



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Studio delle caratteristiche di impianti di illuminazione stradale per
valutare i consumi energetici e luce dispersa verso l'alto

Paolo Soardo



ASSOCIAZIONE ITALIANA DI ILLUMINAZIONE
LA CULTURA DELLA LUCE - THE CULTURE OF LIGHT

TITOLO: STUDIO DELLE CARATTERISTICHE DI IMPIANTI DI ILLUMINAZIONE STRADALE PER VALUTARE I CONSUMI ENERGETICI E LUCE DISPERSA VERSO L'ALTO

Autori: Paolo Soardo, AIDI

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Usi finali

Tema: 5.4.3.2 Tecnologie per il risparmio energetico nell'illuminazione pubblica

Responsabile Tema: Simonetta Fumagalli, ENEA

Contratto ENEA AIDI

Studio delle caratteristiche di impianti di illuminazione stradale per valutare i consumi energetici e luce dispersa verso l'alto

Rapporto dell'attività svolta da AIDI al 22 settembre 2010

0 Introduzione

L'attività è stata svolta in collaborazione con ENEA e INRIM come previsto nel contratto.

Il presente rapporto è riferito alle voci di responsabilità di AIDI, totale o condivisa con ENEA e INRIM, come riportato nella tabella 1 allegata al contratto

1 Definizione dettagliata del programma di attività e dei tempi esecutivi

E' stata completata la prima parte del programma di ricerca in attesa della consegna degli apparecchi di illuminazione da parte dei costruttori.

3 Stato attuale delle conoscenze e dei vincoli legislativi

3.1 Quadro della situazione attuale

I risultati delle ricerche nel settore della compatibilità energetica ed ambientale degli impianti di illuminazione esterna, degli ultimi 40 anni, riportati nella bibliografia sono attualmente in discussione presso la CIE nell'ambito della revisione della pubblicazione 126.

In conformità a queste ricerche sono state emesse norme nazionali ed internazionali ed alcune direttive europee con l'obiettivo di ridurre i consumi energetici e di ridurre l'emissione e la riflessione di luce verso zone ad esse non destinate , in particolare verso il cielo.

Le leggi emesse da molte regioni italiane, in particolare quelle che si riferiscono alla LR della Regione Lombardia, non sono invece conformi ai risultati delle ricerche e non rispettano gli obiettivi energetici ed ambientali dichiarati nei loro scopi.

L'esame di questi documenti, e delle ricerche effettuate dall'INRIM, è utile per inquadrare gli obiettivi della presente ricerca.

La maggior parte degli impianti di illuminazione stradale riguarda le strade con traffico motorizzato e si trova nelle città. Risulta quindi conveniente iniziare questa analisi dall'ambiente cittadino per valutare consumi energetici e compatibilità ambientale.

3.2 Sicurezza degli utenti della strada

La sicurezza degli utenti della strada ha priorità assoluta rispetto ai criteri di compatibilità energetica ed ambientale, è garantita dalla conformità alle norme ed in particolare alle norme UNI 11248 e UNI EN 13201-2, -3, -4, nonché alle norme UNI EN 12899 relative alla segnaletica verticale, sussidiaria all'illuminazione.

3.3 Luminanza artificiale del cielo

Secondo l'esperienza degli astronomi, la luminanza artificiale del cielo è dovuta al flusso luminoso emesso dagli apparecchi di illuminazione riflesso dalle superfici illuminate con elevazione tra 0° e 20° rispetto al piano orizzontale. Con questa elevazione la luce viene diffusa verso il basso dagli aerosol presenti nei bassi strati dell'atmosfera riducendo il contrasto dei corpi celesti, con elevazioni superiori la minore diffusione da parte delle molecole dell'atmosfera riduce gli ostacoli per l'astronomia.

Nel seguito l'analisi delle emissioni e delle riflessioni sarà limitata alle elevazioni tra 0° e 20° .

3.4 Emissioni e riflessioni di un impianto di illuminazione stradale

Il modello di calcolo di emissioni e riflessioni con elevazioni 0° - 20° , corrispondenti a $90^\circ \leq \gamma \leq 110^\circ$ nel sistema di coordinate (C, γ) della CIE, si rifà alla figura 3.1.

