



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Contributo alla ricerca sperimentale su prodotti
innovativi, sviluppo di sistemi di controllo intelligenti,
misure di laboratorio

Maurizio Rossi, Fulvio Musante



TITOLO: CONTRIBUTO ALLA RICERCA SPERIMENTALE SU PRODOTTI INNOVATIVI, SVILUPPO
DI SISTEMI DI CONTROLLO INTELLIGENTI, MISURE DI LABORATORIO

Autori: Maurizio Rossi, Fulvio Musante (Dip. INDACO Politecnico di Milano)

Luglio 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



Indice

1. LE LINEE GUIDA E MISURE FOTOMETRICHE PER LO SVILUPPO DI NUOVI PRODOTTI CON SORGENTI LED	3
1.1 Sistemi ottici a riflessione	3
1.2 Sistemi ottici a rifrazione	5
1.3 Sorgente luminosa LED	9
1.4 La Temperatura di colore delle sorgenti LED	13
1.5 Ottica a rifrazione	17
1.6 Tipologia geometrica del supporto	23
1.7 Flusso luminoso di ciascun LED	23
1.8 Determinazione sperimentale del legame Flusso luminoso / Corrente	24
1.9 Design delle caratteristiche fotometriche dell'apparecchio	25
1.10 Design dell'apparecchio e inquinamento luminoso	30
1.11 Dissipazione termica	33
2. BENCHMARKING DEI PRODOTTI DI SENSORISTICA E CONTROLLO PER L'ILLUMINAZIONE PUBBLICA	36
2.1 Considerazioni generali sui sistemi di controllo dell'illuminazione pubblica	36
2.2 Sistemi dinamici di illuminazione	36
2.3 Esempi applicativi di sistemi di controllo adattivi	38
2.4 Benchmarking di prodotti per il controllo dinamico della pubblica illuminazione	48
2.4.1 Caratteristiche dei sistemi di gestione analizzati	49
2.4.2 Conclusioni ed osservazioni sui sistemi di controllo analizzati nel mercato statunitense	64
2.5 Il sistema di telecontrollo della Pubblica Illuminazione Milanese	65
2.6 Conclusioni sui sistemi di controllo dinamici	66
2.7 Sistemi di controllo e Mesopic Street Lighting	67



POLITECNICO DI MILANO
INDACO
DIPARTIMENTO DI
INDUSTRIAL DESIGN
DELLE ARTI
DELLA COMUNICAZIONE
E DELLA MODA

Accordo di collaborazione tra ENEA e Politecnico di Milano, Dipartimento INDACO per una attività di ricerca dal titolo: “Lighting Design negli Esterni Urbani“. Nell’ambito del programma MSE-ENEA Tema di ricerca 5.4.3.2 “Tecnologie per il risparmio elettrico nell’illuminazione pubblica”

Relazione relativa all’attività B: *Contributo alla ricerca sperimentale su prodotti innovativi, sviluppo di sistemi di controllo intelligenti, misure di laboratorio.*

Analisi delle problematiche inerenti lo sviluppo di nuovi sistemi di illuminazione nell’ambito dell’illuminazione pubblica. Nel dettaglio questo potrà riguardare le nuove sorgenti di luce LED, l’utilizzo di sensori e sistemi di controllo intelligenti per l’illuminazione pubblica e la possibilità di effettuare misure fotometriche su sistemi di illuminazione. Il risultato dalle attività del Dipartimento INDACO è questo documento che illustra:

- Le linee guida per lo sviluppo di nuovi prodotti con sorgenti LED innovative.
- Misure fotometriche su apparecchi di produzione industriale e/o prototipi per l’illuminazione pubblica.
- Benchmarking dei prodotti di sensoristica e controllo per l’illuminazione pubblica.

Milano, 30 luglio 2010

Firmato
Il responsabile della ricerca

Prof. Maurizio Rossi
Politecnico di Milano



1. Le linee guida e misure fotometriche per lo sviluppo di nuovi prodotti con sorgenti LED

Le ottiche stradali a LED si possono suddividere in tre grandi categorie:

- ✓ Ottiche a riflessione che utilizzano un solo LED (multi chip di elevata potenza) o più LED di potenza inferiore accoppiati a uno o più riflettori
- ✓ Ottiche a rifrazione, di cui si discuterà nel dettaglio nei paragrafi successivi
- ✓ Ottiche miste, cioè dei riflettori che controllano parte del flusso luminoso emesso dal LED e una lente per il controllo di quella frazione di radiazione luminosa che non è intercettata e controllata dal riflettore

1.1 Sistemi ottici a riflessione

Le ottiche a riflessione possono impiegare un solo LED multi chip di elevata potenza e un riflettore per ottenere la desiderata distribuzione degli illuminamenti sulla carreggiata; l'ottica per questo tipo di apparecchi deve essere attentamente studiata al fine di ottenere dei buoni risultati impiantistici.

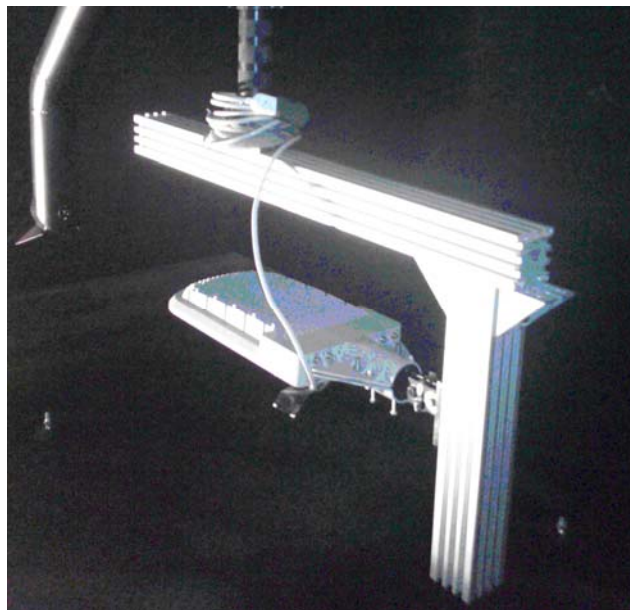


Figura 1 Apparecchio per illuminazione stradale a LED multi chip

La Figura 2 mostra un esempio di accoppiamento tra un'ottica tradizionale per lampade polverate (vapori di Hg) nella quale è stato inserito un LED multi chip da 75 W di potenza; come si può facilmente immaginare il risultato impiantistico di questo genere di apparecchi è alquanto scadente, in quanto l'apparecchio non distribuisce correttamente la luce in senso trasversale alla strada (curva 90-270) e non consente interdistanze di montaggio elevate (curva 0-180), ma concentrerà la luce prevalentemente al di sotto del palo.

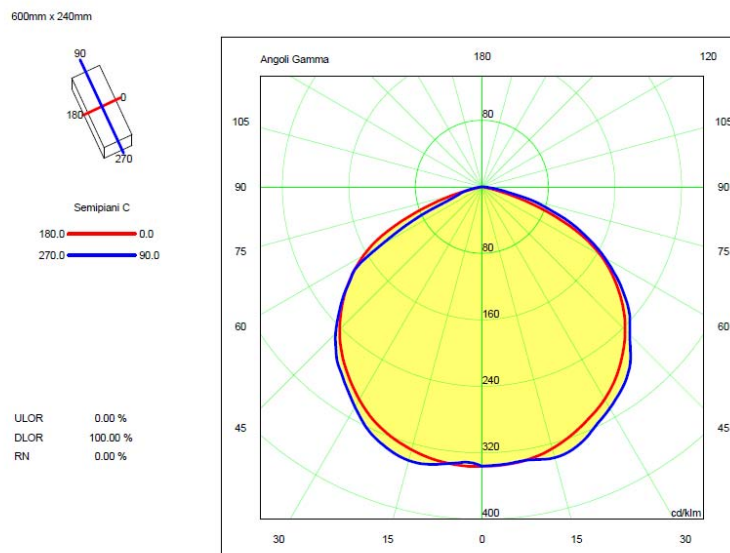


Figura 2 Apparecchio di illuminazione stradale con ottica multichip da 75W

Un altro approccio al problema prevede l'utilizzo di un certo numero di LED di piccola potenza (1.2 – 2.2 W), ciascuno accoppiato a un proprio riflettore, come mostrato nella Figura 3.

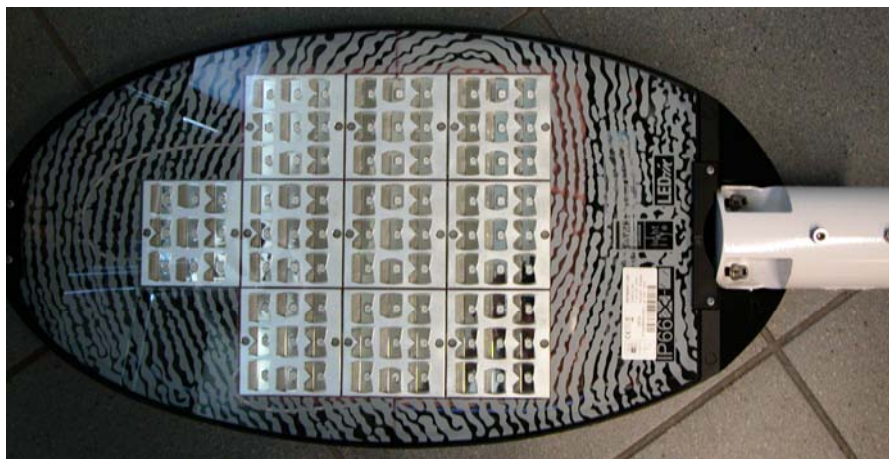


Figura 3 Apparecchio per illuminazione stradale a LED con ottiche riflettenti (Cortesia AEC)

In questo caso, le singole ottiche possono essere tutte identiche (magari variando solo l'orientamento di montaggio), oppure differenziate a seconda della particolare zona della strada che devono illuminare.

Come mostrato dalla Figura 4, in questo caso la distribuzione del flusso luminoso sulla carreggiata appare corretta, per un rapporto larghezza della carreggiata su altezza di installazione pari a 1, l'apparecchio emette verso la strada circa il 50% del flusso luminoso (con angolo di tilt=0°) e il 27-28% del flusso viene indirizzato verso il marciapiede.

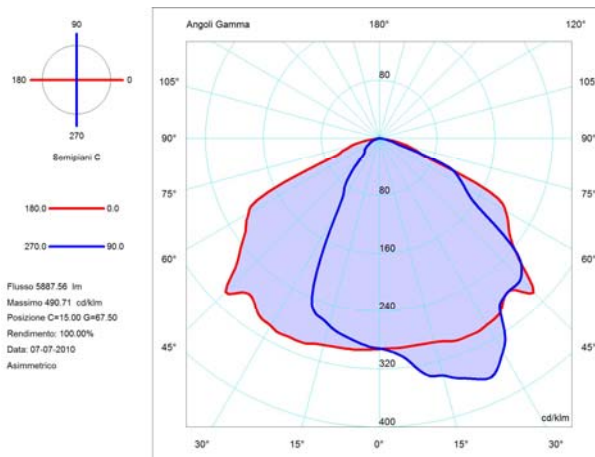


Figura 4 Indicatrici di emissione apparecchio AEC Led-in

1.2 Sistemi ottici a rifrazione



Nei sistemi a rifrazione l'ottica è suddivisa in due parti: un supporto che orienta nello spazio e sostiene le ottiche secondarie dei LED utilizzati (svolge anche una funzione di dissipatore) e un sistema costituito da un LED e da un'ottica secondaria di tipo TIR. Le principali soluzioni progettuali, ad oggi disponibili sul mercato, riguardano la progettazione di un supporto ottico con caratteristiche geometriche che possono essere classificate secondo tre tipologie principali: una geometria piana, ovvero che utilizza una disposizione dei LED su una superficie parallela al manto stradale, una geometria tridimensionale, che sfrutta le tre inclinazioni disponibili per disporre i LED nello spazio, ed infine, una geometria bidimensionale, che rappresenta un compromesso tra le due perché sfrutta le due inclinazioni dei LED per costruire il supporto delle ottiche.

Geometria piana

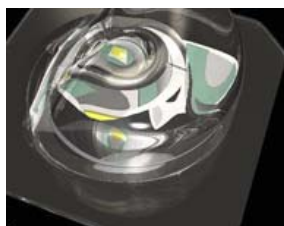


Figura 5 Light Bar di Ruud Lighting

Il supporto ottico prevede la disposizione dei LED e delle ottiche secondo un andamento piano non variando gli angoli del supporto ma, al contrario, variando le ottiche dei singoli LED secondo le caratteristiche dipendenti dalla fotometria desiderata.

In particolare, in questo esempio, Light Bar di Ruud Lighting, la fotometria dell'apparecchio deriva dalla progettazione, ad hoc, di un sistema di lenti che riescono a controllare il fascio luminoso del singolo LED e, quindi, dell'intero sistema. La tecnologia NanoOptic TM di Ruud Lighting assicura un elevato controllo dell'emissione luminosa e utilizza un'ottica con rifrattore a contatto diretto con il

LED chiamata NanoOptic, progettata specificatamente ed esclusivamente per questo apparecchio in funzione delle performance luminose richieste (fascio stradale, flood, ecc).

Un altro esempio di sistema ottico a LED piano, è offerto da Khatod, che propone i sistemi ottici della serie Galileo per applicazioni di illuminazione stradale (Figura 6). La Figura 7 riassume le caratteristiche fotometriche del prodotto che è costituito da una piastra dimensioni 500 mm x 300 mm circa, in grado di ospitare 60 LED. Lo schema di installazione e i risultati impiantistici ottenibili (i LED considerati hanno una emissione lambertiana con la dimensione del dome pari a 3 mm, emettono 100 lumen ciascuno e il flusso luminoso per apparecchio, nell'esempio impiantistico considerato, è pari a 6000 lm) sono riportati alla Figura 8.



