



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: 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.

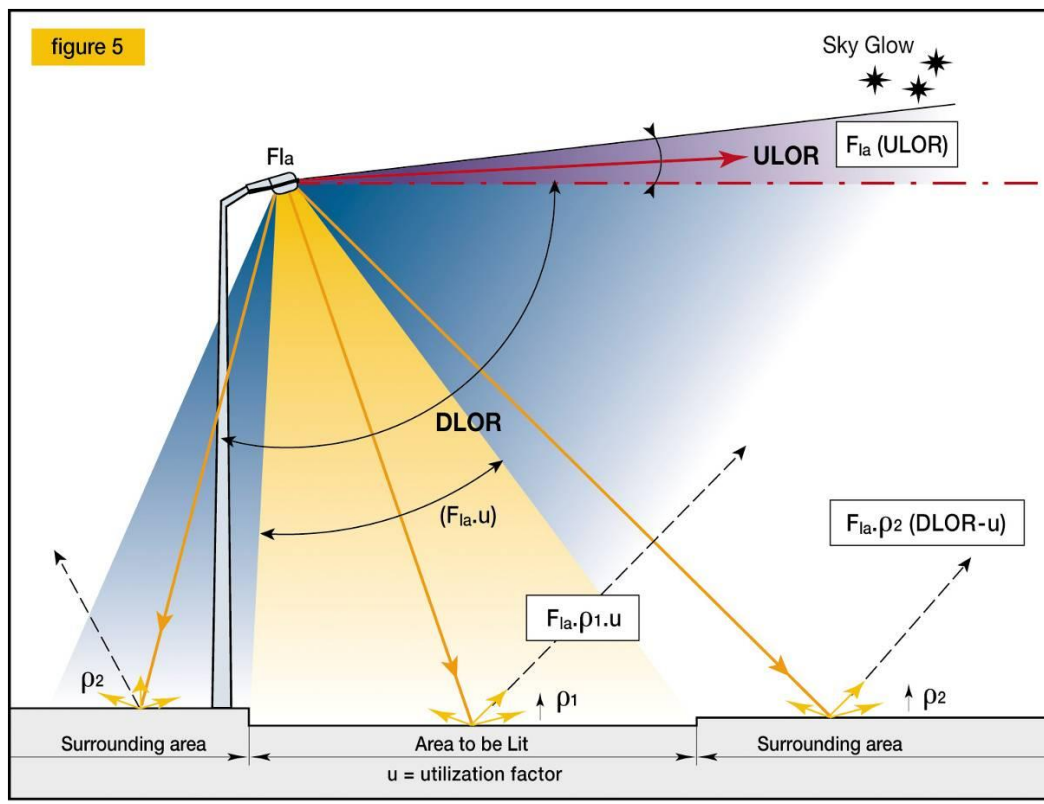


Figura 3.1 Flusso luminoso emesso e riflesso da un impianto stradale

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:

$$UPF = \phi_L F_{l_a} [ULOR + \rho_1 u + \rho_2 (DLOR - u)] \tag{3-1}$$

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.

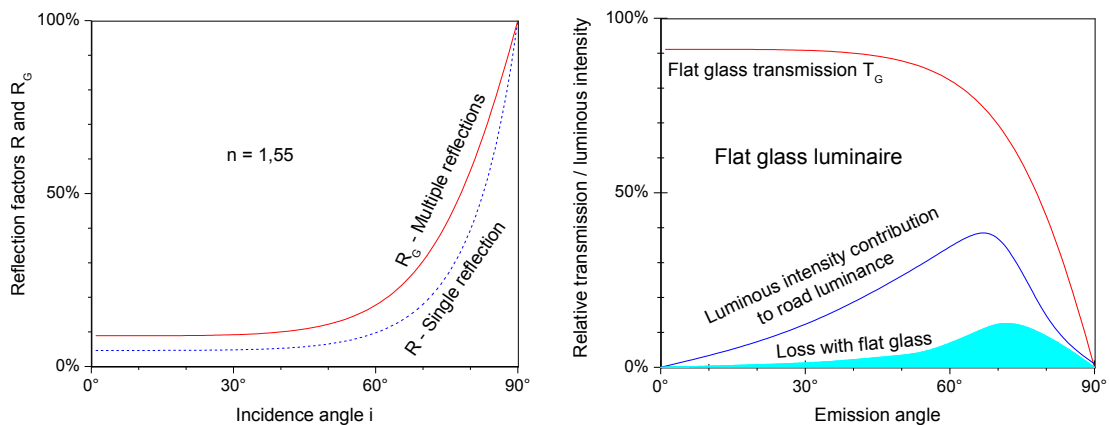


Figure 3.2 Sulla sinistra le riflessioni di Brewster, singola e multipla, di un vetro piano in funzione dell'angolo di incidenza i . Sulla destra la trasmissione di un vetro piano e le perdite ad esso associate con riferimento ad apparecchi con vetro curvo ed emissione relativa verso l'alto h ULOR =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

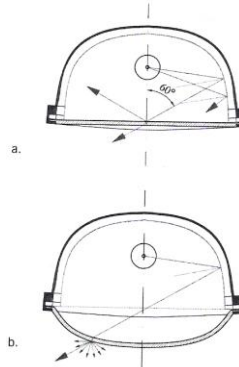


Figura 3.3 In alto le riflessioni interne del vetro piano che riducono fortemente l'efficienza luminosa globale dell'impianto ed in basso la diffusione del vetro curvo per apparecchi di illuminazione efficienti

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.