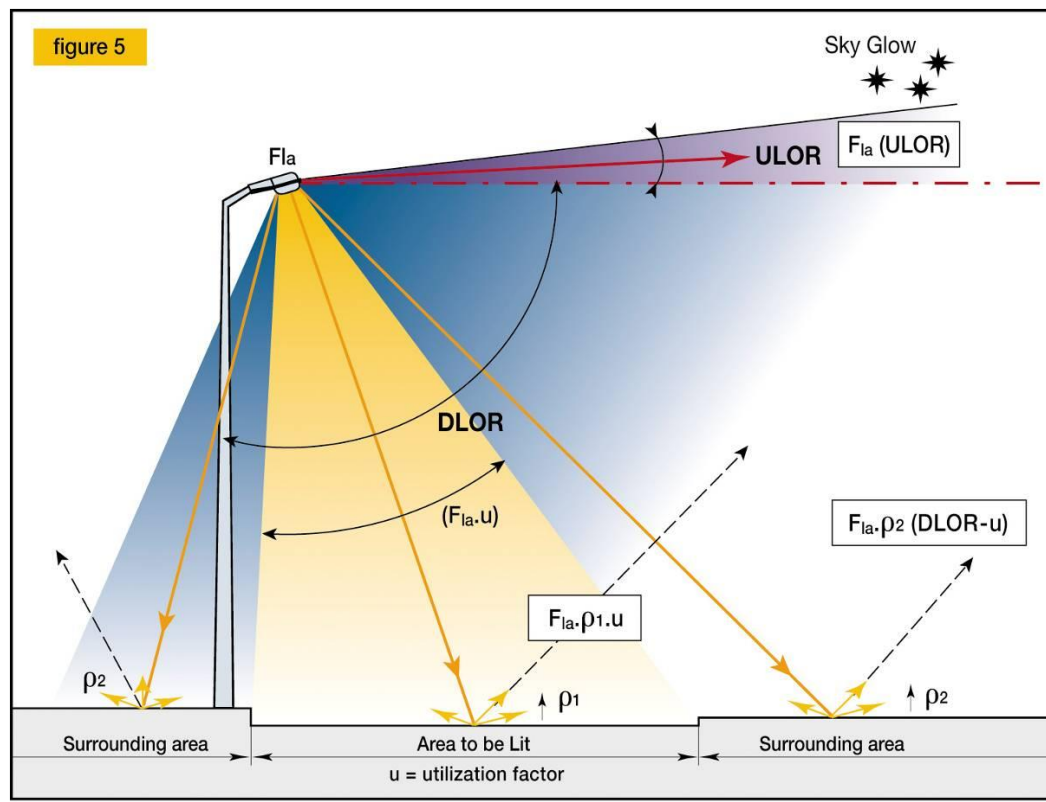


Figura 3.1 Flusso luminoso emesso e riflesso da un impianto stradale

Le grandezze ed i simboli usati nei calcoli sono riportati in tabella 3.1.

Tabella 3.1 – Grandezze e simboli	
Variabile	Simbolo
Flusso luminoso lampade (flusso installato)	Φ_L
Flusso luminoso globale emesso	Φ_G
Rapporto di emissione superiore	ULOR [%]
Rapporto di emissione inferiore:	DLOR [%]
Fattore di utilizzazione:	u [%]
Angolo di elevazione sul piano orizzontale	φ
Ripartizione dell'intensità luminosa	$I(\varphi)$
Area delle superfici da illuminare	S [m ²]
Fattore di riflessione di una città diffondente	ρ [%]
Fattore di riflessione medio di aree illuminate	ρ_1 [%]
Fattore di riflessione medio del circondario	ρ_2 [%]
Illuminamento medio	E [lx]
Luminanza media L	L [cd/m ²].

Se con UPF si indica il flusso luminoso emesso e riflesso verso l'alto, è facile verificare che vale la:

$$UPF = \Phi_L F_{la} [ULOR + \rho_1 u + \rho_2 (DLOR - u)] \quad (3-1)$$

Tenendo conto delle sole emissioni e riflessioni entro una elevazione di 20°, l'equazione precedente diviene:

$$UPF_{20} = \Phi_G [ULOR_{20} + \rho_{1_{20}} u + \rho_{2_{20}} (DLOR - u)] \quad (3.2)$$

In cui le variabili con pedice 20 riguardano l'elevazione 0°-20°.