Figura 6 Sistema ottico Khatod Galileo 56 LED (Cortesia Khatod)

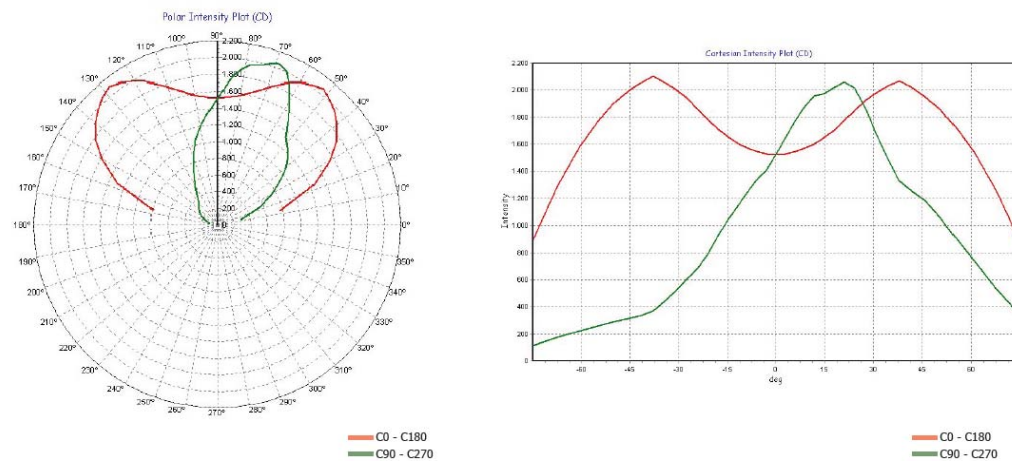


Figura 7 Indicatrici di emissione del sistema ottico Galileo 60 LEDs (Cortesia Khatod)

GAL22412DSP6 - Single Pole						
h (ft)	L (ft)	D (ft)	I (ft)	E _{max} (ftc)	E _{ave} (ftc)	N. of LEDs
6 mt (19,7)	20 mt (65,6)	6 mt (19,7)	--	62 lux (5,76)	24 lux (2,23)	60

GAL22412DSP6 - Double Pole						
h (ft)	L (ft)	D (ft)	I (ft)	E _{max} (ftc)	E _{ave} (ftc)	N. of LEDs
6 mt (19,7)	38 mt (124,7)	6 mt (19,7)	22 mt (72,2)	62 lux (5,76)	27 lux (2,51)	120

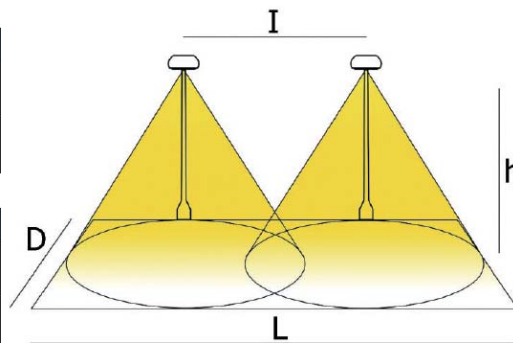


Figura 8 Risultati impiantistici del sistema Khatod Galileo 60 LEDs (Cortesia Khatod)



Geometria tridimensionale



Figura 9 Apparecchio Archilede di iGuzzini

Il supporto ottico, assume un andamento tridimensionale, offre la possibilità di inserire le ottiche e i LED secondo i tre assi in modo da poter indirizzare il flusso nello spazio in maniera più libera e mirata. In questo caso, si possono utilizzare ottiche progettate ad hoc o esistenti sul mercato, asimmetriche o simmetriche, variandone la tipologia e la disposizione sull'intero supporto in modo da ottenere la fotometria richiesta e le performance luminose adatte.

L'apparecchio di illuminazione stradale riportato in Figura 9, Archilede de IGuzzini per ENEL Sole, è un esempio di questa tipologia di supporto perché caratterizzato da una forma tridimensionale tale da poter regolare e dimensionare il fascio luminoso secondo le diverse esigenze impiantistiche. Le ottiche utilizzate e la loro disposizione nello spazio sono progettate ad hoc per questo prodotto.

Geometria bidimensionale

Questa tipologia di geometria si inserisce come compromesso tra le due precedenti e consiste nel poter variare l'inclinazione dei LED secondo due soli assi di cui, uno sia fisso, e dunque uguale per tutti, e gli altri siano modulati in base alle necessità illuminotecniche.

Questa particolare tipologia di supporto consente di disporre i LED lungo piastrine pre-assemblate e quindi, secondo una logica seriale e industriale: infatti, il montaggio su un'unica piastrina piana velocizza le operazioni di assemblaggio dei LED e dell'ottica su di un unico supporto e consente un margine di errore minore, oltre a garantire una maggiore affidabilità e durata delle connessioni elettriche.

Le ottiche utilizzate, al fine di poter raggiungere la fotometria richiesta, avranno distribuzioni fotometriche differenti: in particolare, in questo esempio specifico, si utilizzano tre ottiche diverse di cui una centrale e le altre due, asimmetriche, a destra e a sinistra.

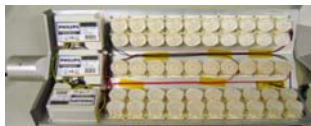
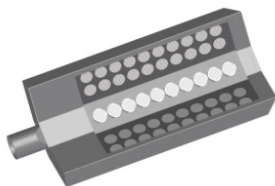


Figura 11 Apparecchio prototipo realizzato da Fraen in collaborazione con Philips

Un esempio di applicazione di geometria bidimensionale per il supporto delle ottiche è stato presentato da Fraen, azienda produttrice di ottiche per LED, in collaborazione con PHILIPS. In seguito si parlerà di questo apparecchio in maniera più approfondita.

L'apparecchio UrbanLED40 (Figura 13) risponde alle categorie illuminotecniche S e CE dove con CE sono indicati i requisiti illuminotecnici per le strade a traffico veicolare e pedonale dei centri cittadini (ove non possano essere applicate le categorie ME) e con S quelli relativi alle strade residenziali, piste ciclabili e parcheggi.

Class	Horizontal illuminance	
	\bar{E} in lx [minimum maintained]	U_0 [minimum]
CE0	50	0,4
CE1	30	0,4
CE2	20	0,4
CE3	15	0,4
CE4	10	0,4
CE5	7,5	0,4

Figura 10 Prestazioni illuminotecniche classi CE



Class	Horizontal illuminance	
	\bar{E} in lx ^a [minimum maintained]	E_{min} in lx [maintained]
S1	15	5
S2	10	3
S3	7,5	1,5
S4	5	1
S5	3	0,6
S6	2	0,6
S7	performance not determined	performance not determined

^a To provide for uniformity, the actual value of the maintained average illuminance may not exceed 1,5 times the minimum \bar{E} value indicated for the class.

Figura 12 Prestazioni illuminotecniche classi S



Figura 13 Apparecchio URBAN 40 (Cortesia FRAEN)

L'apparecchio utilizza in totale 40 LED LUXEON REBEL LUMILEDS alimentati a 550 mA ed un flusso luminoso totale di 3850 Lumen con un rendimento dell'apparecchio dell' 83%. L'apparecchio è posto su un palo di 6 metri di altezza su una carreggiata larga 6 metri con un interdistanza variabile di 18, 21, e 24 metri. Il braccio risulta inclinato di 15° (questo perché l'apparecchio è stato pensato per un mercato estero e quindi non rispondente alle leggi sull'inquinamento luminoso delle regioni d'Italia).

La Figura 14 riporta la curva fotometrica dell'apparecchio prototipo (i dati derivano dalla misurazione di un prototipo realizzato in collaborazione con Fraen e una ditta Portoghese che si è occupata dell'ingegnerizzazione dell'elemento e della produzione)

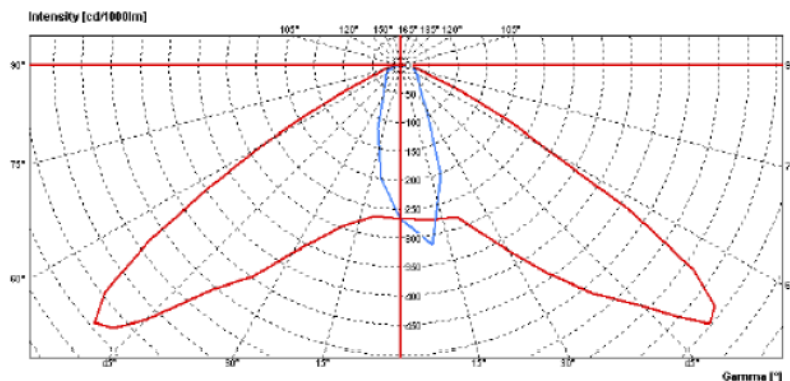


Figura 14 Curva fotometrica apparecchio URBANLED40 (Cortesia FRAEN)

La Figura 15 mostra la distribuzione degli illuminamenti ottenibili dall'apparecchio per un rapporto larghezza della carreggiata su altezza di montaggio pari a 1.

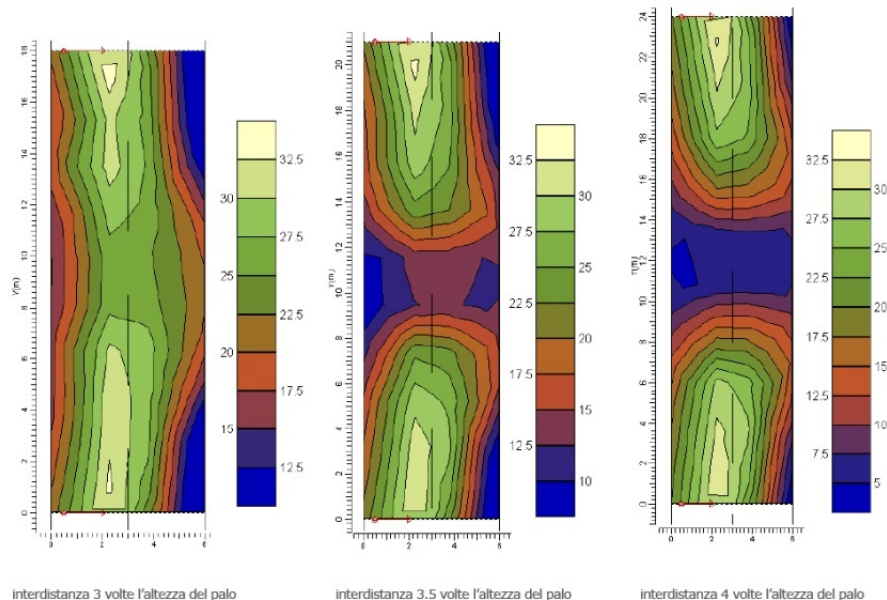


Figura 15 Curve isolux sulla strada dell'apparecchio URBANLED40 (Cortesia FRAEN)

1.3 Sorgente luminosa LED

La selezione della sorgente luminosa è il primo passo da compiere per la progettazione di un sistema ottico a LED.

La selezione deve scaturire da una comparazione tra i LED che tenga conto di diversi fattori :

- ✓ flusso luminoso emesso in condizioni di riferimento (per esempio $T_j=25^{\circ}\text{C}^1$ alla corrente di 350mA)
- ✓ performance luminose in funzione alla variazione di temperatura (tensione LED, resistenza termica giunzione solder-point).
- ✓ disponibilità di ottiche da utilizzare nel progetto.

In particolare una macroselezione può essere effettuata escludendo, in sede progettuale, le sorgenti LED multi-chip, preferendo a quest'ultime sorgenti LED mono chip. Questo per due ragioni fondamentali: la prima è la mancanza di ottiche a rifrazione adeguatamente sviluppate per questa tipologia di LED e la seconda è la difficoltà di gestire la temperatura di giunzione (T_j) dei LED in modo da poter garantire il funzionamento e una lunga durata.

Le considerazioni che seguono sono riferite ai risultati dei test eseguiti in laboratorio relativamente a tre modelli di LED di tre differenti costruttori (maggiormente utilizzati nelle applicazioni):

- ✓ LED OSRAM DRAGON LUW W5AM LX8F 5700K
- ✓ LUMILED REBEL
- ✓ CREE XP_G Cool White flux code R4



Figura 16 OSRAM Dragon LX8F 5700K

La misura fotometrica del LED OSRAM DRAGON LUW W5AM LX8F 5700K ha riportato un flusso luminoso di 114 lumen (nel datasheet la selezione LX8F garantisce un range di 112-130 lumen).

Qualche considerazione deve essere fatta anche riguardo le temperature di colore, la scelta è caduta su dispositivi i cui valori variassero tra i 4500K e 6500K.

¹ Di norma i produttori di LED forniscono il flusso luminoso del componente alla corrente nominale di 350 mA e alla temperatura di giunzione T_j pari a 25°C . Tale condizione si realizza eseguendo la misura di flusso luminoso in una sfera integratrice mediante un impulso di corrente della durata di 20-25 us, e quindi poco realistico rispetto alle normali condizioni di esercizio



Il LED OSRAM presenta una temperatura di colore di 5700K e, inserendosi quindi nel mezzo dei due valori, e può essere considerato un buon compromesso in termini di flusso luminoso, adeguato per l'utilizzo stradale.

Le misure fotometriche sui LED CREE e LUMILEDS sono state condotte su 3 campioni ciascuno costituito da una lente asimmetrica di produzione FRAEN (destra, centrale, sinistra) e da un LED Philips REBEL o CREE XP_G.

Ciascun campione è stato inizialmente misurato completo e successivamente è stata asportata la lente per la valutazione del flusso emesso dal LED singolo.

I LED singoli e i sistemi completi di lente sono stati montati su un dispositivo per la dissipazione del calore, i cui dettagli sono descritti al successivo paragrafo.

In questo modo è stato possibile valutare anche l'efficienza del sistema ottico, i cui risultati sono riportati nel seguito.

Lo scopo della misura del flusso emesso dalla singola sorgente è quello di determinare il flusso luminoso emesso dal dispositivo, in funzione della temperatura raggiunta dalla giunzione; il dato potrà essere poi impiegato nella successiva fase di progettazione del sistema ottico quando sarà necessario fissare il "punto di funzionamento termico" del dispositivo.

La misura è stata condotta nella camera fotometrica del Laboratorio Luce&Colore del Politecnico di Milano e presso il Laboratorio Oxytech alla temperatura di $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$; la Figura 17 mostra il setup utilizzato durante le misure.