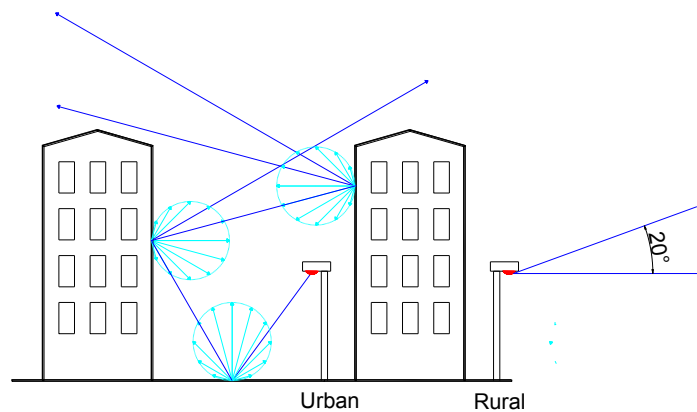
Le misurazioni eseguite su alcune città illuminate confermano la validità di un modello caratterizzato da due tipi di emissione. Tuttavia, il peso delle due componenti della equazione (3.6) è diverso da quello ipotizzato da Garstang: ciò dipende dall'aver considerato con l'equazione (3.1) che tutte le 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.



Figura

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

Tabella 3.3 - Consumi e inquinamento Illuminazione esterna pubblica e privata		
Argomento	Valore 2005	In più con LR
Consumi energetici [GWh/anno]	12	2,4
Inquinamento atmosferico (CO ₂) [t/anno]	4,7	1,0

Occorre quindi ridurre i consumi energetici per la salute e per la minimizzazione della luce molesta in tutte le sue forme .

3.9 Energia e ambiente - Norme e direttive europee

Il regolamento 245/2008 della Commissione Europea [3] definisce:

f) «luce molesta»: la parte della luce proveniente da un impianto di illuminazione che non serve alle finalità per cui l'impianto è stato progettato. Sono inclusi i seguenti casi:

- luce che illumina indebitamente zone al di fuori dell'area da illuminare,
- luce diffusa nelle vicinanze dell'impianto di illuminazione,
- luminescenza del cielo, vale a dire la luminosità del cielo notturno dovuta alla riflessione diretta o indiretta della radiazione (visibile e non visibile), diffusa dai componenti dell'atmosfera (molecole di gas, aerosol e particolato) nella direzione dell'osservazione;

Le prescrizioni della tabella 25 e i commenti del regolamento 245 sono riportati nella tabella 3.4 . Per confronto, nella tabella 3.5 sono riprodotte le prescrizioni della pubblicazione CIE 126 e della norma UNI 10819, la tabella 3.6 riporta quanto prescritto dalla norma UNI CEN 12464-2 [5], in cui si considera anche la luce molesta che entra negli edifici

Tabella 3.4 (Tabella 25 del regolamento 245/09)	
<i>Valori indicativi di percentuale di flusso luminoso emesso verso l'alto (Upward Light Output Ratio, ULOR) per classe stradale per gli apparecchi per illuminazione stradale (a livello di parametri di riferimento)</i>	
<i>Flusso luminoso</i>	<i>ULOR</i>
<i>Classi stradali da ME1 a ME6 e da MEW1 a MEW6</i>	
<i>tutti i flussi luminosi</i>	<i>3%</i>
<i>Classi stradali da CE0 a CE5, da S1 a S6, ES, EV e A</i>	
<i>12 000 lm ≤ sorgente luminosa</i>	<i>5%</i>
<i>8 500 lm ≤ sorgente luminosa < 12 000 lm</i>	<i>10%</i>
<i>3 300 lm ≤ sorgente luminosa < 8 500 lm</i>	<i>15%</i>
<i>sorgente luminosa < 3 300 lm</i>	<i>20%</i>
Estratto dal regolamento 245	
<i>Nelle aree in cui l'inquinamento luminoso costituisce un problema, la porzione massima di luce emessa sopra l'orizzonte non è superiore all'1 % per tutte le classi stradali e tutti i flussi luminosi.</i>	

Gli apparecchi di illuminazione sono progettati per evitare per quanto possibile che emettano luce molesta. Tuttavia, gli eventuali miglioramenti apportati all'apparecchio di illuminazione per ridurre le emissioni di luce molesta non devono avere conseguenze negative sull'efficienza energetica globale dell'impianto per cui l'apparecchio è stato progettato.