Ponendo $F_{la} = (E * S) / u$, si ottiene:

$$UPF_{20} = E * S \left[\frac{ULR_{20}}{u} + \rho_{1_{20}} + \rho_{2_{20}} \left(\frac{DLR}{u} - 1 \right) \right] \quad (3.3)$$

Tuttavia, la maggior parte dell'illuminazione esterna è destinata a strade con traffico motorizzato realizzate in base a criteri di luminanza secondo le categorie illuminotecniche ME della norma UNI EN 13201-2.

In questo caso, per minimizzare i consumi energetici è condizione essenziale che la luminanza stradale sia ottenuta con l'illuminamento minimo.

Dato che la relazione fra luminanza e illuminamento dipende sia dall'efficienza di riflessione del manto stradale sia dalla ripartizione dell'intensità luminosa dell'apparecchio di illuminazione, occorre realizzare impianti di illuminazione massimizzando il fattore di luminanza stradale q_R , definito dalla formula:

$$q_R = \frac{L}{E Q_0} \quad (3.4)$$

in cui Q_0 è il coefficiente medio di luminanza stradale, misurato o presunto, del manto C2, definito dalla norma UNI 11248, con cui è progettato l'impianto.

Questo fattore è contemplato nella pubblicazione CIE 144, pagina 9, paragrafi dal 6 al 10, [13].

The average road luminance L can be expressed as $L = Q E$, where Q is an average luminance coefficient of the road surface and E is the average illuminance on the road surface.

When the degree of specular illumination is low (note: typical condition of concrete surfaces), the value of Q_0 is close to Q_d irrespective of the S1 value. Accordingly, the uncertainty of the road surface luminance is small.

When the degree of specular illumination is high (note: typical condition of asphalt surfaces), on the other hand Q approaches and even exceeds Q_0

Road lighting with a high degree of specular illumination is typical in most countries because of the resulting gain in average road surface luminance.

L'equazione (3.3) permette di calcolare il flusso luminoso emesso e riflesso verso l'alto con elevazione non maggiore di 20° per un impianto di illuminazione basato sull'illuminamento stradale, tipicamente una zona conflittuale o pedonale in un centro urbano. Per una strada con traffico motorizzato si può scrivere :

$$UPF_{20} = L \cdot S \cdot \left[\frac{1}{q_L \cdot Q_0} \right] \cdot \left[\frac{ULR_{20}}{u} + \rho_{1_{20}} + \rho_{2_{20}} \left(\frac{DLR}{u} - 1 \right) \right] \quad (3.5)$$

3.5 Apparecchi e impianti nell'ambiente

Dalle formule (3.2), (3.3), (3.5 e (3.7) sembra che per minimizzare il flusso luminoso emesso verso l'alto sia sufficiente impiegare apparecchi di illuminazione cutoff, dotati di vetro piano ed installati orizzontalmente in quanto in questo modo ULOR=0. Tuttavia, come mostrato in figura 3.2 a sinistra, il vetro piano provoca forti riflessioni verso l'interno dell'apparecchio alle inclinazioni radenti con $\gamma > 60^\circ$, responsabili del 50% della luminanza stradale, riducendo in conseguenza l'efficienza luminosa complessiva. Ne risentono i consumi energetici, che aumentano del 15-20% insieme ai costi di installazione, per la necessità di un maggior numero di apparecchi. Maggiore anche l'illuminamento per ottenere la stessa luminanza e con esso il flusso luminoso riflesso verso l'alto, annullando gli effetti della riduzione dell'ULOR ed aumentando il fattore di luminanza stradale e la luminanza artificiale del cielo, effetto questo contrario alle richieste degli astronomi.