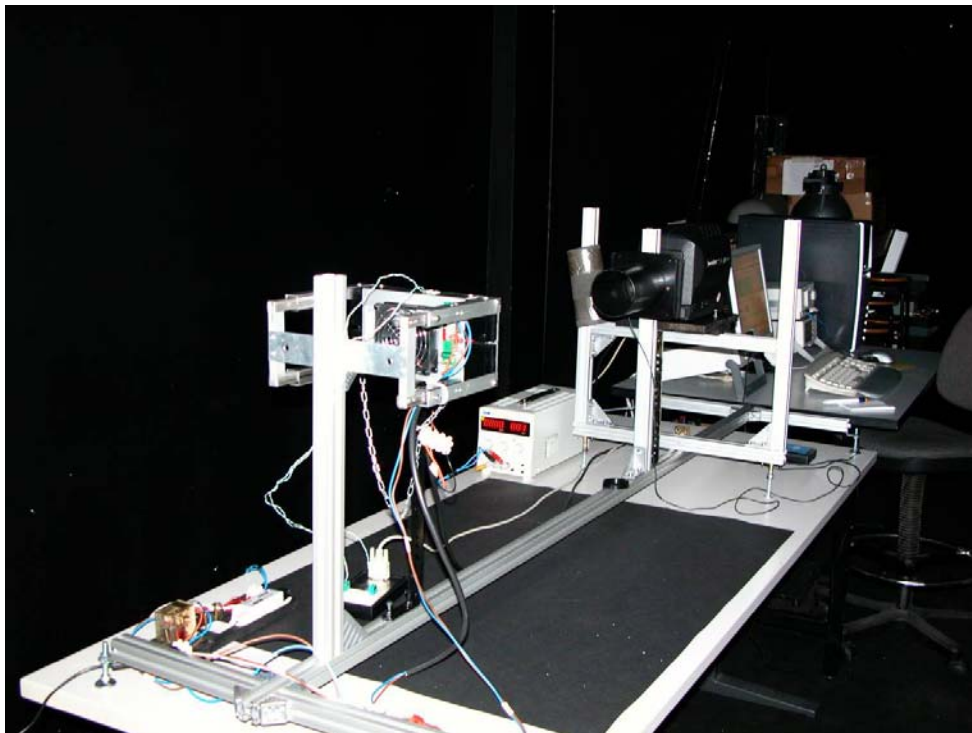


Figura 17 Apparato utilizzato durante le misure

L'apparato di misura è costituito da una Cella di Peltier e da un dissipatore di alluminio a convezione forzata.

La Cella di Peltier è stata fissata sul dissipatore mediante colla termo-conduttiva con conducibilità termica di 1.1 W/mK e sulla sommità della quale è stata fissata una piastrina di alluminio anodizzato dello spessore di 2-3 mm destinata ad ospitare i diversi LED sottoposti a prova.

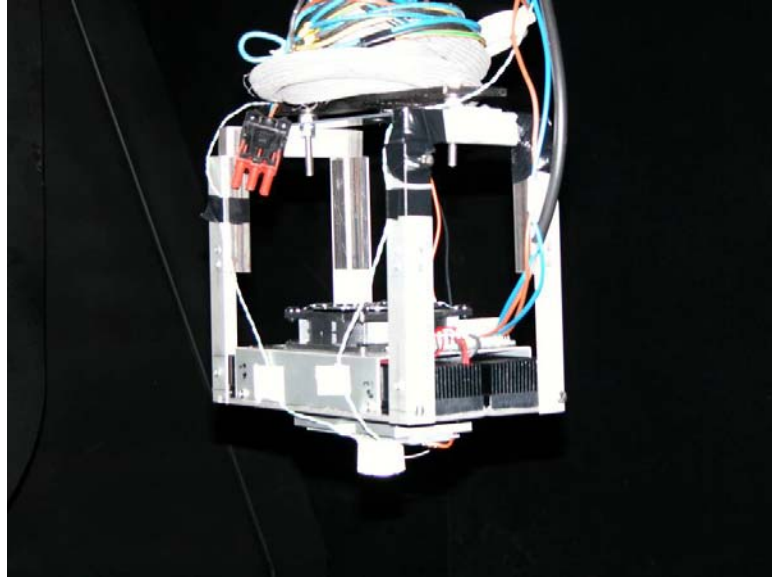


Figura 18 Particolare del montaggio della cella di Peltier, completa di LED, sul goniofotometro

La Cella di Peltier è stata alimentata a differenti valori di corrente (da 200 mA a 1400 mA nella modalità riscaldamento), come illustrato nelle tabelle allegate, mediante alimentatore di laboratorio TTI EX 355P 35V 5A.

L'emissione del dispositivo LED, alimentato alla corrente costante di 350 mA, 550mA, 700mA (Alimentatore ISO TECH tensione di uscita 0-40 V con risoluzione 10 mV, corrente 0-5A con risoluzione 2mA, regolazione della corrente di carico ≤ 5 mA e regolazione della corrente di linea $\leq 0.05\%$, ondulazione residua della tensione ≤ 20 mV rms e ondulazione residua della corrente ≤ 10 mA rms), a seconda delle indicazioni fornite dal costruttore, è stata rilevata da un luxmetro posto alla distanza di 0.76 m circa allineando la normale alla superficie emittente della lente con la normale alla superficie sensibile dello strumento (o la direzione di massima emissione del LED con la normale alla superficie sensibile dello strumento).

La misura dell'emissione luminosa è stata ripetuta più volte al variare della corrente di alimentazione della cella.

La temperatura superficiale della superficie di fissaggio del LED è stata registrata mediante due termocoppie di tipo J (Pico Logger TC08, ADC 16 bits e compensazione del giunto freddo incorporata, accuratezza $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$).

Per ogni valore di corrente imposto alla cella sono stati rilevati il valore della tensione ai capi del LED, della corrente di alimentazione e della potenza elettrica (Multimetro Yokogawa WT 130) la misura di illuminamento, la temperatura delle due termocoppie.

Le specifiche della strumentazione per la misura delle caratteristiche elettriche dei dispositivi in prova, è riportata nel seguito.

- ✓ accuratezza misura corrente e tensione $\pm(0.2\%$ della lettura + 0.2% del range)
- ✓ accuratezza misura potenza $\pm(0.3\%$ della lettura + 0.3% del range)

Lo strumento per la misura dell'illuminamento, dotato di un dispositivo per la limitazione dell'angolo solido di accettazione, utilizzato nel corso della prova è il seguente:

Luxmetro LMT pocket lux 2

Diametro dell'elemento sensibile 10 mm

f1 in accordo con la DIN 5032 part 6 :1.8%

f2 : 0.9%

f3<0.1% ± 1 digit



Tutte le rilevazioni sono state fatte in condizioni di regime termico, ad ogni cambiamento del valore della corrente della Cella di Peltier si è atteso 15 minuti prima di effettuare la lettura delle diverse grandezze monitorate.

Nelle 6 tabelle seguenti, sono riportati i valori di flusso e di temperatura misurati nelle condizioni sopra descritte.

Mediante interpolazione lineare dei risultati acquisiti è stato determinato il flusso luminoso emesso a $T_j=65^\circ$, sia per il singolo LED, sia per il sistema LED+lente.

Cold Junction	Channel 1	Channel 2	Peltier Voltage	Peltier Current	Luxmeter	Temp Giunzione	Corrente Cella Nominale	Posizione Switch	Time	Led Voltage	Led Current	Led Power	Flusso	Flusso 65°C
(degC)	(degC)	(degC)	(V)	(A)	(V)	(deg C)	(A)	(Caldo/Freddo)		(V)	(A)	(W)	(lm)	(lm)
23.28	24.71	24.92	00.00V	0.00I	0.07064	31.115	0.00	Caldo	10:02:40	2.98	0.348	1.04	126.25	120.16
23.43	26.98	29.1	01.80V	0.20I	0.07037	35.34	0.20	Caldo	10:18:13	2.97	0.348	1.03	125.76	
23.38	33.33	33.26	03.80V	0.40I	0.06994	39.695	0.40	Caldo	10:33:42	2.95	0.348	1.03	124.99	
23.54	38.17	38.02	05.40V	0.50I	0.06938	44.395	0.50	Caldo	10:49:12	2.93	0.348	1.02	123.99	
23.49	43.18	43.07	07.30V	0.80I	0.06891	49.425	0.80	Caldo	11:04:41	2.91	0.348	1.01	123.15	
23.64	48.98	48.67	09.40V	1.00I	0.06833	55.125	1.00	Caldo	11:20:10	2.9	0.348	1.01	122.12	
23.62	54.95	54.42	11.50V	1.20I	0.0677	60.985	1.20	Caldo	11:35:40	2.88	0.348	1.00	120.97	
23.77	61.64	61.27	13.80V	1.40I	0.0669	67.755	1.40	Caldo	11:51:22	2.86	0.348	1.00	119.60	
						#DIV/0!	1.60	Caldo						
Rheta C/W														
6														
Corrente Led (mA)	Tensione Led (V)	Potenza (W)												
350	3.00	1.05												
Flusso (lm)														
125.87														
23.72	25.39	25.61	00.00V	0.00I	0.07043	31.8	0.00	Spento	12:23:36	2.98	0.348	1.04		

Figura 19 Flusso luminoso emesso in funzione delle temperatura per il Led CREE XP_G alimentato a 350mA

Cold Junction	Channel 1	Channel 2	Peltier Voltage	Peltier Current	Luxmeter	Temp Giunzione	Corrente Cella Nominale	Posizione Switch	Time	Led Voltage	Led Current	Led Power	Flusso	Flusso 65°C
(degC)	(degC)	(degC)	(V)	(A)	(V)	(deg C)	(A)	(Caldo/Freddo)		(V)	(A)	(W)	(lm)	(lm)
24.02	26.13	26.49	00.10V	0.00I	0.10351	36.506	0.00	Caldo	13:25:13	3.1	0.547	1.70	185.30	177.10
24.1	30.33	30.4	01.80V	0.20I	0.10299	40.661	0.20	Caldo	13:40:45	3.08	0.545	1.69	184.37	
24.04	34.62	34.62	03.60V	0.40I	0.10237	44.916	0.40	Caldo	13:56:15	3.06	0.545	1.68	183.26	
24.16	39.53	39.48	05.50V	0.50I	0.10168	49.801	0.50	Caldo	14:11:44	3.05	0.545	1.67	182.02	
24.11	44.64	44.46	07.50V	0.50I	0.10077	54.846	0.50	Caldo	14:27:14	3.03	0.545	1.56	180.39	
24.24	50.43	50.08	09.50V	1.00I	0.09978	60.551	1.00	Caldo	14:42:43	3.01	0.547	1.65	178.62	
24.18	56.27	55.72	11.70V	1.20I	0.0987	66.291	1.20	Caldo	14:58:12	2.99	0.547	1.64	176.65	
						#DIV/0!	1.40	Caldo						
						#DIV/0!	1.60	Caldo						
Rheta C/W														
6														
Corrente Led (mA)	Tensione Led (V)	Potenza (W)												
550	3.12	1.716												
Flusso (lm)														
185.12														
24.32	26.89	27.21	00.10V	0.00I	0.10341	37.346	0.00	Spento	15:40:40	3.09	0.548	1.69		

Figura 20 Flusso luminoso emesso in funzione delle temperatura per il Led CREE XP_G alimentato a 550mA

Cold Junction	Channel 1	Channel 2	Peltier Voltage	Peltier Current	Luxmeter	Temp Giunzione	Corrente Cella Nominale	Posizione Switch	Time	Led Voltage	Led Current	Led Power	Flusso	Flusso 65°C
(degC)	(degC)	(degC)	(V)	(A)	(V)	(deg C)	(A)	(Caldo/Freddo)		(V)	(A)	(W)	(lm)	(lm)
23.66	26.47	26.76	00.10V	0.00I	0.12609	40.055	0.00	Caldo	10:24:52	3.17	0.698	2.21	224.29	215.02
23.81	30.73	30.51	01.80V	0.20I	0.12538	44.26	0.20	Caldo	10:40:25	3.15	0.697	2.20	223.03	
23.73	34.84	34.93	03.60V	0.40I	0.12457	48.325	0.40	Caldo	10:55:54	3.14	0.698	2.19	221.59	
23.85	39.64	39.6	05.50V	0.50I	0.12356	53.05	0.50	Caldo	11:11:23	3.12	0.697	2.18	219.79	
23.77	44.75	44.51	07.40V	0.50I	0.12244	58.07	0.50	Caldo	11:26:53	3.1	0.697	2.16	217.80	
23.95	50.7	50.5	09.50V	1.00I	0.12114	64.04	1.00	Caldo	11:42:22	3.08	0.697	2.15	216.49	
23.87	56.68	56.2	11.70V	1.20I	0.1196	69.88	1.20	Caldo	11:57:52	3.06	0.698	2.14	212.68	
						#DIV/0!	1.40	Caldo						
						#DIV/0!	1.60	Caldo						
Rheta C/W														
6														
Corrente Led (mA)	Tensione Led (V)	Potenza (W)												
700	3.20	2.24												
Flusso (lm)														
224.06														
24.06	27.37	27.7	00.10V	0.00I	0.12596	40.975	0.00	Spento	12:29:32	3.17	0.697	2.21		

Figura 21 Flusso luminoso emesso in funzione delle temperatura per il Led CREE XP_G alimentato a 700mA



Lo scopo di questi studi è quello di valutare in maniera quantitativa l'impatto dell'illuminazione pubblica con differenti distribuzioni spettrali, sul sistema circadiano umano.

Nel seguito, si darà brevemente conto del metodo seguito dagli autori per la valutazione dell'impatto dell'illuminazione stradale a LED e sui primi risultati raggiunti, con la definizione di una soglia cautelativa di esposizione.

Il modello di Rea et al.⁴ è stato utilizzato per valutare la stimolazione circadiana, espressa in termini di soppressione della melatonina per effetto dell'esposizione alla luce, per 4 sorgenti tipicamente impiegate nella illuminazione stradale, andando a considerare una serie di scenari realistici.

Nelle condizioni esaminate 3 tre delle 4 sorgenti non stimolano significativamente il sistema circadiano umano dopo un'ora di esposizione; mentre la sorgente LED a 6900 K sembra avere un piccolo effetto stimolante dopo un'ora di esposizione (corrispondente al 3%-10% di soppressione della melatonina notturna).