Tabella 3.5 Confronto CIE e UNI		
Zona	ULOR	
	CIE 126 Mmassimi	UNI 10819 Medie città
E1	0	-
E2	0,05	0,01
E3	0,15	0,05
E4	0,25	0,10

Tabella 3.6 – Norme CIE 015 e UNI EN 12464-2 - Luce molesta							
Zone	Illuminamento su edifici		Intensità lumin. di apparecchi		ULOR	Luminanza	
	E_v [lx]		I [kcd]		-	L_b [cd.m ⁻²]	
	Orario					Facciate	Segnali
	Normale ^{a)}		Regol.	Normale	Regol.		
E1	2	0 ^{b)}	2,5	0	0	0	50
E2	5	1	7,5	0,5	0,05	5	400
E3	10	2	10	1,0	0,15	10	800
E4	25	5	25	2,5	0,25	25	1 000

^{a)} Nel caso siano disponibili orari regolamentati, i valori più elevati non dovrebbero essere superati ed i limiti più bassi sarebbero preferibili

^{b)} Nel caso di illuminazione pubblica, il limite massimo potrebbe essere 1 lx.

Nelle tabelle 3-5 e 3-6 valgono le seguenti definizioni.

- E1 Aree scure come parchi nazionali o siti protetti;
- E2 Aree con luminanze basse: zone industriali o residenziali;
- E3 Aree con luminanze medie: sobborghi industriali o residenziali;
- E4 Aree con luminanze elevate: centri cittadini o zone commerciali;

- E_v valore massimo dell'illuminamento verticale sugli edifici [lx];
- I Intensità luminosa di ogni sorgente di luce potenzialmente molesta [kcd];
- ULR Rapporto fra il flusso luminoso emesso verso l'alto dagli apparecchi nella posizione di installazione;
- L_b Luminanza media massima della facciata di un edificio [cd.m⁻²];
- L_s Luminanza media massima di un segnale [cd.m⁻²].

Le prescrizioni delle tabelle 3.4, 3.5 e 3.64 sono praticamente equivalenti in quanto quelle della norma UNI 10819 sono relative ai valori medi di emissione verso l'alto e quindi inferiori ai valori massimi indicati dalla CIE e dal CEN.

Il limite massimo del 3% del regolamento 245 per le strade con traffico motorizzato (categorie illuminotecniche ME) è molto vicino al 5% della CIE relativo alla zona rurale E2 ed all'1% medio della UNI 10819 per la stessa zona. I limiti più elevati del regolamento 245 corrispondono a lampade di minore potenza unitaria, tipiche delle zone urbanizzate E3 ed E4 della CIE e dell'UNI. I documenti citati sono stati redatti dopo studi approfonditi su risparmio energetico e compatibilità ambientale. In particolare il regolamento 245 è il risultato di un lungo rapporto cui hanno contribuito molti studiosi europei [6]. Esso smentisce chi ritiene che gli apparecchi che non emettono luce verso l'alto (cutoff) garantiscano la minimizzazione dei consumi e della luminanza artificiale del cielo.

Infatti, il 50% circa della luminanza stradale è dovuto al flusso luminoso emesso per angoli γ compresi tra 60° e 80° [5.7]; con la tecnologia attuale, gli apparecchi cutoff hanno una finestra di emissione chiusa da un vetro piano installato orizzontalmente, che, alle elevate incidenze, necessarie per una illuminazione efficiente, riflette la maggior parte della luce verso l'interno aumentando consumi energetici, illuminamento ed anche le riflessioni verso l'alto a parità di luminanza stradale.

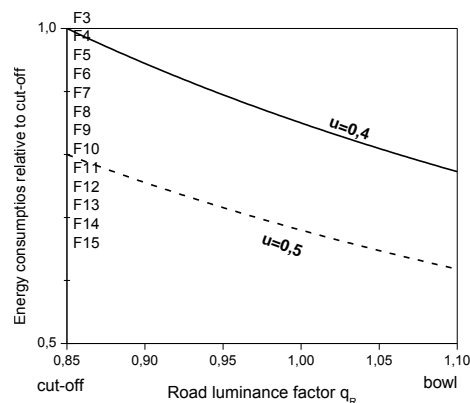
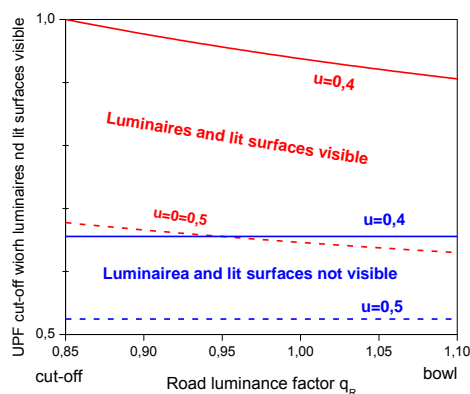
Limitando al 3% di flusso luminoso verso l'alto, ammesso dal regolamento 245, si rende possibile l'uso del vetro curvo, con minimizzazione dei consumi energetici e della luce riflessa verso l'alto dalle superfici illuminate, compensando le maggiori emissioni dirette del vetro curvo rispetto al vetro piano: minimizzando i consumi si minimizza la luminanza artificiale del cielo.

3.10 Ottimizzazione degli impianti di illuminazione esterna

Dall'ultima equazione del punto 3.4 emerge che un elevato fattore di luminanza stradale q_R riduce consumi energetici ed emissioni di CO_2 ed anche il flusso luminoso emesso e riflesso verso l'alto. La validità di questa asserzione richiede che l'aumento di q_R non provochi un maggiore aumento dell'ULOR, come effettivamente dimostrano le misure.