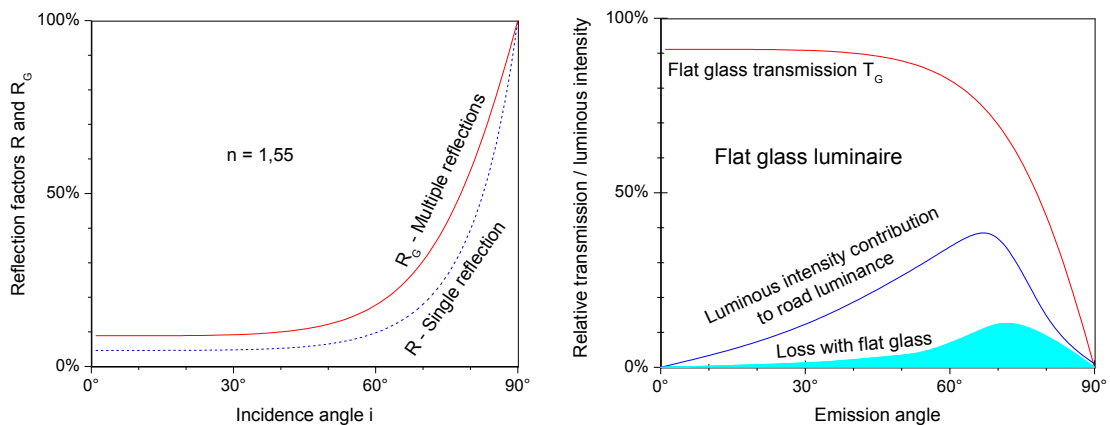


Figure 3.2 Sulla sinistra le riflessioni di Brewster, singola e multipla, di un vetro piano in funzione dell'angolo di incidenza i . Sulla destra la trasmissione di un vetro piano e le perdite ad esso associate con riferimento ad apparecchi con vetro curvo ed emissione relativa verso l'alto h ULOR = 3% [8].

Ad ulteriore dimostrazione della inutilità di annullare l'ULOR con apparecchi cutoff, si noti che, in tutti gli apparecchi con efficienza luminosa elevata, le lampade sono posizionate all'interno del riflettore. Non esiste quindi alcuna emissione diretta verso l'alto ma solo flusso luminoso diffuso dal vetro di protezione, certamente molto basso.

La figura 3.3 mostra in alto le riflessioni interne del vetro piano ed in basso la luce diffusa dal vetro curvo.

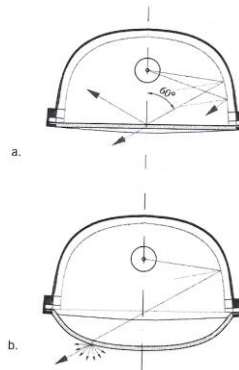


Figura 3.3 In alto le riflessioni interne del vetro piano che riducono fortemente l'efficienza luminosa globale dell'impianto ed in basso la diffusione del vetro curvo per apparecchi di illuminazione efficienti

3.6 Emissioni e riflessioni delle città illuminate

Sin dagli anni '70 [2, 22] vengono proposti modelli per la valutazione della ripartizione dell'intensità luminosa emessa dalle città illuminate, assunte come singola sorgente di luce.

In particolare, Garstang [22] propone una sorgente diffondente associata ad una ripartizione asimmetrica definita dalla formula (3.1):

$$I(\varepsilon) = \frac{I_M(\varepsilon)}{\Phi_G(\varepsilon)} = \frac{1}{2\pi} \left[2\rho \cos(\varepsilon) + 0,554 ULPR \varepsilon^4 \right] \quad (3.6)$$

dove ε è il complemento a $\pi/2$ della elevazione φ e ρ , come riportato nella tabella 3.1, è il fattore di riflessione della sorgente diffondente di una città.

Le misurazioni eseguite su alcune città illuminate confermano la validità di un modello caratterizzato da due tipi di emissione. Tuttavia, il peso delle due componenti della equazione (3.6) è diverso da quello ipotizzato da Garstang: ciò dipende dall'aver considerato con l'equazione (3.1) che tutte le sorgenti emettono una parte del flusso luminoso direttamente verso l'alto, mentre in grande prevalenza esse sono nascoste dagli edifici entro vere e proprie cavità urbane e risultano quindi solo diffondenti. La figura 3.4 mostra l'elevato numero di riflessioni tra gli edifici, che porta notoriamente ad un comportamento diffondente delle città, confermato dalla fotografie dall'alto di due città riportate in figura 3.5, nelle quali gli apparecchi di illuminazione visibili (sorgenti rurali) sono molto meno di quelli nascosti all'interno delle cavità urbane tra gli edifici (sorgenti urbane).

Per le sorgenti urbane le equazioni (3.3) e (3.5) devono essere sostituite dalle:

$$UPF_{20} = \rho_{20} \Phi_G \quad (3.7)$$

La scomparsa di q_R e di u nella (3.7) non deve trarre in inganno: ottimizzando un impianto rispetto a questi due fattori si riduce ϕ_G riducendo i consumi ed anche UFR_{20} , ossia il flusso luminoso verso l'alto.