La Figura 25 mostra l'irradianza spettrale delle 4 sorgenti esaminate a 95 lux e più precisamente:

- ✓ Cool-white LED (CCT 5200K)
- ✓ Cool-white LED (CCT 6900K)
- ✓ Lampada al sodio ad alta pressione (CCT 2050 K)
- ✓ Lampada ad alogenuri metallici (CCT 4000K)

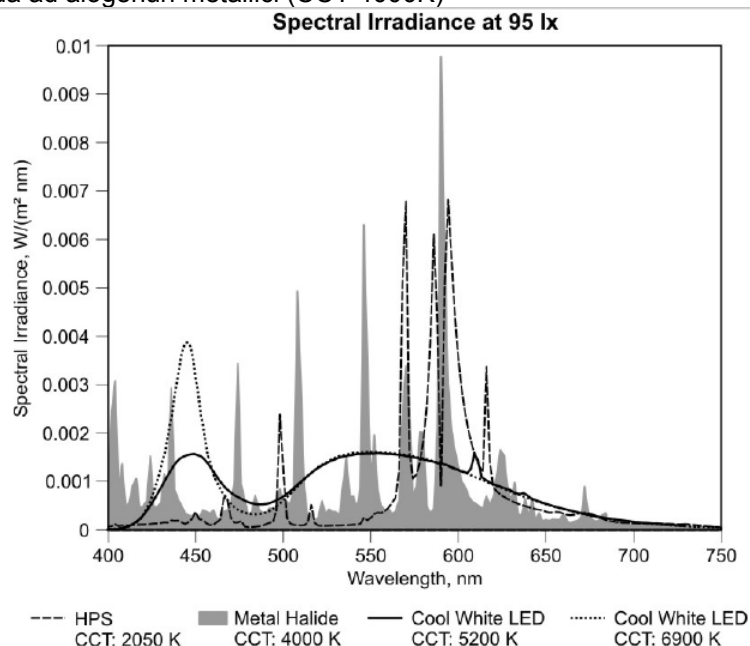


Figura 25 Irradianze spettrali delle 4 sorgenti considerate che producono un illuminamento fotografico di 95 lux

Utilizzando il modello di foto trasduzione di Rea et al. (2005)⁵ è possibile comparare l'efficacia delle diverse sorgenti ad una determinata irradianza nel sopprimere la produzione di melatonina notturna per una fissata dimensione dell'area pupilla⁶.

L'area della pupilla per una popolazione giovane (17-25 anni di età) può essere determinata, all'interno di un range limitato di livelli di irradianza alla cornea, attraverso il modello pubblicato da Berman (1992).

La determinazione dell'area delle pupilla e della trasmittanza oculare, consente di calcolare l'irradianza spettrale sulla retina che costituisce lo stimolo per il sistema circadiano umano.

⁴ M. Rea, M. Figuerio, J. Bullough, A. Bierman, "A model of phototransduction by the human circadian system" *Brian Research Reviews* 50(2):213-228.

⁵ Il dettaglio del calcolo dell'indice CS è disponibile on line al seguente indirizzo: <http://www.jcircadianrhythms.com/content/8/1/2/additional>

⁶ Berman, S.M., Fein, G., Jewett, D.L., Saika, G. and Ashford, F., "Spectral Determinants of Steady-State Pupil Size with Full Field of View", *JIES*, 21(2): 3-13.

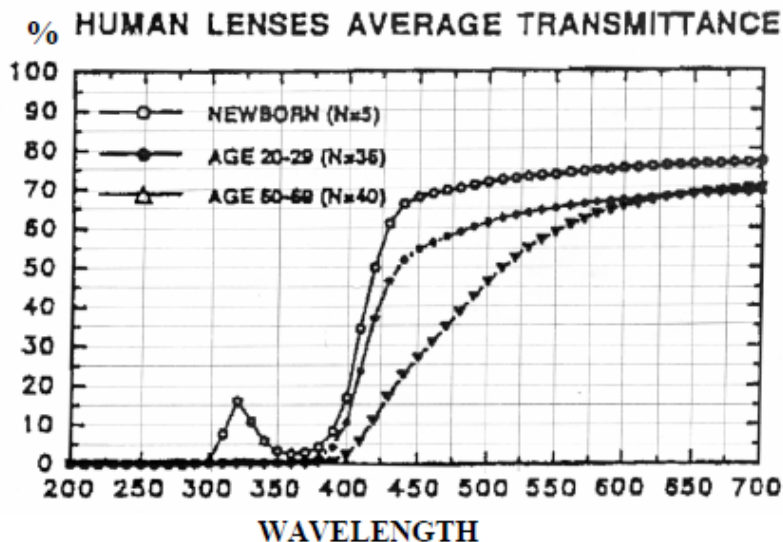


Figura 26 Trasmissione media dell'occhio umano per 3 diverse età; con il progredire dell'età, si riduce la trasmittanza nella banda 400-450 nm, diminuendo così l'effetto dello stimolo sul sistema circadiano⁷.

L'autore ha considerato tre diversi scenari per le sue valutazioni:

- ✓ Condizione di riferimento, simile a quella realizzabile in laboratorio in condizioni controllate
- ✓ Due condizioni realistiche a cui possono essere soggetti individui esposti agli "effetti" sul sistema circadiano di un impianto di illuminazione pubblica

Per questi 3 valori di irradianza, (corrispondenti a un illuminamento fotopico di 95 lux, 27 lux e 18 lux), assumendo una esposizione di 1 h, è possibile stabilire il grado di stimolazione del sistema circadiano di un individuo di 20 anni, definito in termini operativi mediante la percentuale di soppressione di melatonina.

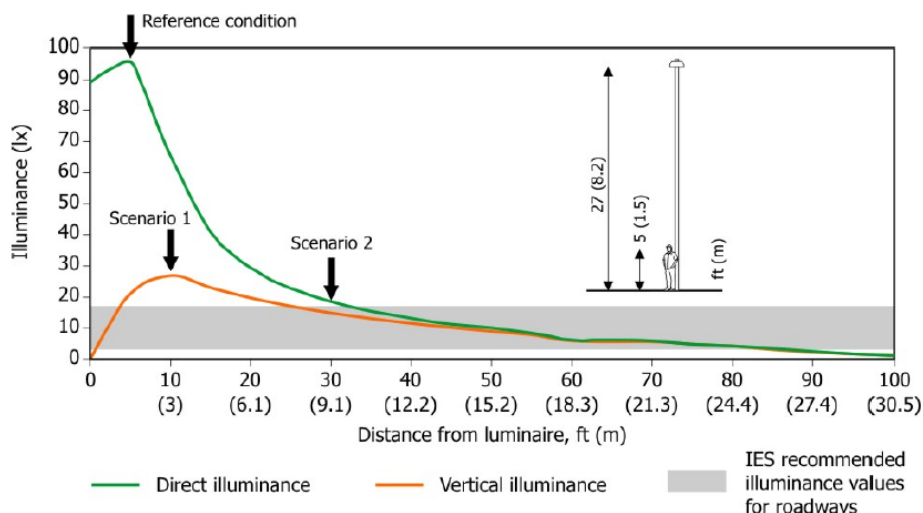


Figura 27 La figura rappresenta la condizione di riferimento e i due scenari realistici per il calcolo della stimolazione del sistema circadiano. Ai fini del calcolo, ciascuna sorgente considerata ha una potenza nominale di 150 W e una distribuzione fotometrica di tipo III; l'apparecchio risulta installato a 8.2 m dal suolo e l'osservatore è posto a 1.50 m dal suolo. In colore rosso è rappresentato l'andamento dell'illuminamento verticale a diverse distanze dal palo, mentre in verde è rappresentato l'illuminamento orizzontale, espresso in lux.

⁷ F. Baker, Brainard GC, "The direct spectral transmittance of excised human lens as function of age", FDA 785345 0090 RA, US Food and Drug Administration:Washington DC.



Lo scenario 1 corrisponde a un individuo che osserva ciascun apparecchio dell'installazione (altezza apparecchi 8.2 m) da un'altezza di 1.50 dal suolo nel centro dell'area luminosa. L'illuminamento alla cornea è stimato in 95 lux.

Lo scenario 2 rappresenta la medesima persona che guarda in basso verso la strada a 3 m di distanza dal palo, dove l'apparecchio produce il massimo valore di illuminamento verticale raggiungendo 27 lux alla cornea.

L'ultimo scenario considerato prevede che lo stesso osservatore sia distante 10 m dal palo e guardi direttamente l'apparecchio, producendo un illuminamento sulla cornea pari a 18 lux.

I risultati ottenuti sono sintetizzati dal grafico della Figura 28; sulla base dei tracciati della figura si può affermare che tre delle quattro sorgenti non hanno stimolato in maniera significativa la soppressione della melatonina nei due scenari realistici, dopo 1h di esposizione.

Per la sorgente LED a 6900 K, il modello prevede un piccolo effetto stimolante dopo una esposizione di 1h, corrispondente alla soppressione dal 3 al 10% della melatonina notturna.

Nella condizione di riferimento, la melatonina dovrebbe essere soppressa in misura del 6% per la lampada HPS, 14% per la lampada MH, 19% per il LED a 5700K e 30% per la sorgente LED a 6900 K

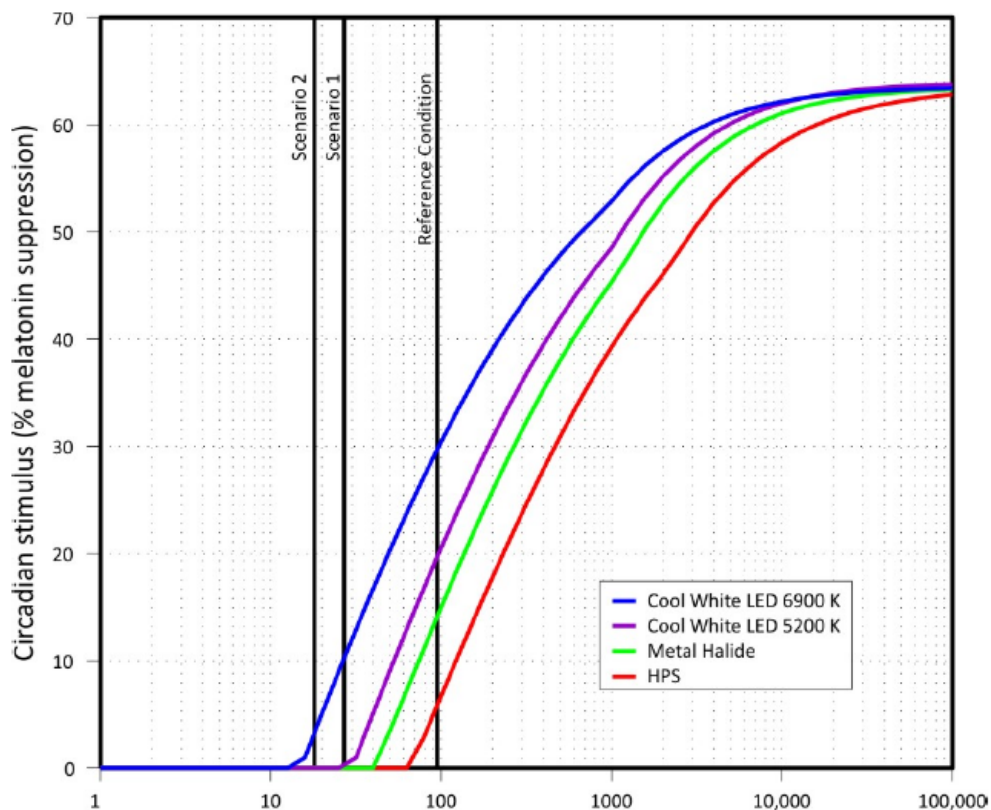


Figura 28 Soppressione della melatonina (in termini percentuali) dovuta alla risposta del sistema circadiano umano all'esposizione per 1h a due sorgenti LED (cool-white), una lampada HPS e una lampada ad alogenuri metallici, in funzione dell'illuminamento fotopico alla cornea.

La conclusione a cui giungono gli autori dello studio possono essere sintetizzate nei seguenti punti:

- ✓ Il calcolo si basa sullo stato dell'arte circa il legame tra luce e soppressione della produzione notturna di melatonina;
- ✓ L'analisi presenta alcune limitazioni dovute all'incerto legame causa-effetto tra esposizione alla luce della retina nelle ore notturne e salute umana;
- ✓ Le conoscenze attuali sono in grado di prevedere in modo quantitativo, come la luce condizioni il sistema circadiano umano, ma non siamo ancora in grado di



- comprendere completamente, come e se, la luce può condizionare la salute umana attraverso il sistema circadiano.
- ✓ Una soglia cautelativa ragionevole per la soppressione della produzione notturna di melatonina, potrebbe essere 30 lux alla cornea di luce bianca per 30 minuti. Il valore dovrebbe produrre, in base alle stime degli autori descritte precedentemente, una riduzione di melatonina notturna del 15% o più. Come mostrato nell'articolo, la soglia, come si è visto dalla Figura 28, dovrebbe dipendere dalla composizione spettrale della luce bianca considerata.

Sulla base delle informazioni ad oggi disponibili nella letteratura scientifica, il limite a 4000K imposto alla temperatura di colore delle sorgenti LED dalla proposta di modifica della legge n 17/2000 della Regione Lombardia appare non giustificabile e potrebbe rappresentare un serio limite allo sviluppo applicativo di questa tecnologia (solo con attento monitoraggio delle installazioni di apparecchi a LED, sarà possibile avere in futuro dati per realizzare prodotti di migliore qualità ed efficienza).

Occorre inoltre considerare che oltre a considerazioni di efficienza energetica, la scelta della temperatura di colore delle sorgenti non può prescindere da condizioni del contesto in cui l'apparecchio e l'impianto si inseriscono; questa flessibilità di progetto mal si accompagna con vincoli rigidi che alcune legislazioni regionali vorrebbero introdurre.

1.5 Ottica a rifrazione

Per quanto concerne la selezione delle ottiche, la scelta prioritaria che il progettista deve compiere è quella di decidere se realizzare un'ottica ad hoc, oppure se utilizzarne una già pre-esistente sul mercato. La scelta del fornitore è in parte condizionata dalla disponibilità sul mercato di ottiche adatte al modello di LED prescelto.

Si deve, in questo contesto, sottolineare che la maggior parte dei dati reperibili riguardanti la fotometria del LED e dell'ottica, sono dei file di simulazione e quindi, si rende necessaria la costruzione di un prototipo di studio, al fine di testare e comparare i dati simulati con quelli reali misurabili in laboratorio.

La selezione della lente utilizzata per il progetto ottico può essere influenzata, inoltre, da un terzo elemento: la possibilità di collaborazione nello sviluppo del progetto e in termini di realizzazione di un eventuale prototipo di studio o componenti custom, da parte dell'azienda produttrice.

