poiché

legata alla posizione del sole sulla volta celeste. La luminanza di un punto P dipende dalla distanza angolare di P dal sole e dallo zenit e dall'altezza del sole sull'orizzonte. Le espressioni analitiche delle curve isoluminanza sono molto complesse e la CIE ha adottato, per descrivere questo tipo di cielo, un modello semplificato proposto da Kittler:

$$L_p = L_z \cdot \frac{(1 - e^{(-0,32/\text{sen} \alpha)}) \cdot (0,91 + 10 \cdot e^{-3 \cdot \gamma} + 0,45 \cdot \cos^2 \gamma)}{0,274 \cdot (0,91 + 10 \cdot e^{-3 \cdot \alpha_z} + 0,45 \cdot \cos^2 \alpha_z)}$$

essendo:

γ : distanza angolare tra il punto P ed il sole;

α_z : angolo zenitale del sole (complementare di α)

Anche in questo caso i valori assoluti della luminanza variano nel tempo in funzione della luminanza dello zenit che è, a sua volta, funzione della altezza del sole.

Cielo Nuvoloso o Intermedio

Il cielo intermedio definisce una condizione di luminanza per l'appunto *intermedia* tra quelle relative al cielo coperto ed a quello sereno.

Un modello di cielo intermedio non è stato ancora codificato dalla CIE, mentre la IES³⁷ propone il modello descritto da W. Pierpoint, che usa una equazione simile a quella di Kittler per il cielo sereno con valori diversi dei coefficienti che tengono conto di fenomeni di assorbimento e diffusione più intensi da parte dell'atmosfera:

³⁷ Illuminating Engineering Society

$$L_P = L_Z \cdot \frac{(1 - e^{(-0,80/\text{sen}\alpha)}) \cdot (0,526 + 5 \cdot e^{-1,5\gamma})}{(0,526 + 5 \cdot e^{-1,5\alpha_z}) \cdot (1 - e^{-0,80})}$$

Come già indicato, in tutti e tre i modelli descritti, la luminanza dello zenit dipende dalla posizione di sole sulla volta celeste, in particolare dalla sua altezza. Di seguito vengono riportate delle relazioni proposte dalla CIE per esprimere questa dipendenza in ciascuno dei tre casi considerati:

Cielo coperto:

$$L_z = 123 + 8600 \cdot \text{sen}\alpha$$

Cielo sereno:

$$L_z = A + B \cdot (\text{tg}\alpha)^C$$

con A=100; B=600; C=1,10

Cielo intermedio:

$$L_z = A + B \cdot (\text{tg}\alpha)^C$$

con A=100; B=5290; C=1,19

ILLUMINAMENTO DA LUCE NATURALE

Gli effetti che la luce naturale produce all'interno degli ambienti dipendono dalle caratteristiche della sorgente e dalla posizione scelta sul piano di lavoro. Sono da considerarsi sorgenti di luce naturale tutte le aperture o le superfici almeno in parte trasparenti che mettono in comunicazione visiva l'ambiente considerato con l'esterno. Queste sono in realtà sorgenti indirette di luce naturale poiché permettono l'ingresso in ambiente di radiazioni dirette o diffuse provenienti dal sole o dalla volta celeste. Come già sottolineato, l'unica sorgente di luce naturale è il sole, la volta celeste è una sorgente indiretta e le finestre, i lucernari, i sistemi di trasporto o altre tecnologie in grado di far penetrare negli ambienti interni la luce diurna costituiscono delle sorgenti nel senso che sono l'interfaccia diretta dell'ambiente con l'esterno.

La luce naturale ha caratteristiche dinamiche, data la variabilità temporale della luminanza della porzione di cielo inquadrata dalla apertura considerata che costituisce la sorgente. E' infatti questa porzione di volta celeste l'origine della luce che, attraversando la superficie trasparente, penetra negli ambienti illuminati. In funzione dell'orientamento della parete su cui è praticata l'apertura, in alcune ore della giornata, tale porzione di

superficie è occupata dal sole, di conseguenza la sua luminanza è elevata e la superficie illuminata sarà interessata da radiazione diretta oltre che diffusa; in altre ore della giornata tale luminanza risulta invece di livello inferiore. La variabilità temporale e spaziale della luminanza delle varie porzioni di volta celeste determina dunque una disponibilità di luce diurna negli ambienti variabile nel tempo e nello spazio. E' dunque difficile determinare l'efficienza di una sorgente naturale, in analogia con quanto si fa con le sorgenti artificiali. Con queste infatti si ha una disponibilità di flusso luminoso costante nel tempo e secondo una distribuzione spaziale prevedibile in funzione della curva fotometrica, mentre nel caso di luce diurna non è possibile definire né la distribuzione spaziale del flusso luminoso entrante, né come varia nel tempo l'illuminamento prodotto nelle varie posizioni sul piano di lavoro.