La figura 3.6 riporta i grafici tracciati in base a misure sui risultati ottenibili in termini di luminanza artificiale del cielo e di consumi energetici in funzione del fattore di luminanza stradale q_R , con fattori di utilizzazione u di 0,40 e 0,50: si noti la grande importanza a tutti gli effetti di un aumento di questo fattore.

La figura 3.6 costituisce una sintesi degli studi sull'illuminazione esterna e la compatibilità ambientale. Da essa emerge che è inutile, per non dire dannoso, installare apparecchi di illuminazione cutoff, sia per l'aspetto energetico che ambientale. Risulta inoltre indispensabile ottenere fattori di utilizzazione elevati, anche attraverso costruzioni specifiche di apparecchi di illuminazione.



F3
F4
F5
F6
F7
F8
F9
F10
F11
F12
F13
F14
F15

Figura 3.6 Flusso luminoso emesso verso l'alto e consumi energetici relativi ad apparecchi di illuminazione con emissione nulla verso l'alto, per impianti con apparecchi visibili da lontano (curve blu) e nascosti nelle cavità urbane (curve rosse) per due fattori di utilizzazione.

3.11 Leggi regionali sul risparmio energetico e l'inquinamento luminoso

Per facilitare la comprensione del significato delle misurazioni fotometriche di cui agli allegati A e B e dei suggerimenti in merito alla compatibilità con le prescrizioni delle leggi regionali è opportuno premettere l'analisi delle norme e delle 16 leggi regionali.

3.12 Obiettivi delle leggi regionali

Nel corso degli ultimi anni sono state emesse 16 Leggi regionali con l'obiettivo dichiarato di ridurre i consumi energetici dell'illuminazione esterna e contenere la luminanza artificiale del cielo, l'inquinamento luminoso, che ostacola l'osservazione astronomica. In realtà, mentre il problema energetico è di competenza regionale, la luminanza del cielo ricade sotto la compatibilità ambientale, tema di esclusiva competenza dello Stato su cui le Regioni dovrebbero astenersi dal legiferare, pena l'incostituzionalità delle leggi stesse. Per questo motivo dette leggi indicano come prioritario il risparmio energetico, ma non vanno oltre una generica dichiarazione di intenti, dimenticando che esso è condizione necessaria e sufficiente per ridurre l'inquinamento luminoso, mentre non è vero il viceversa.

Molteplici prescrizioni fotometriche, spesso diverse da legge a legge, casistiche dettagliate ed ingiustificate, evidenziano carenze conoscitive alla base di queste leggi, che non riescono a conseguire i loro stessi obiettivi poiché i costi di installazione ed i consumi energetici sono più elevati, con nessun vantaggio per l'astronomia, e notevoli svantaggi per i cittadini che hanno una minore possibilità di usufruire delle città in condizioni notturne.

Finora è fallito il tentativo di fare approvare dal Parlamento una legge nazionale su basi scientifiche, che porterebbe a principi cui dovrebbero attenersi le Regioni.

3.13 Prescrizioni legali

La tabella 3.7 evidenzia gli articoli ed i commi delle 16 leggi regionali.

Tre LR si limitano a riferimenti normativi e regolamentari come dovrebbero fare tutte le leggi: due (Piemonte e Valle d'Aosta) prescrivono la conformità alle norme CEI e UNI ed in particolare alla UNI 10819, basata a sua volta sulla pubblicazione CIE 126 e quindi a carattere scientifico, mentre una terza (Basilicata) indica soltanto i raggi delle aree di protezione, rinviando le prescrizioni tecniche ad un regolamento. Le altre 13 LR hanno carattere puramente empirico ed elencano un gran numero di prescrizioni che in realtà ostacolano l'illuminazione limitando la fruizione notturna delle città. Nessuna legge tenta di quantizzare i risultati attesi e di valutare il rapporto costi/benefici, come sarebbe doveroso per chi gestisce denaro pubblico.

3.14 Risparmio energetico

Tutte le leggi dichiarano il risparmio energetico obiettivo prioritario, e richiedono la riduzione delle emissioni verso l'alto degli apparecchi di illuminazione, associandola implicitamente alla minimizzazione dei consumi energetici. Ma questa ipotesi è in generale errata, e le LR che emettono prescrizioni di tipo ambientale sono incostituzionali. [11]

3.15 Emissioni verso l'alto

Come visibile nella tabella 1, la LR della regione Veneto, la prima in ordine di tempo, permette genericamente un flusso luminoso verso l'alto pari al 3% del flusso totale, che si riduce a 0 vicino agli osservatori, mentre la LR del Lazio ha una serie di prescrizioni, che a lato pratico si riducono alla solita emissione nulla verso l'alto, così come fanno in un modo o nell'altro le altre LR. Ai punti successivi sono evidenziati gli aspetti stradali e commerciali delle LR.