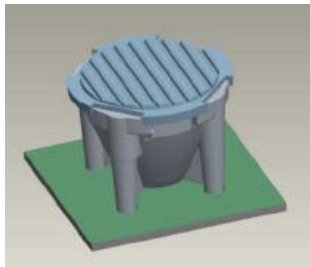


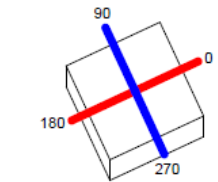
Figura 29 Modello 3D ottica Fraen

La Figura 29 mostra un prodotto di produzione FRAEN dedicato alla realizzazione di ottiche stradali; in particolare, si tratta di tre lenti, due asimmetriche, destra e sinistra e una centrale, studiate in modo tale da indirizzare la luce su target predefiniti sulla strada. La geometria dell'ottica è caratterizzata principalmente da due lenti: la prima lente è un collimatore e varia a seconda del LED utilizzato, mentre la seconda lente funge da elemento caratterizzante per il controllo del flusso (destra, centro o sinistra) e ha una fotoincisione superficiale allo scopo di aumentare l'uniformità del flusso di luce uscente.

La distribuzione dei diversi tipi di ottica FRAEN, per la corrente di 350mA, sono riportate alla Figura 30, alla Figura 31, e alla Figura 32.



35mm x 35mm



C Halfplanes
180.0 — 0.0
270.0 — 90.0

ULOR 0.00 %
DLOR 100.00 %
RN 0.00 %

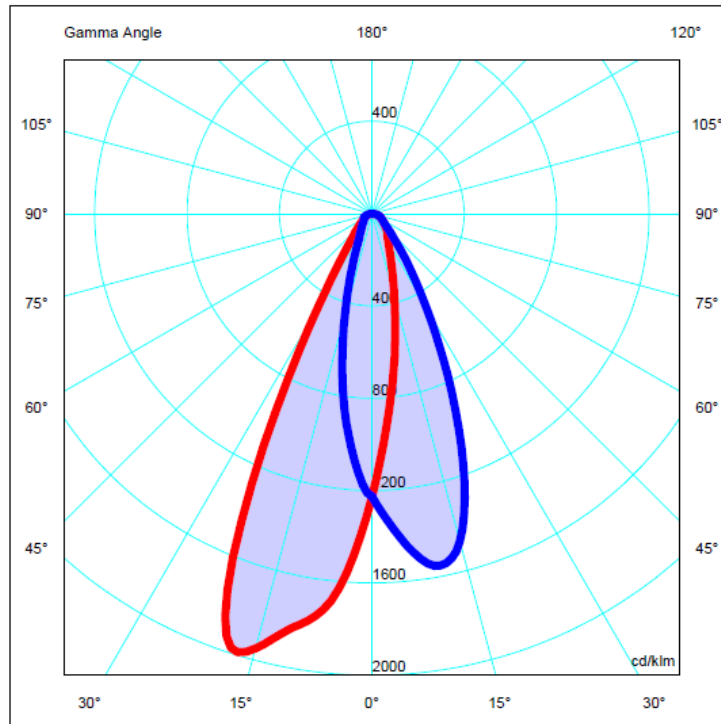
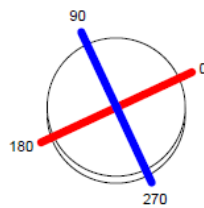


Figura 30 Emissione ottica Destra (LED CREE XP_G) alla corrente di 350mA

Diam=35mm



C Halfplanes
180.0 — 0.0
270.0 — 90.0

ULOR 0.00 %
DLOR 99.99 %
RN 0.00 %

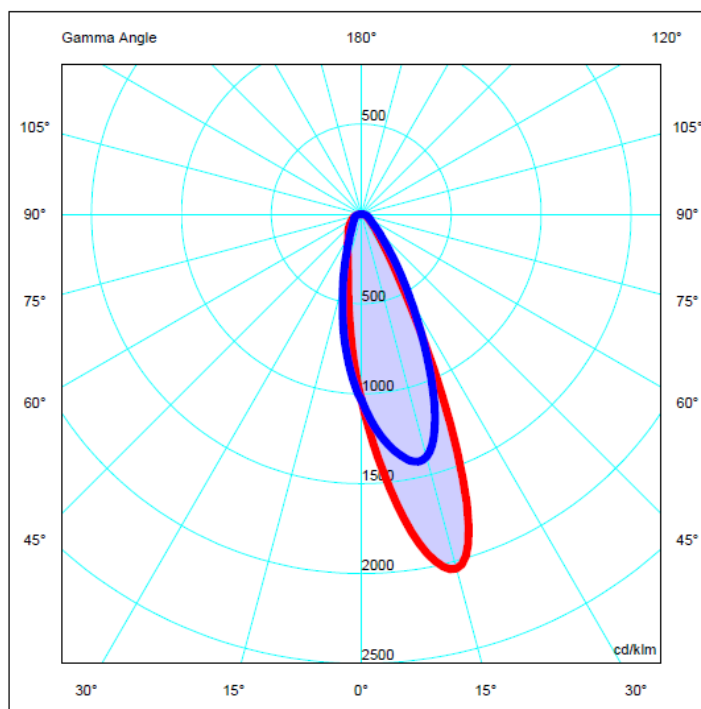


Figura 31 Emissione ottica Sinistra (LED CREE XP_G) alla corrente di 350mA

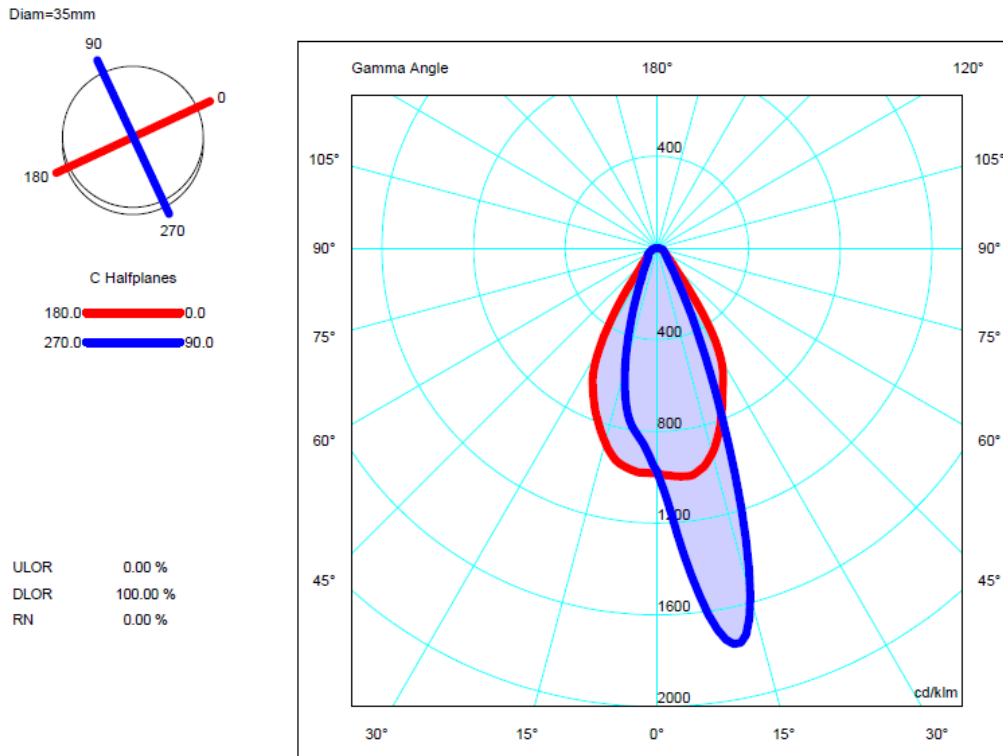


Figura 32 Emissione ottica Centrale (LED CREE XP_G) alla corrente di 350mA

L'efficienza di ciascuna ottica è stata determinata come rapporto tra il flusso luminoso emesso dal sistema lente e LED e da quello emesso dal solo LED, alle diverse correnti di funzionamento.

I flussi sono stati ottenuti da integrazione del solido fotometrico (misurato sul Goniofotometro a specchio del Politecnico di Milano e sul gonio T3 della società Oxytech), rilevato secondo le seguenti modalità:

- ✓ Esplorazione del solido fotometrico secondo il sistema di coordinate angolari C- γ a passi costanti per l'angolo C, con $\Delta C=10^\circ$ e passo su angolo γ variabile con $\Delta \gamma =1^\circ$ fino $\gamma =50^\circ$ e $\Delta \gamma =2.5^\circ$ fino a $\gamma =90^\circ$
- ✓ La misura è stata effettuata al raggiungimento delle condizioni di equilibrio termico si intende raggiunto quando le letture fotometriche e la potenza elettrica effettuate in un intervallo di 30' con passo di campionamento di 5s, non differiscono tra loro più dell'1%.

Le due tabelle che seguono, illustrano i risultati ottenuti per ciascuna tipologia di lente (destra, centrale, sinistra) in riferimento ai due LED considerati.

LED	Ottica	Corrente	Rendimento	Lm/W solo LED	Flusso Led+Ottica Misurato Tj=65°C	Flusso Led Tj=65°C*Rendimento Ottica	Diff perc%
PHILIPS Rebel	Destro	350 mA	91.75	99.25	89.63	90.41	0.88
PHILIPS Rebel	Destro	550 mA	91.17	87.42	129.35	130.04	0.53
PHILIPS Rebel	Destro	700 mA	90.85	80.92	156.40	157.05	0.42
PHILIPS Rebel	Centrale	350 mA	90.71	96.81	87.29	88.14	0.97
PHILIPS Rebel	Centrale	550 mA	90.41	85.51	126.92	127.72	0.63
PHILIPS Rebel	Centrale	700 mA	90.50	79.03	153.55	154.81	0.82
PHILIPS Rebel	Sinistro	350 mA	90.94	93.82	86.81	87.38	0.67



PHILIPS Rebel	Sinistro	550 mA	90.71	82.66	126.08	126.75	0.53
PHILIPS Rebel	Sinistro	700 mA	90.59	76.49	152.74	153.83	0.71

Figura 33 Rendimenti ottiche per LED Rebel (Cortesia FRAEN Corporation)

Led	Ottica	Corrente	Rendimento	Lm/W solo LED	Flusso Led+Ottica Misurato Tj=65°C	Flusso Led Tj=65°C*Rendimento Ottica	Diff perc%
CREE XP_G	Destro	350 mA	87.29	116.16	100.87	102.73	1.85
CREE XP_G	Destro	550 mA	88.87	103.26	152.28	153.22	0.62
CREE XP_G	Destro	700 mA	89.20	95.33	183.01	186.20	1.75
CREE XP_G	Centrale	350 mA	90.29	121.37	108.20	108.49	0.27
CREE XP_G	Centrale	550 mA	90.17	109.32	157.72	159.69	1.25
CREE XP_G	Centrale	700 mA	89.70	101.41	190.59	192.88	1.21
CREE XP_G	Sinistro	350 mA	88.56	110.42	100.16	101.74	1.58
CREE XP_G	Sinistro	550 mA	88.80	97.28	147.03	148.61	1.08
CREE XP_G	Sinistro	700 mA	88.16	90.12	178.10	179.84	0.98

Figura 34 Rendimenti ottiche per LED CREE XP_G(Cortesia FRAEN Corporation)

I valori dei flussi luminosi emessi dal LED ($T_j=65^\circ\text{C}$) ricavati moltiplicando il flusso luminoso del LED singolo ($T_j=65^\circ\text{C}$) per il rendimento del sistema ottico, risultano essere in buon accordo con i valori ricavati dalla misura.

Le dimensioni delle ottiche FRAEN risultano particolarmente "evidenti", soprattutto comparandole con le micro ottiche che iniziano a diffondersi sul mercato (vedi Figura 35): di contro, il valore aggiunto di queste ottiche è, da un lato, l'efficienza del prodotto e dall'altro la possibilità di personalizzare la distribuzione luminosa secondo le esigenze specifiche dell'applicazione.



Figura 35 A sinistra Osram Dragon Plus Oval. A destra Ottiche LEDIL STRADA-T-DW-XP LENSES per CREE XP-E LEDs

L'utilizzo di micro ottiche integrate o meno con i LED, consente di progettare prodotti dal design più accattivante (si veda, ad esempio, il gruppo ottico Figura 37), ma pongono qualche limitazione circa le performance luminose dato che tutta la distribuzione fotometrica risultante è quella della singola ottica (si veda per esempio la Figura 36), opportunamente "scalata" in funzione del numero di LED impiegati; l'unico grado di libertà lasciato al progettista è



possibilità di ruotare il sistema LED+Lente lungo l'asse verticale, come proposto nello schema della Figura 37.

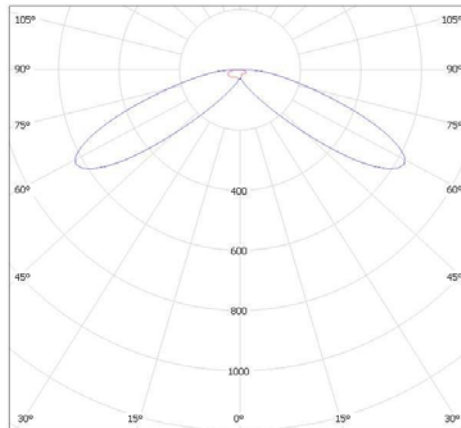


Figura 36 Indicatrici di emissione LEDIL STRADA-T-DW-XP LENSES per CREE XP-E LEDs (Cortesia LEDIL)

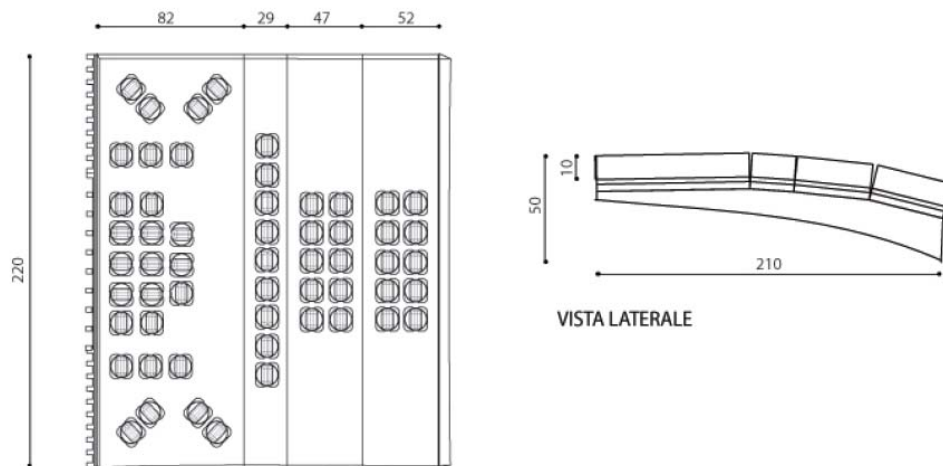


Figura 37 Schema Apparecchio per illuminazione stradale che utilizza 91 LED OSRAM Dragon Plus OVAL (classe ME4b)⁸. Le dimensioni del disegno sono espresse in mm.