Le (3.2), (3.3), (3.5) e (3.7) dimostrano che l'ottimizzazione dei consumi porta sempre alla minimizzazione della luminanza artificiale del cielo.

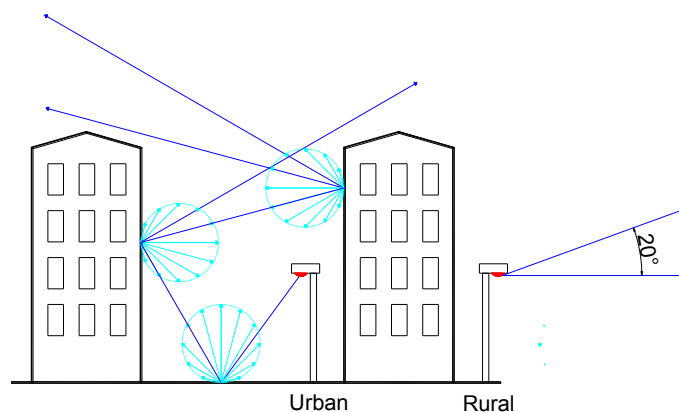


Figure 3.4 Una città illuminata può essere assimilata ad un insieme di sorgenti di luce, in maggioranza schermate dagli edifici (sorgenti urbane) e da una minoranza di sorgenti non schermate (sorgenti rurali)

3.7 Misure per le città illuminate

Una città può essere assimilata ad un insieme di cavità (sorgenti urbane) che come tali emettono verso l'alto un flusso luminoso con ripartizione diffondente dell'intensità luminosa, associata ad una limitata emissione diretta dovuta ai pochi apparecchi visibili con elevazione 0° - 20° (sorgenti rurali). Questo comportamento è confermato da misurazioni eseguite da una collina circostante cinque città. Come mostrato dalla tabella 3.2, la luminanza misurata è coerente con quella calcolata in base al flusso luminoso installato e ad un fattore di riflessione globale pari in media a 0,23.

Nella tabella 3.2 il ridotto valore delle differenze relative fra luminanze calcolate e misurate (-0,003) e del suo scarto tipo (0,051), insieme allo scarto tipo dei fattori di riflessione misurati (0,010) conferma il comportamento diffondente delle città illuminate.

3.8 Compatibilità ambientale

L'illuminazione esterna, essenziale per la sicurezza dei cittadini, produce effetti sull'ambiente dovuti alla emissione di CO₂ da parte delle centrali. Dai dati riportati in tabella 3.3 emerge la necessità di risparmiare energia nell'illuminazione esterna anche a beneficio della salute. Sono evidenziati inoltre gli effetti negativi, rispetto ad impianti ottimizzati dal punto di vista energetico ed ambientale, che originerebbero dalla applicazione integrale sul territorio nazionale di molte leggi regionali.

Tabella 3.2 Luminanze misurate e stimate di città viste da una collina						
Città	Abitanti x 10 ⁻³	Distanza collina [km]	Flusso riflesso [lm/m ²]	Luminanza[cd/m ²]		Fatt. rifl. calc. dalle misure ρ
				calcolata ρ=0,23	Mis. dalla collina	
Padova	100	15	2,2	0,26	0,25	0,222
Abano	20	6,8	1,8	0,36	0,36	0,23,4
Montegrotto		7,3	2,0	0,40	0,39	0,228
Torino	1000	15	2,1	0,26	0,28	0,248
Treviso	80	-				0,234

Differ. relativa fra luminanze calcolate e misurate	Media	-0,003
	Scarto tipo σ	0,051
Fattore di riflessione ρ	Media	0,233
	Scarto tipo σ	0,010



Figure 3.5 A sinistra Milano vista dalla Madonnina: solo pochi apparecchi di illuminazione sono visibili sui 15000 circa installati in questa zona, poiché quasi tutti nascosti nelle cavità urbane. A destra Firenze con la cupola del Brunelleschi e il campanile di Giotto. Nuovamente, ben pochi apparecchi sono visibili sui 39000 circa installati. L'emissione diffondente delle cavità urbane si manifesta con le molte zone bluastre