3.16 Aspetti stradali

- **Flusso luminoso emesso verso l'alto.** Se si bada solo alle prescrizioni in questo campo, chi opera su tutto il territorio nazionale non può che adottare una emissione nulla verso l'alto, ossia apparecchi con vetro piano installati orizzontalmente, aggravando i consumi energetici e i costi in generale di circa il 20%. In zone situate tra montagne o fronteggianti il mare si può invocare la situazione di schermatura intrinseca contemplata da tutte le leggi, posizione che si rischia di dover difendere in tribunale.
- **Livelli di illuminazione.** Molte leggi prescrivono che in assenza di indicazioni normative la luminanza stradale non possa essere maggiore di 1 cd/m^2 . Tuttavia, un progettista può adottare luminanze superiori in conseguenza della analisi dei rischi prevista dalla norma UNI 11248.
- **Interdistanza tra i pali.** Alcune LR prevedono un rapporto minimo di 3,7 tra interdistanza e altezza. Ciò non è sempre possibile perché per motivi di sicurezza l'illuminazione deve costituire una guida ottica.

- **Impianti per l'illuminazione di aree esterne.** Non sono previsti vincoli sulle interdistanze. Le torri faro vengono trattate analogamente agli apparecchi di illuminazione.
- **Tipo di lampada.** Le lampade ad alogenuri metallici con luce bianca hanno raggiunto recentemente la stessa efficienza luminosa di quelle al sodio ad alta pressione e quindi si potrebbero adottare invocando anche questioni di sicurezza. Infatti, la luce bianca è raccomandabile in quanto mette in rilievo la percezione degli ostacoli in visione periferica.
- **Regolatori di flusso luminoso.** Sono previsti con riferimento alla norma UNI sull'illuminazione stradale, ma la parzializzazione può essere attuata dopo attenta valutazione delle esigenze di sicurezza. Per prolungare la vita delle lampade è utile uno stabilizzatore di tensione, il cui costo è simile a quello di un regolatore. I regolatori potrebbero essere installati nelle Aree di nuova costruzione rinviando per il momento il problema per le Aree esistenti.
- **Modifiche nelle aree esistenti.** Molte leggi richiedono l'applicazione di alette o addirittura il cambio della finestra di uscita. Si tratta di operazioni che portano al ritiro del marchio CE e sono illegali. La scadenza per le modifiche è stata rinviata.

3.17 Aspetti commerciali

- **Illuminazione locale.** Si possono invocare le stesse prescrizioni dell'illuminazione urbana, meno restrittive.
- **Direzione dell'illuminazione di facciate e insegne.** Viene quasi sempre richiesta dall'alto verso il basso.
- **Luminanza delle facciate.** Molte leggi la limitano a 1 cd/m^2 .
- **Insegne.** Alcune leggi limitano il flusso luminoso totale per un esercizio a 4500 lm, si tratta di un limite molto penalizzante che rende le insegne scarsamente visibili. Vale in proposito l'analogia con i segnali stradali attivi, dotati di illuminazione interna, per i quali la norma UNI EN 12899-1 adottata con decreto prevede luminanze fino a 900 cd/m^2 .

3.18 Aspetti energetici

Sono evidenziati in tutte le leggi ed in particolare in quelle qui indicate, di cui l'ultima colonna della tabella 14 (evidenziata in giallo) riporta articoli e commi che richiamano l'esigenza di risparmiare energia, contraddicendo la prescrizione di intensità nulla verso l'alto.

- **Contributi regionali.** La legge della Regione Friuli Venezia Giulia prevede finanziamenti legati alla realizzazione di impianti con il massimo risparmio energetico, come recita il comma 2 dell'art. 9: "L'Amministrazione regionale è altresì autorizzata a concedere a soggetti pubblici contributi per l'adeguamento degli impianti alla presente legge, nonché per la realizzazione di impianti di illuminazione stradale con elevate efficienze che, compatibilmente con le norme tecniche di sicurezza, minimizzino le potenze installate ed i costi ed interventi di manutenzione e massimizzino le interdistanze tra gli apparecchi di illuminazione".