⁸ Tesi di Laurea di Felicetta di Nardo, "Illuminazione Urbana e Qualità dello spazio pubblico", anno accademico 2009/2010, Politecnico di Milano, Facoltà del Design, Corso di Laurea specialistica in Disegno Industriale.

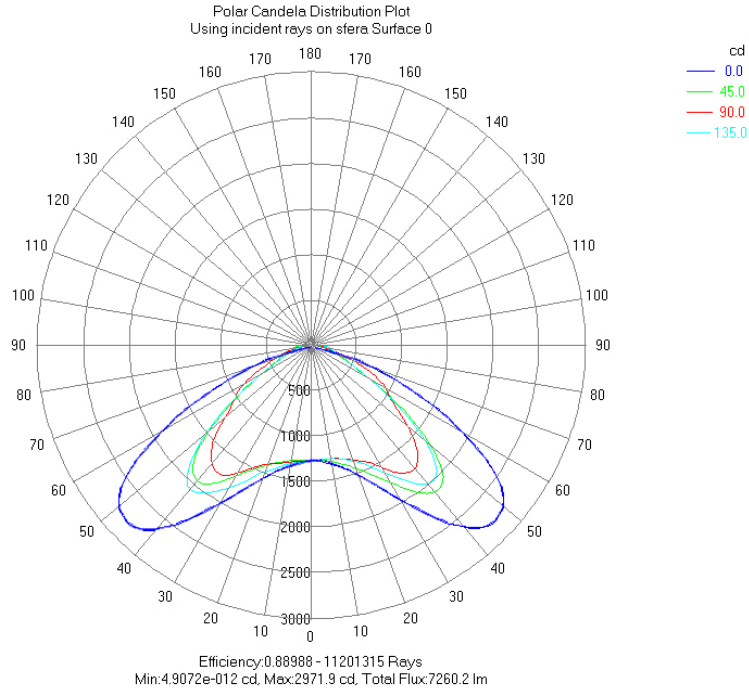


Figura 38 Indicatrici di emissione apparecchio stradale che utilizza 91 LED OSRAM Dragon Plus OVAL (simulazione con TracePro)

La Figura 39 mostra un apparecchio commerciale che utilizza LED con ottica incorporata alla temperatura correlata di colore di 4300K, alimentati alla corrente di 350mA. Il dispositivo è idoneo all'illuminazione delle piste ciclabili delle aree perdonali e prevede una altezza di installazione compresa tra 4 e 5 m. Il prodotto è disponibile in due taglie 33 W con 24 LEDS e 60W con 48 LEDS.



Figura 39 Apparecchio Eclatec Pixel S 24/48 LED (Cortesia Eclatec)

Pixel S - 24/48 LEDs

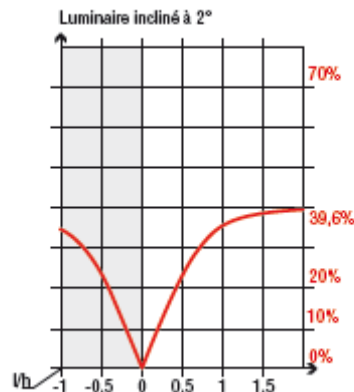
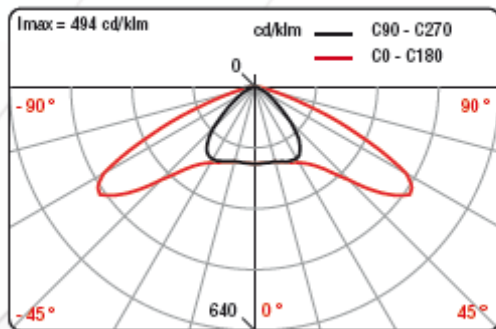


Figura 40 Apparecchio Eclatec Pixel S 24/48 LED. Indicatrici di emissione e fattore di utilizzazione



1.6 Tipologia geometrica del supporto

La scelta della geometria del supporto, nasce dalla necessità di gestire in maniera semplice la fase di montaggio industriale dell'apparecchio, mantenendo elevate performance impiantistiche e il rispetto delle prescrizioni normative, con particolare attenzione alle direttive regionali sull'inquinamento luminoso.

Nel caso di una geometria tridimensionale, le ottiche e i LED vengono applicate singolarmente sul supporto secondo uno schema geometrico predefinito e il circuito viene filato in loco, con un apporto manuale molto elevato.

Nel caso di una geometria bidimensionale, diversamente, la parte di preparazione LED + Ottica + Supporto viene demandata al costruttore delle ottiche, che si occuperà del montaggio del corretto numero di LED e delle relative ottiche su metal core PCB che saranno poi fissati più agevolmente sul supporto dal costruttore dell'apparecchio, semplificando la costruzione dell'intero componente.

La maggior parte delle ottiche presenti sul mercato non offrono la possibilità di utilizzare un supporto piano in quanto l'emissione realizzata da ciascuna di esse (distribuzione del flusso luminoso in senso trasversale alla carreggiata) non consente il raggiungimento dei requisiti illuminotecnici minimi (Classi CE e ME) per le geometrie di impianto maggiormente utilizzate ($L/H=1$ e $I=3.7H$ tilt=0°).

Un secondo elemento da considerare è la modalità produttiva con cui verrebbero realizzate le due tipologie di supporto LED (geometria 3D o 2D), che prevedono due impianti industriali di lavorazione completamente differenti: mentre nel caso del supporto tridimensionale si dovrà realizzarlo mediante stampaggio, nel caso di un elemento bidimensionale è possibile una produzione per estrusione, lavorazione che consente di ridurre notevolmente i costi di produzione al fine di rendere il prodotto il più economico possibile.

L'inclinazione complessiva del supporto LED+Ottica rispetto al piano stradale, inoltre, essendo l'estruso di sezione costante, non può essere variata: questo permette, da un lato di assemblare i pezzi in maniera più veloce e sistematica, ma allo stesso tempo presenta notevoli problematiche sia per il raggiungimento degli obiettivi illuminotecnici sia per le caratteristiche geometriche dell'intero apparecchio.

L'inclinazione del supporto rispetto al piano stradale, deve inoltre considerare i vincoli imposti dalle leggi regionali in termini di inquinamento luminoso; infatti, l'apparecchio, nonostante una inclinazione dei LED, dovrà essere schermato nella sua emissione nell'emisfero superiore, onde evitare la fuoriuscita di luce verso l'alto superiore a 0,49 cd per 1000 lumen a 90° e oltre.

Da simulazioni effettuate al calcolatore, utilizzando i dati misurati sulle lenti FRAEN, si è osservato che il valore ottimale dell'inclinazione rispetto al piano stradale oscilla tra 15° e 18° (per una un rapporto larghezza della strada su altezza di installazione circa = 1 e con una interdistanza dei centri luminosi, organizzati su una sola fila pari a circa 3.7 volte l'altezza di installazione).

L'estrusione del supporto dei LED può essere realizzata inglobando nella stessa lavorazione l'estrusione del dissipatore (opportunamente dimensionato per una corretta dissipazione in funzione del numero dei LED utilizzati) e elementi di collegamento con il resto dell'apparecchio (guide per lo scorrimento del supporto all'interno della scocca pressofusa in modo da facilitare le operazioni di montaggio e di estrazione finalizzata alla manutenzione del pezzo).

1.7 Flusso luminoso di ciascun LED

Il flusso luminoso di partenza associato a ciascun LED deve essere stimato, tenendo conto dei seguenti aspetti:

- ✓ Rendimento dell'ottica (pari a circa il 90% per le ottiche TIR esaminate);



- ✓ Regime termico di funzionamento compreso tra 65 e 70°C che comporta una riduzione del flusso luminoso emesso del 10%-15%⁹;
- ✓ Corrente di alimentazione del LED (strettamente collegato al punto precedente);
- ✓ Riduzione del flusso luminoso emesso dovuta all'assorbimento e alle riflessioni interne della "coppa" pari a circa 10%-15%, la cui valutazione può essere fatta in maniera assai precisa mediante ray-tracing¹⁰;
- ✓ Effetto di schermo del supporto rispetto all'emissione dei LED (la cui influenza può essere minimizzata ma non completamente eliminata, come spiegato nel seguito);

1.8 Determinazione sperimentale del legame Flusso luminoso / Corrente

La modulazione dei flussi è una tecnica che è stata utilizzata al fine di avere una maggiore



Figura 41 Apparato per la determinazione delle correnti nei rami

flessibilità delle distribuzioni del flusso luminoso sulla carreggiata. Infatti, il variare del numero dei LED disposti in ciascuna fila rende possibile effettuare un controllo della distribuzione del flusso in maniera piuttosto grossolana e con salti troppo elevati per poter soddisfare i requisiti di uniformità.

Per questo motivo, la modulazione delle correnti del ramo consente un controllo molto fine della quantità di flusso emesso in ciascuna zona della carreggiata.

La determinazione del legame tra corrente di ramo e valore del flusso luminoso può essere ricavata sperimentalmente, attraverso l'apparato di misura riportato nella Figura 41.

Il LED considerato per queste prove (OSRAM DRAGON LUW W5AM) è stato incollato sul sistema di raffreddamento e la cella di Peltier è stata alimentata con una corrente di 1625 mA al fine di ottenere una temperatura di giunzione di circa 65 °C, quando il LED è percorso dalla corrente nominale di 350 mA.

Lasciando inalterata la corrente circolante nella cella di Peltier è stata variata la corrente di alimentazione del LED ed è stato misurato il valore di intensità luminosa emessa in asse.

Si è quindi calcolato l'incremento o il decremento percentuale del flusso luminoso emesso (assunto proporzionale al valore dell'intensità luminosa in asse) al variare della corrente di alimentazione del LED.

⁹ Questo parametro influenza anche il valore del fattore di manutenzione dell'apparecchio.

¹⁰ L'adozione di un vetro piano per ottemperare i valori imposti dalle diverse leggi regionali può essere penalizzante per apparecchi che devono avere interdistanze di montaggio elevate, nell'ordine di 3.7H-4.0H (H: altezza di montaggio dell'apparecchio, espressa in metri)

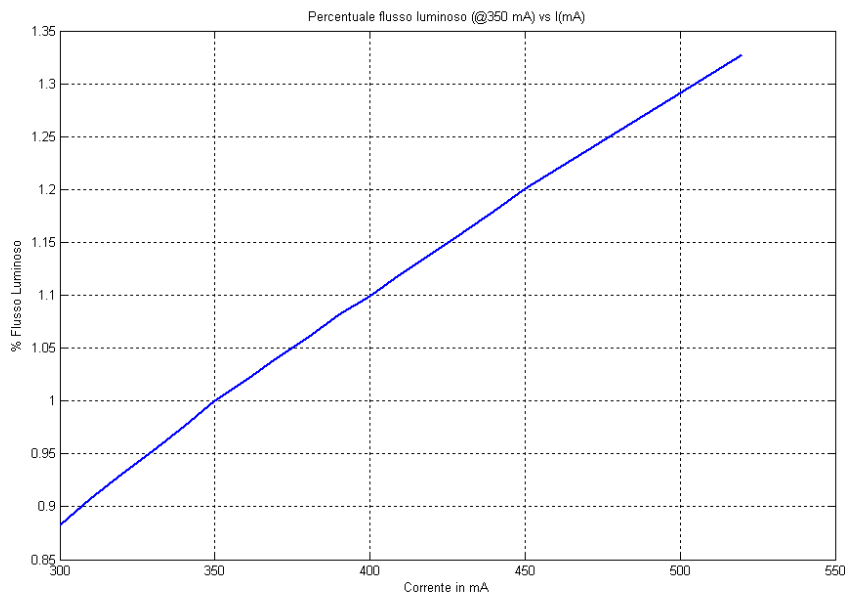


Figura 42 Incremento o decremento percentuale del flusso emesso al variare della corrente di alimentazione, nelle condizioni di carico termico specificate

La Figura 42 riporta l'andamento della percentuale di flusso luminoso, riferita a quello emesso a 350 mA, ottenuta variando la corrente di alimentazione del diodo luminoso tra 300 mA e 520 mA.

La temperatura di giunzione stimata, nel range di variazione della corrente di alimentazione del LED varia tra 60°C e 80°C.

1.9 Design delle caratteristiche fotometriche dell'apparecchio

La determinazione del numero e del tipo di ottiche da impiegare può essere ottenuta mediante un semplice programma di lighting CAD, adottando uno schema che prevede i seguenti passi:

- a) Determinazione di una installazione di riferimento e la relativa classe illuminotecnica; ad esempio:

Disposizione dei centri luminosi: unilaterale

$L/H = 1$

I (interdistanza tra i pali) = 3.7 H

Sbraccio (Sporgenza sulla carreggiata) = 0

Angolo di tilt=0° oppure pari all'inclinazione che assumerà il supporto rispetto al piano stradale, prestando attenzione affinché l'emissione per $\gamma > 90$ sia sempre inferiore a 0.49 cd/klm.