Per questo motivo è sorta la necessità di introdurre alcune grandezze che permettano di prevedere la disponibilità di luce naturale all'interno degli ambienti in condizioni standardizzate, che non rispondono a situazioni reali ma a modelli di cielo ideali con caratteristiche standard. In questo modo è possibile dare alle grandezze che consentono di definire l'illuminamento interno la caratteristica di ripetitività che altrimenti non avrebbero.

In queste ipotesi definiamo il Daylighting Factor o Fattore di Luce Diurna DF nel modo seguente:

$$DF = \frac{E_i}{E_e}$$

essendo E_i l'illuminamento interno in un punto dell'ambiente preso sul piano di lavoro e generato dalla sorgente di luce diurna (finestra, lucernario...) ed E_e l'illuminamento esterno misurato su una superficie orizzontale liberamente esposta alla luce proveniente dalla volta celeste in assenza di radiazioni dirette provenienti dal sole. Il fattore di luce diurna è dunque definito solo nelle condizioni di cielo coperto CIE o uniforme.

Il rapporto tra l'illuminamento interno e quello esterno calcolato in una condizione di cielo sereno, quindi in presenza di radiazioni solari dirette, può costituire un parametro fuorviante nella valutazione della efficienza di una sorgente di luce diurna. Un esempio tipico che permette la comprensione di tale concetto è il seguente:

Una finestra esposta ad est è meglio irraggiata nelle prime ore della giornata quando il sole, appena sorto, è basso rispetto all'orizzonte e produce radiazioni dirette di bassa intensità. In queste condizioni il rapporto $\frac{E_i}{E_e}$ risulta elevato per via del valore piccolo del

denominatore. Nelle ore centrali della giornata l'illuminamento esterno su superficie orizzontale tenderà a crescere a causa della posizione del sole più alta sull'orizzonte e della maggiore intensità delle radiazioni dirette, ma il rapporto suddetto non seguirà lo stesso andamento anzi sarà caratterizzato da un valore più basso pur essendo probabilmente aumentato l'illuminamento interno da luce naturale. Dunque tale parametro non risulta in questo caso indicativo della disponibilità di luce naturale nell'ambiente dovuta alla finestra quindi dell'efficienza della finestra stessa, ma anzi dà un'indicazione erronea delle sue prestazioni.

In definitiva l'analisi dell'efficienza delle sorgenti di luce diurna può essere effettuata mediante la valutazione del DF ma questo va, a rigore, calcolato solo nella configurazione di cielo coperto.

Possiamo considerare il DF composto da tre termini secondo la seguente espressione:

$$DF = SC + CRI + CRE$$

dove:

SC: componente cielo (sky component)

CRI: componente di riflessione interna

CRE: componente di riflessione esterna

Il primo termine indica il contributo al fattore di luce diurna dovuto alla luce che perviene nella posizione considerata sul piano di lavoro direttamente dalla sorgente (finestra, lucernario...); il secondo indica invece il contributo dovuto alle riflessioni delle superfici interne dell'ambiente e l'ultimo quello dovuto alle riflessioni esterne, di tutte cioè le superfici riflettenti poste all'esterno (altri edifici e quant'altro) che con le loro riflessioni partecipano alla determinazione dell'illuminamento interno da luce diurna.

Poiché il DF varia da punto a punto sul piano di lavoro dentro l'ambiente, per dare un giudizio sulle condizioni di illuminazione diurna in un locale si può far riferimento al fattore medio di luce diurna definito come

$$DF_m = \frac{(E_i)_m}{(E_e)_m}$$

Essendo $(E_i)_m$ la media dei valori di illuminamento rilevati all'interno secondo le indicazioni della Norma UNI 10380 ed $(E_e)_m$ la media dei valori di illuminamento esterno rilevati durante le misurazioni.

La determinazione del fattore di luce diurna può essere effettuata con vari metodi manuali grafici o tabellari, per i quali si rimanda ai testi consigliati in bibliografia. Ciascuno di essi consente di determinare in maniera distinta ciascuna delle tre componenti indicate e di ottenere il DF per sovrapposizione di effetti.

Oggi sono molto utilizzati metodi numerici per la valutazione dell'illuminamento da luce naturale, tra cui ricordiamo Radiance, Ecotect, Energy-plus, per citare solo i più accreditati. Essi si basano di solito sugli algoritmi del Ray-tracing e del Radiosity, che consentono di ottenere, oltre che valori numerici dell'illuminamento con vari tipi di cielo e del DF con il cielo coperto, anche immagini fotorealistiche degli ambienti illuminati che danno la sensazione visiva degli effetti ottenuti nelle varie situazioni considerate.