- **Riduzioni dei consumi.** La Legge 22/2007 della Regione Liguria recita al comma 2 dell'art. 1 (Finalità ed obiettivi generali) “promuovere il miglioramento dell'efficienza energetica e la riduzione delle emissioni inquinanti e climalteranti” ed al comma 2g dell'art. 2 (Competenze della Regione): “la concessione di contributi nei limiti delle proprie disponibilità di bilancio nel campo delle energie rinnovabili, del risparmio energetico e dell'uso razionale dell'energia anche tramite il coordinamento di strumenti di pianificazione ambientale e territoriale”.
- **Regione Liguria.** All'art. 20 (requisiti tecnici degli impianti di illuminazione”, comma 1d questa legge recita: “realizzati ottimizzando l'efficienza degli stessi e quindi impiegando a parità di luminanza apparecchi che conseguono impegni ridotti di potenza elettrica e condizioni ottimali di interesse dei punti luce”.
- **Provincia di Trento.** L'art. 5 (incentivazione) comma 1 della legge 16/07 della provincia di Trento recita: “La Provincia, tramite l'APE, provvede alla concessione di contributi a soggetti pubblici e privati per la realizzazione di interventi e di misure finalizzati alla riduzione dell'inquinamento luminoso mediante impianti ad alto rendimento energetico nel quadro delle autorizzazioni di spesa previste dalla legge provinciale 29 maggio 1980, n. 14 (Provvedimenti per il risparmio energetico e l'utilizzazione delle fonti alternative di energia). Alle spese derivanti dall'appendice di questo articolo provvede l'APE con il proprio bilancio”.
- **Emilia Romagna.** L'art. 5 (requisiti tecnici e modalità di impiego degli impianti di illuminazione) della LR al comma 1d riporta: “(impianti) realizzati ottimizzando l'efficienza degli stessi e quindi impiegando a parità di luminanza apparecchi che conseguono impegni ridotti di potenza elettrica e condizioni ottimali di interesse per i punti luce”.
- **Regione Puglia.** Art. 5 comma 2 “impiego a parità di luminanza di apparecchi di illuminazione che conseguano impegni ridotti di potenza elettrica, condizioni ottimali di interesse dei punti luce ridotti costi manutentivi. In particolare, i nuovi impianti di illuminazione stradali tradizionali, fatta salva la prescrizione dell'impiego di lampade con la minor potenza installata in relazione al tipo di strada ed alla sua categoria illuminotecnica, devono garantire un rapporto fra interdistanza ed altezza delle sorgenti luminose non inferiore al valore di 3,7. Sono consentite soluzioni alternative solo in presenza di ostacoli quali alberi ed in quanto funzionali alla certificata e documentata migliore efficienza generale dell'impianto. Soluzioni con apparecchi lungo entrambi i lati della strada (laterali frontali) sono accettabili, se necessarie, solamente per strade classificate con indice illuminotecnico 5 o 6”.

3.19 Effetti negativi delle leggi regionali

A dispetto degli obiettivi che si leggono nella stessa titolazione delle leggi regionali, risparmio energetico e contenimento dell'inquinamento luminoso, nessun dato prova che vi sia un risparmio rispetto ad impianti ottimizzati dal punto di vista energetico. Anzi studi scientifici a livello internazionale e nazionale, condotti sperimentalmente dagli enti più prestigiosi, dimostrano che

l'emissione nulla verso l'alto di molte leggi regionali non consente di ottimizzare gli impianti a livello energetico.

Nel tentativo di dimostrare il contrario, gli astrofili confrontano le prestazioni di impianti obsoleti con impianti che soddisfano le leggi regionali, ottenendo ovviamente migliori efficienze energetiche qualunque sia il tipo dei nuovi apparecchi di illuminazione, soprattutto se si sostituiscono le lampade a vapore di mercurio con quelle a vapore di sodio ad alta pressione. Il confronto tra i nuovi impianti con emissione nulla verso l'alto di cui gli astrofili vantano le prestazioni e quelli ottimizzati dal punto di vista energetico mostra risultati diversi.

Per quanto riguarda la protezione dei siti naturalistici, conta soprattutto limitare la luce emessa verso il basso. Applicare le leggi regionali o le norme per la protezione degli osservatori astronomici è quindi un grave errore che porta a spese inutili sotto i profili sia del risparmio energetico sia della protezione del sito. La letteratura internazionale riporta alcuni studi in proposito che si spera possano produrre presto norme utili.

Inoltre tali Leggi non valutano quantitativamente i loro obiettivi (benefici) e l'ingente impegno finanziario (costi) che richiedono alla collettività, un peso eccessivo, dimostrato anche dalla difficile applicazione per carenza di fondi di leggi regionali approvate da anni. Trasferire la realizzazione degli obiettivi per i nuovi impianti è un errore, le prescrizioni legali non ottimizzano gli obiettivi.

3.20 Volontarietà di prescrizioni: fattore di innovazione

Come detto al punto 5, le leggi dello Stato identificano la sicurezza di materiali, apparecchiature e impianti con costruzioni e realizzazioni "a regola d'arte" e "considerano" tali se conformi alle norme UNI e CEI. La conformità alle norme è **sufficiente** per una presunzione di sicurezza, **ma non necessaria**, non obbligatoria e quindi volontaria, ai fini della realizzazione degli obiettivi di sicurezza di cui sono oggetto.

Ciò vale identicamente per le prescrizioni legali. Il DM 20 dicembre 2005 n. 295 pur richiedendo al comma 1 dell'articolo 1 l'impiego della norma UNI 11095 per la progettazione e la realizzazione degli impianti di illuminazione delle gallerie stradali, al comma successivo dello stesso articolo recita:

"2. Il progettista in accordo con la committente può utilizzare modelli e/o sistemi di calcolo diversi purché vengano rispettati e documentati, con assunzione di responsabilità, i livelli di sicurezza e di prestazioni attesi fissati dalla norma".

Quindi, non solo il DM permette di modificare i livelli di illuminazione previsti dalla norma UNI 11095, ma consente addirittura di individuare possibili metodologie innovative per determinare la categoria illuminotecnica a condizione che il progettista giustifichi il proprio operato nell'analisi dei rischi e ne assuma la responsabilità, prima di tutto in termini di sicurezza e di risparmio energetico.