Caratteristiche della strada

1_Manto stradale C2, chiarezza $Q_0 = 0,07$

2_Strada a 2 corsie di 4 m di larghezza ciascuna

3_Doppio senso di marcia



Profilo strada

Carreggiata 1 (Larghezza: 8.000 m, Numero corsie: 2, Manto stradale: C2, q0: 0.070)

Disposizioni lampade

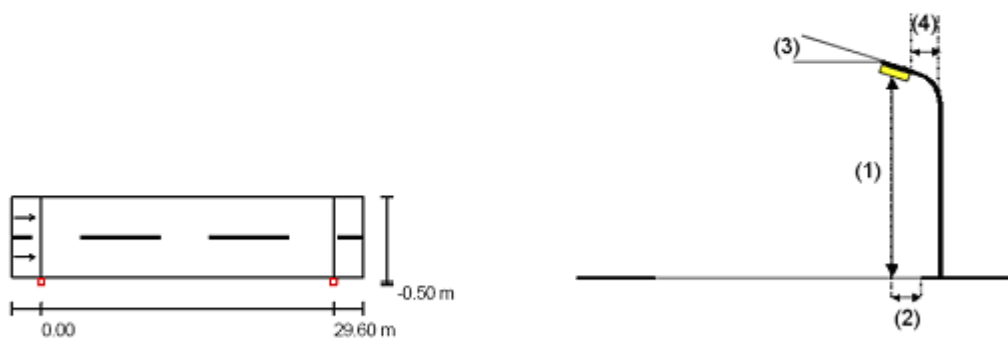


Figura 43 Schema delle condizioni impiantistiche assunte durante lo sviluppo dell'ottica.

- Considero il contributo di solo due centri luminosi contigui appartenenti alla medesima fila;
- Si inizia a disporre le diverse tipologie di ottiche sul primo centro della fila, andando opportunamente a variarne le inclinazioni rispetto ai 3 assi principali in modo da cercare di raggiungere i requisiti impiantistici fissati al punto a);
- Si copia la disposizione creata e la si trasla nel secondo centro;
- Si avvia il calcolo e si valuta il risultato, in termini di uniformità generale e laddove richiesto anche longitudinale di luminanza o di illuminamento a seconda della categoria illuminotecnica di riferimento del punto a). Si effettuano le modifiche del caso alla distribuzione e si ripete il ciclo;
- Raggiunti i requisiti in termini di uniformità e di abbagliamento, il soddisfacimento dei requisiti in termini di luminanza media o di illuminamento medio, avverrà andando a considerare un numero di LED opportuno in modo da conservare gli stessi rapporti tra ottiche di diverso tipo e diversi orientamenti nello spazio. In questa fase, occorre considerare le perdite di efficienza dovute al supporto delle ottiche, alla coppa di chiusura del vano ottico e alla temperatura di esercizio dei LED.

Consideriamo il seguente esempio¹¹, con riferimento alla geometria della Figura 44; la tabella riporta per ciascuna fila le inclinazioni dei LED e i relativi flussi per file (la fila centrale è stata separata in due metà di 5 e 6 LED rispettivamente). Nella situazione di partenza sono presenti 61 LED, con un flusso di 185 lm ciascuno; per ciascuna fila è stato previsto anche un coefficiente di modulazione dei flussi, che equivale a variare la corrente in quel ramo.

¹¹ L'esempio è volutamente "sbilanciato", infatti i coefficienti di modulazione dei flussi sono molto alti (+40% rispetto al flusso alla corrente nominale prescelta) e sono stati introdotti per mostrare un esempio completo.

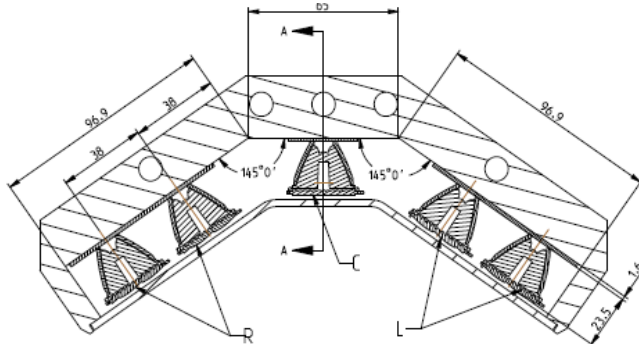


Figura 44 Schema disposizione LED esempio: due inclinazioni e 3 tipologie di ottiche (FRAEN destra, centrale, sinistra) (cortesia FRAEN)

Inclinazione ottiche rispetto al piano orizzontale	Coeff. Modulaz flussi	Flusso LED (lm)	N. LED	Flusso per fila lm	percentuale su flusso totale
35	0.7	185	12	1554.0	0.166666667
35	0.7	185	13	1683.5	0.180555556
0	1.4	185	6	1554.0	0.166666667
35	0.7	185	12	1554.0	0.166666667
35	0.7	185	13	1683.5	0.180555556
0	1.4	185	5	1295.0	0.138888889

Figura 45 Tabella dei flussi luminosi iniziali per ciascuna fila

Il calcolo delle prestazioni illuminotecniche sull'impianto tipo (disposizione dei centri unilaterale, $L/H=1, l=3.3H, L=6m, km=0.8$) ha previsto un illuminamento medio pari a 42 lux con una uniformità generale maggiore di 0.4; il flusso emesso dai LED in questa condizione è 9324 lm, mentre quello richiesto per avere un illuminamento medio di 30 lux, è pari a 8868 lm. Sulla base di queste informazioni è possibile determinare il nuovo valore del flusso luminoso per fila (moltiplicando il flusso totale richiesto per la percentuale di flusso raccolta da ciascuna fila) e successivamente, andare a calcolare il nuovo numero di LED per fila dividendo il risultato precedente per il flusso nominale di ciascun LED (il coefficiente di modulazione del flusso determinerà la compensazione dovuta al resto della precedente divisione, ma in questo caso è trascurabile).

Inclinazione	Flusso per fila (lm)	N. LED	Coeff. Modulaz flussi	N LED per calcolo	Flusso LED Progetto (lm)
35	1478.0	8	0.99868	8	185
35	1601.2	9	0.961692	9	185
0	1478.0	8	0.976487	7	185
35	1478.0	8	0.99868	8	185
35	1601.2	9	0.961692	9	185
0	1231.7	7	0.976487	8	185

Figura 46 Tabella flussi luminosi finali per ciascuna fila

Il dimensionamento ottico dell'apparecchio può essere effettuato in modo automatico mediante un programma MATLAB appositamente sviluppato che, a partire dai file fotometrici relativi alle singole ottiche (destra centrale e sinistra), determina il rapporto numerico tra le diverse tipologie di LED, le inclinazioni (tilt e azimuth) per la massimizzazione di un parametro



di progetto (tipicamente una combinazione lineare tra il valore di uniformità U_0 e U_1 in una condizione impiantistica di riferimento). L'ottimizzazione avviene sotto alcuni vincoli, come ad esempio il valore minimo e massimo delle inclinazioni dei singoli LED ed altri ancora.

Un esempio di output del programma è mostrato alla Figura 47, dove viene mostrato il numero di LED necessari, suddivisi secondo le tre tipologie di ottiche e i valori di corrente di alimentazione di ciascun ramo.

La Figura 48, mostra invece l'inclinazione delle diverse file, ottenute dal processo di ottimizzazione.

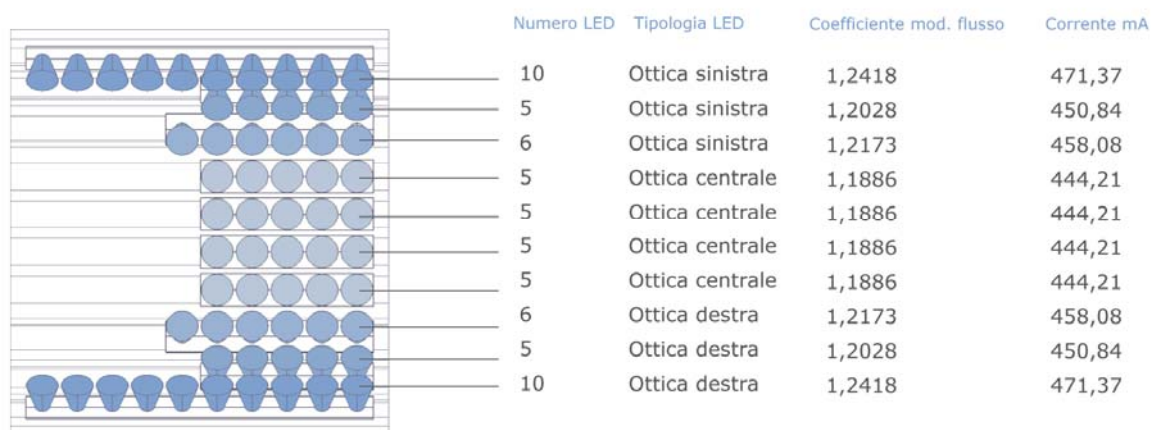


Figura 47 Apparecchio a 62 LED per categoria ME4b

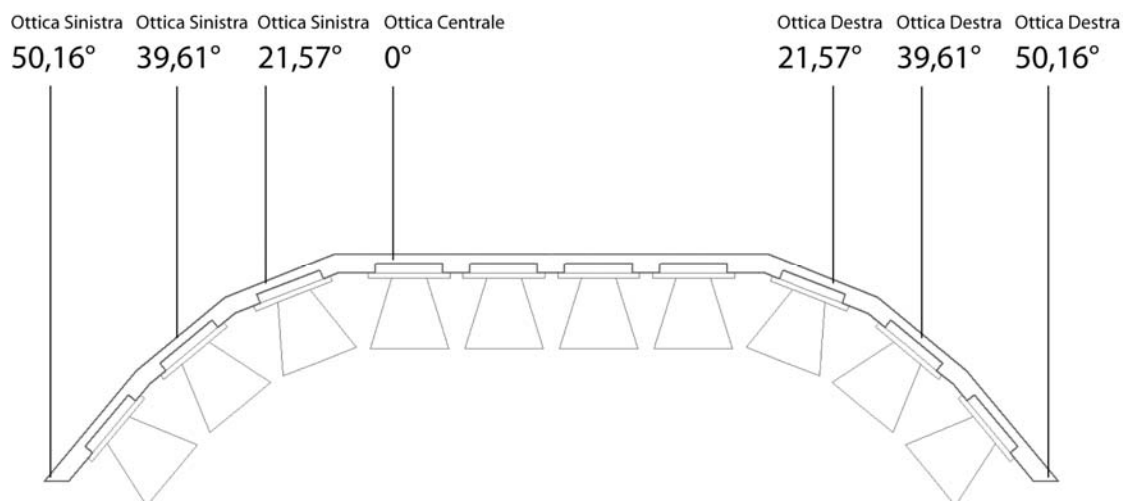


Figura 48 Inclinazione delle ottiche, ottenute come risultato del processo di ottimizzazione

Mediante l'uso di un ulteriore programma MATLAB, sviluppato internamente al Laboratorio Luce&Colore, è possibile ricavare il solido fotometrico complessivo dell'apparecchio andando a combinare opportunamente le 62 fotometrie ruotate e scalate rispetto al valore del flusso luminoso, ottenendo la distribuzione rappresentata alla Figura 49. Il programma genera contestualmente un file fotometrico in formato *.ies che può essere utilizzato per la simulazione impiantistica del risultato ottenuto in modo da consentirne successivi miglioramenti e ottimizzazioni.

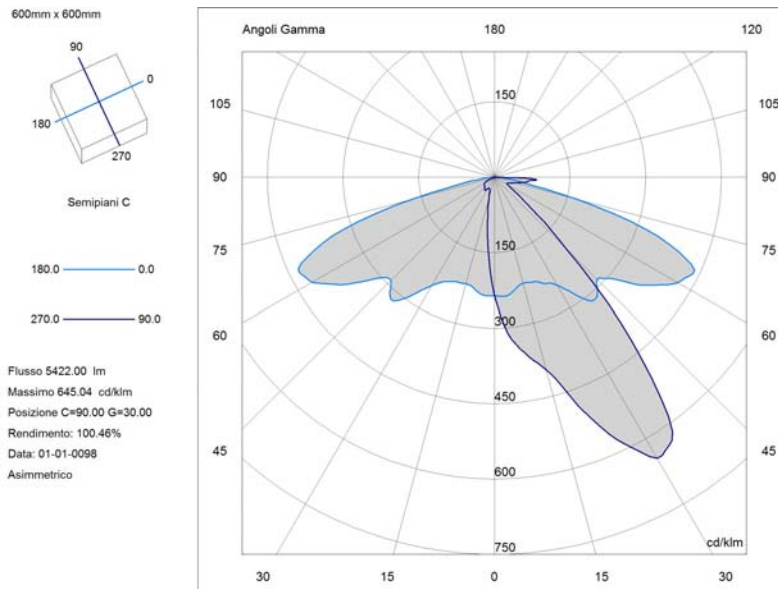


Figura 49 Distribuzione fotometrica apparecchio a 62 LED di esempio

La distribuzione fotometrica presentata alla Figura 49, tiene conto solamente del quantitativo (numero di file e numero di LED per fila), distribuzione fotometrica (Ottica Sinistra, Ottica Centrale, Ottica Destra), modulazione dei flussi in ciascun ramo ed inclinazione dei LED, ma non considerano l'eventuale irraggiamento reciproco tra le diverse componenti (schermatura). Al fine di considerare anche l'effetto di schermatura delle diverse componenti interne dell'ottica e l'effetto della coppa di chiusura, occorre effettuare una simulazione mediante ray-tracing, sotto l'ipotesi che tutte le superfici del supporto e quelle laterali dei collimatori, siano perfettamente assorbenti.

La generazione del ray data per la simulazione deve essere ottenuta in modo coerente con la distribuzione delle intensità luminose misurate in campo lontano (la fotometria viene assimilata a una distribuzione di probabilità e verranno tracciati un numero maggiore di raggi di ugual flusso in corrispondenza alle direzioni in cui l'intensità sarà maggiore).

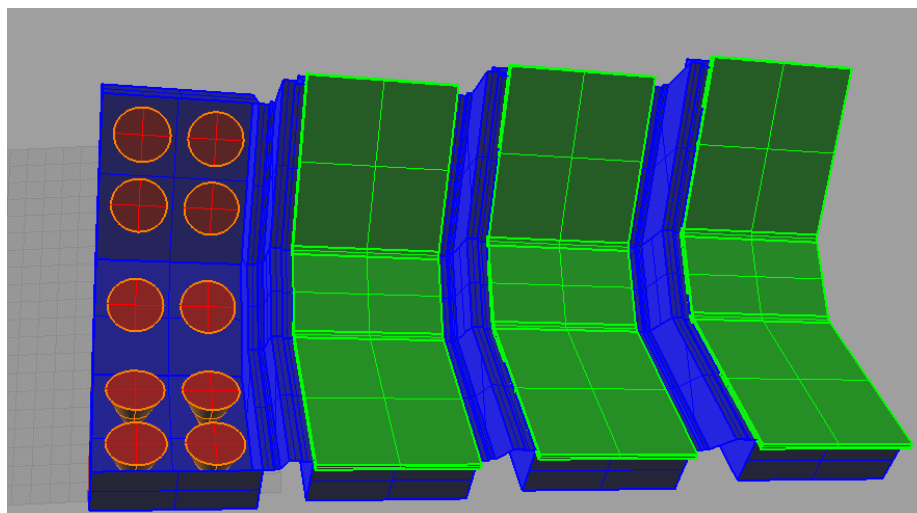


Figura 50 Modello 3D per la simulazione : apparecchio a 40 LED CREE XP_G a 700mA, completo di coppa di chiusura (in verde). (Cortesia FRAEN)



La Figura 51 mostra il risultato della simulazione relativo alla geometria della Figura 50, dove le ottiche considerate sono di produzione FRAEN e la cui emissione è quella riportata precedentemente (ottica FRAEN destra, sinistra, centrale).