D'altra parte, se così non fosse leggi e norme bloccherebbero l'applicazione dei risultati delle ricerche scientifiche e dello sviluppo della tecnologia, che già hanno prodotto innovazione dalla data di approvazione della LR 17/2000 ad oggi. Si noti che per la maggior parte delle leggi costruttori, progettisti, ed installatori si trovano di fronte a due prescrizioni incompatibili: il risparmio energetico, priorità assoluta di competenza regionale, ribadito da molte regioni anche con l'assegnazione di contributi specifici, e le prescrizioni regionali sul contenimento dell'inquinamento luminoso, che sarebbe di responsabilità statale.

Le leggi regionali si limitano a trasferire la realizzazione degli obiettivi sulle prescrizioni per i nuovi impianti: e qui sta l'errore in quanto allo stato dell'arte le prescrizioni legali non ottimizzano gli obiettivi, né le leggi spiegano perché si debba spendere il denaro pubblico per obiettivi di livello inferiore a quanto la tecnologia permette di ottenere. Ciò dimostra nuovamente che le leggi ostacolano l'innovazione ed impediscono di realizzare impianti a regola d'arte.

Tabella 3.7 - Riferimenti ad articoli/commi delle LR su risparmio energetico e inquinamento luminoso

Regione	Energia e ambiente		Luoghi comuni												Siti protetti		Contributi per impianti a risparmio energetico
	Riflessioni verso l'alto	Fattore di luminanza $q_R=L/(E Q_0)$	Prescrizioni						Deroghe						Prescriz.		
			Intens. lumin. max 0 cd/klm per $\gamma \geq 90^\circ$	Lum. Max = min. norme $\leq 1 \text{ cd/m}^2$	Resa colori > se	Interdistan./altezza $\geq 3,7$	Flusso verso l'alto $\leq 3\%$ flusso totale	Riferimento alla norma UNI 10819	Arredo urbano (cd/kl per $\gamma \geq 90^\circ$)	Flusso $\leq 4500 \text{ lm}$ per ogni insegna	Impianti schermati da strutture edilizie	Max 10 app. flusso $\leq 1500 \text{ lm}$	Max 5 app. con flusso $\leq 1200 \text{ lm}$	App. $\leq 1500\text{-}1500 \text{ lm}$ $\leq 2250 \text{ lm}$ $\gamma \geq 90^\circ$	Flusso totale verso l'alto $\leq 25000 \text{ lm}$	Sicurezza	
Abruzzo	-		5/b	5/1e	5/1c	5/	-	5/8	5/f	-	-	5/2	-	1/ f	-		
Basilicata	Si		Nessuna limitazione fino a 5 km da un sito protetto												Non		
Campania			4/e	4/f	-	18	35	-	17/b	-	17/d	-	(17/	11			
Emilia Romagna			5/1a	5/1c	5/1b	-	-	-	5/1e	-	-	5/2	-	5/1e	5/1a	-	5/1d
Friuli-Ven. Giulia			8/2a	(/2c	8/2b	8/12	-	8/5	8/4a	8/4f	-	8/4f	-	-	-	-	9/2
Lazio	-		12/1° z 5 cd/m2			-	35	-	-	-	-	-	-	12/3	-		
Liguria			5/1.	20/1	5/2.	5/1,	-	10/2	12/1	-	-	-	-	-	-	-	
Lombardia			6/2		7/6c	-	-	6/4	6/3	-	6/3	7/4	-	6/2	6/2	6/7	
Marche			B/1	B/1	-	-	-	B/3	-	-	-	-	-	B/1	B/9e		
Piemonte	Si		-	-	-	3/1	-	7/	-	-	7/1d	3/1	-3/1	-	-		
Puglia			5/1a	5/1c	5/	5/	5/	-	5/6	6/1a	-	5/3	5/1	5/1a	5/	5/2	
Toscana			5cd/	A/2	A/1	-	A/3	-	5	-	1/6-3a	A/5	C	C			
Trento			4/3b	Regolamento in fase di preparazione												5/1	
Umbria			2/5a	2/5b	-	-	-	4/3a	4/3b	-	-	4/2	2/	3/			
Valle d'Aosta			-	-	-	3/1	-	-	-	-	-	3/1	-	-			
Veneto			-	C2	C1	-	C3	-	-	-	-	C5	9/2b				

- 7 **Scelta degli apparecchi di illuminazione**
- 8 **Progettazione degli impianti**
- 9 **Ricerca degli apparecchi**

L'obiettivo del programma di ricerca è verificare mediante misurazioni su un limitato numero di impianti sperimentali la coerenza dei calcoli progettuali e delle considerazioni teoriche con le effettive prestazioni illuminotecniche e con le esigenze di compatibilità energetica ed ambientale. Non si tratta quindi di verificare la conformità degli impianti a norme e/o prescrizioni, anche se richiamate nella ricerca come elemento di guida, ma di costituire un punto di riferimento per l'estensione dei risultati della ricerca a più numerosi casi di studio con garanzia di coerenza con la realtà.

Nel nostro caso è previsto che le esperienze siano effettuate su due strade, in aperta campagna ed in centro città. In entrambe le strade verranno installati impianti pilota con le seguenti caratteristiche.

- **Apparecchi di illuminazione.** Con vetro piano e coppa liscia.
- **Condizioni particolari.** Apparecchio di illuminazione ottimizzato nella versione con vetro curvo e disponibile anche con vetro piano.
- **Colore della luce.** Bianco.
- **Lampade.** Ioduri metallici e LED.
- **Categoria illuminotecnica.** ME3b della norma UNI EN 13201-2.
- **Tipo di asfalto.** C2 con $Q_0=0,07\text{strad}^{-1}$.
- **Larghezza della strada.** 7,5 m.
- **Fattore di riflessione verso l'alto del manto stradale.** $\rho_1 = 0,12$.
- **Fattore di riflessione delle superfici illuminate per $\epsilon \leq 20^\circ$.** $\rho_2 = 0,34$,

Sono stati presi in esame molti tipi di apparecchi di illuminazione. Ne è emersa la proposta che segue.

- **Apparecchi di illuminazione con lampade ioduri metallici.** Tipo Iridium di Philips, con vetro piano e coppa liscia, equipaggiati con lampade a ioduri metallici tipo Cosmopolis.
- **Apparecchi di illuminazione con LED.** Tipo Senso 2 di Schröder con vetro piano e coppa liscia equipaggiati con 96 LED con temperatura di colore 4500 K.
- **Flusso luminoso nominale per i calcoli.** 10000 lm.

I risultati dei calcoli di progetto sono riportati nella tabella 7.1.

Per l'installazione degli impianti è previsto l'uso di pali mobili di costruzione Grechi.

Tabella 7.1 – Caratteristiche degli impianti pilota					
Grandezza	Unità	Caratteristiche			
Apparecchi	-	Philips Iridium		Schröder Senso 2	
Lampada		Ioduri metallici		LED	
Finestra emissione		Vetro piano	Coppa	Vetro piano	Coppa
Altezza	m	8			
interdistanza		33	38	35	42
Luminanza	cd/m ²	1,03	0,95	0,82	0,86
illuminamento	lx	16	12	13	10
Unif. globale U ₀	-	0,49	0,50	0,53	0,47
Unif. long. U _l		0,61	0,59	0,64	0,62
Incr. di soglia TI		11	15	12	15
Fattore luminan. q _R		0,94	1,12	1,02	1,14
Fattore utiliz. u		0,38	0,34	0,36	0,36

La tabella 7.1 costituisce un esempio delle prestazioni prevedibili in base alle ripartizioni delle intensità luminose comunicate dai costruttori degli apparecchi di illuminazione. La tabella sarà rivista dopo la consegna degli apparecchi e dopo la verifica effettuata sugli stessi, come previsto al punto 10 del programma di ricerca.

Bibliografia

- [1] CIE 32 “Lighting in situations requiring special treatment “, 1973
- [2] REGOLAMENTO (CE) N. 245/2009 DELLA COMMISSIONE del 18 marzo 2009
- [3] UNI 10819 “Guida alla limitazione del flusso luminoso emesso verso l’alto”, 1989
- [4] CIE 126 “Guide for minimising sky glow”, 1997
- [5] UNI EN 12464-2 “Illuminazione dei luoghi di lavoro all’aperto”, 2004
- [6] VITO “Public street lighting”, 2008
- [7] M. Bonomo, LUCE, 2004
- [8] L. Fellin, P. Iacomussi, G. Rossi, P. Soardo “PUBLIC LIGHTING - ANALYSIS OF ENVIRONMENT AND ENERGY CONSERVATION”, CIE Congress, San Diego, 2003
- [9] L. Fellin, P. Fiorentin, A. Scroccaro, Paola Iacomussi, G. Rossi, P. Soardo “LUMINOUS EMISSION AND ARTIFICIAL SKY LUMINANCE - THE CASE OF THE NORTH ITALIAN CITIES”, Lux Europa, 2005
- [10] Waldram JM. “The calculation of sky haze - luminance from street lighting”. Lighting Research and Technology 1972; 4: 21–2
- [11] R.H. Garstang, “The status and prospects of ground based observatory site “, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 27, 1989, 19-40.
- [12] CIE TC 4-21 “Revisione della pubblicazione CIE 126”, 20190
- [13] CIE publication 144 “Road surface and road marking reflection characteristics”,
- [14] Soardo P., Fellin L., Iacomussi P., Rossi G. “Compatibility of road lighting with star visibility”, Lighting Research and Technology, 4, p. 307-322, 2008
- [15] M.F. Walker, “The California Site Survey, Publ. Astron. Soc. Pacific”, 82, 19
- [4-16] P. Soardo, L. Fellin, P. Iacomussi, G. Rossi, “Weight on sky luminance and limiting magnitude of the light sources around a site”, Urban Nightscape, Athens, 2006
- [17] Soardo P., Fellin L. Iacomussi P., Rossi G. “A scientifically based analysis of the effects of town lighting on sky glow” CIE Session, Beijing, 2007
- [18] P. Iacomussi, G. Rossi, L. Fellin, P. Soardo “External lighting installations - Energy saving and environmental compatibility - Analysis of a territory around a site”, CIE TC 3-21, Budapest 2009