I LED considerati per la simulazione sono i CREE XP_G, alimentati alla corrente di 700 mA, supponendo che il sistema di dissipazione dell'apparecchio sia in grado di garantire una temperatura di giunzione nell'intorno di 65°C.

La Figura 51 riporta il risultato della simulazione, ottenuta con la tecnica descritta.

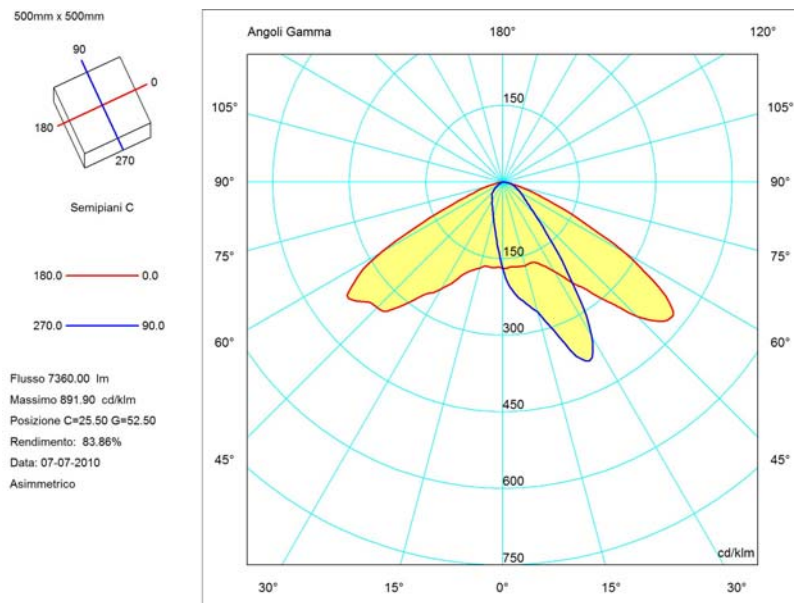


Figura 51 Risultato della simulazione di Ray tracing, che tiene conto sia della coppa di chiusura, sia degli effetti di schermatura. (Cortesia FRAEN)

1.10 Design dell'apparecchio e inquinamento luminoso

Gli elementi principali per la progettazione di un apparecchio a LED sono:

- ✓ fotometria, ovvero i requisiti illuminotecnici che l'apparecchio dovrà rispettare e le relative condizioni impiantistiche;
- ✓ dissipazione termica, mediante l'impiego di un idoneo sistema di smaltimento del calore che dovrà essere opportunamente dimensionato dal progettista;
- ✓ design del concept, ovvero scegliere una delle possibili soluzioni realizzative di un singolo apparecchio o di un sistema, dopo averne valutato pro e contro in termini economici ed industriali.

Il progetto deve prendere in considerazione il contesto di utilizzo, la forma, gli ingombri di massima e le funzionalità desiderate dell'apparecchio.

Lo schema della Figura 52 riassume in maniera grafica gli elementi chiave del progetto e le tematiche derivate, focalizzandosi in particolare sul design del concept.

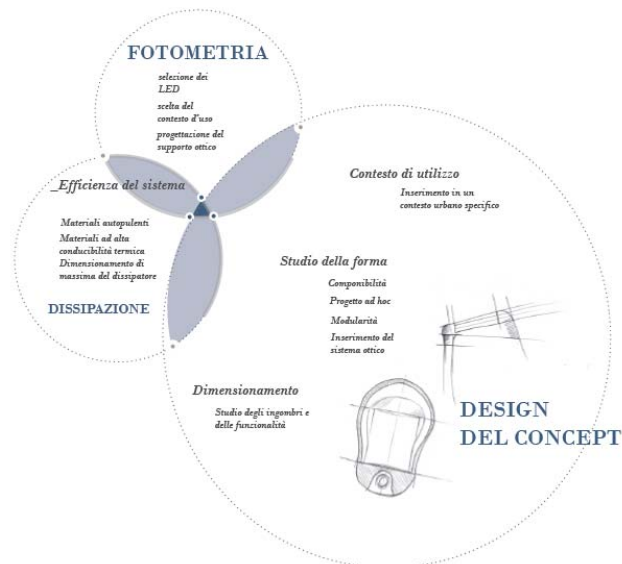


Figura 52 Schema per la progettazione di un apparecchio di illuminazione

Il design dell'apparecchio deriva sia dalla necessità di inserire in un guscio schermante, l'elemento ottico dalla forma estremamente caratterizzante¹², sia di rendere familiare e riconoscibile un prodotto tecnologicamente innovativo.

La Figura 53 mostra il concept di un prodotto per illuminazione pubblica a LED, che sfrutta un'ottica con supporto bidimensionale. Si tratta di un apparecchio, in grado di ospitare al massimo 82 LED ed è destinato all'illuminazione delle strade a traffico motorizzato.

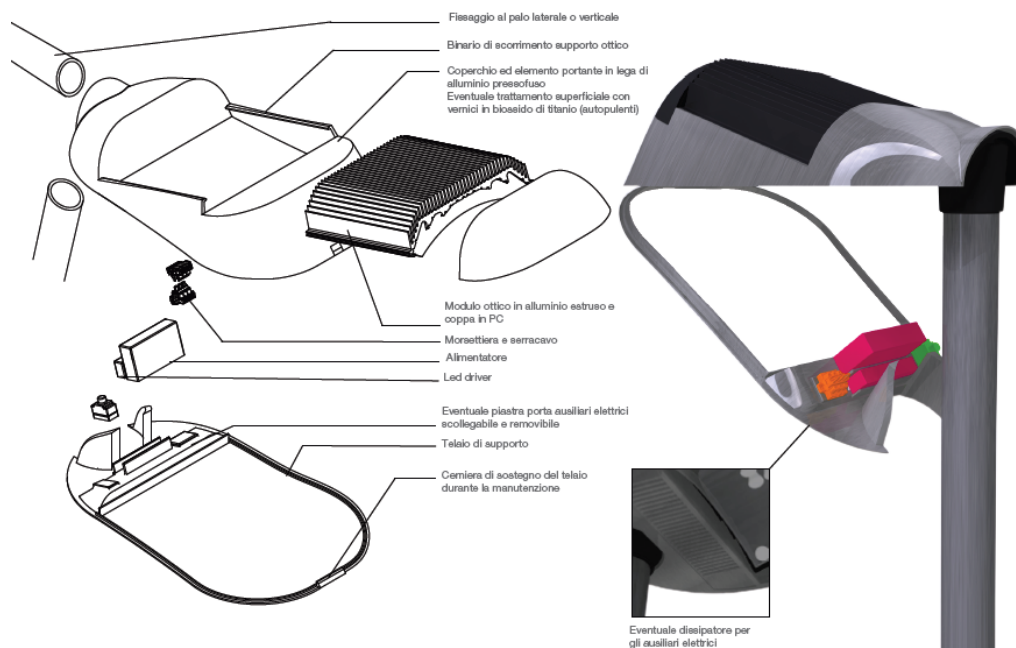


Figura 53 concept di un apparecchio di illuminazione a LED per ottica cilindrica destinato all'illuminazione di strade a traffico veicolare (ME). (Cortesia Politecnico di Milano Laboratorio Luce&Colore Dipartimento INDACO)

¹² Il rispetto dei requisiti sull'inquinamento luminoso, nella soluzione ottica bidimensionale, sono demandati alla scocca dell'apparecchio che dovrà realizzare la schermatura delle intensità luminose emesse dai sistemi LED+ottica per inclinazioni di 90° e oltre rispetto alla verticale. Per la regione Lombardia, il limite alle intensità emesse nell'emisfero superiore, è pari a 0.49 cd/klm.

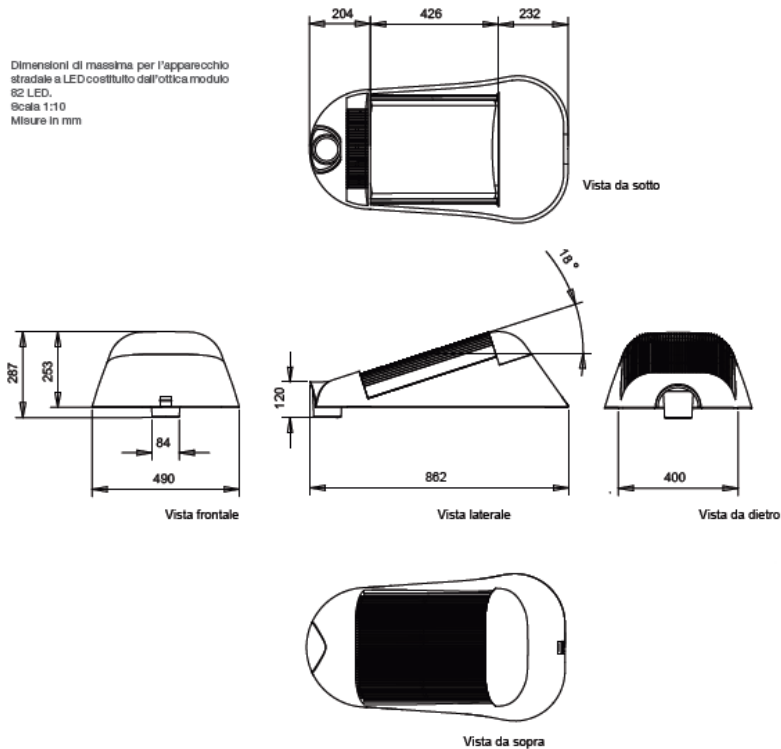


Figura 54 Le dimensioni di massima dell'apparecchio (versione 82 LEDs). (Cortesia Politecnico di Milano Laboratorio Luce&Colore Dipartimento INDACO)

La Figura 54 mostra le dimensioni di massima dell'apparecchio da 82 LED; la disponibilità di tre moduli ottici da 44, 62, 82 LED (di cui il 44 ed il 62 LED utilizzano un unico supporto di uguali dimensioni) ha dato luogo a due apparecchi dimensionalmente diversi ma studiati in modo da essere riconoscibili nella stessa famiglia di prodotto. Questo è evidente sia nel profilo dell'apparecchio sia nei raggi di curvatura del coperchio (Figura 55).

Il tentativo è quello di eliminare gli elementi superflui, attraverso una forma semplice ma fluida, per rendere il prodotto il più leggero possibile a livello visivo (soprattutto attraverso l'uso di un profilo allungato e della doppia cromia che tende a spezzare l'elemento).

Il contesto di applicazione di questi apparecchi è urbano ed extraurbano, lungo le carreggiate destinate al traffico veicolare, rispondendo ai requisiti illuminotecnici delle categorie che vanno dalla ME3a alla ME6.

Sono state proposte due differenti versioni: bicromatica (alluminio spazzolato e nero per il dissipatore) e monocromatica (completamente nero).



Figura 55 Rendering del prodotto (Cortesia Politecnico di Milano Laboratorio Luce&Colore Dipartimento INDACO)

1.11 Dissipazione termica

La valutazione termica¹³ per il dimensionamento del dissipatore, si basa su il calcolo di un analogo elettrico riportato alla Figura 56, nel caso esemplificativo di una stringa 6 LED applicati allo stesso elemento dissipante.

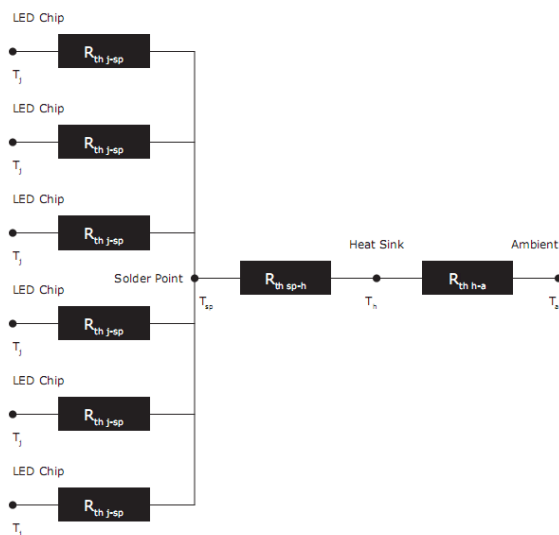


Figura 56 Modello termico semplificato assunto per il dimensionamento del dissipatore

La resistenza termica tra la giunzione e il solder point ($R_{th\ j-sp}$) è fornita dal datasheet del produttore del semiconduttore assunta, nel nostro esempio, pari a circa $9\text{ }^{\circ}\text{C/W}$. La resistenza $R_{th\ sp-h}$ tra solder point e dissipatore, dipende dalla finitura superficiale, dalla planarità, dalla pressione di contatto, dalla superficie di contatto, dall'interfaccia tra i materiali e dal suo spessore.

In prima approssimazione può assumersi un valore pari a 1°C/W .

La resistenza termica dal dissipatore all'ambiente ($R_{th\ h-a}$) può essere calcolata, in riferimento alla figura precedente, utilizzando la seguente relazione (risolta rispetto a $R_{th\ h-a}$):

¹³ Si tratta di dimensionare il sistema di dissipazione in modo tale che la T_j sia pari al valore fissato al momento di attribuire il flusso luminoso ai LEDs impiegati.



$$T_j = T_a + P_{total} \left(R_{th\ j-sp} / 6 + R_{th\ sp-h} + R_{th\ h-a} \right)$$

Il legame tra il valore di resistenza termica e le caratteristiche geometriche del sistema alettato, può essere ricavato mediante l'utilizzo di una delle molte applicazioni disponibili (vedi Figura 57) gratuitamente su internet.¹⁴

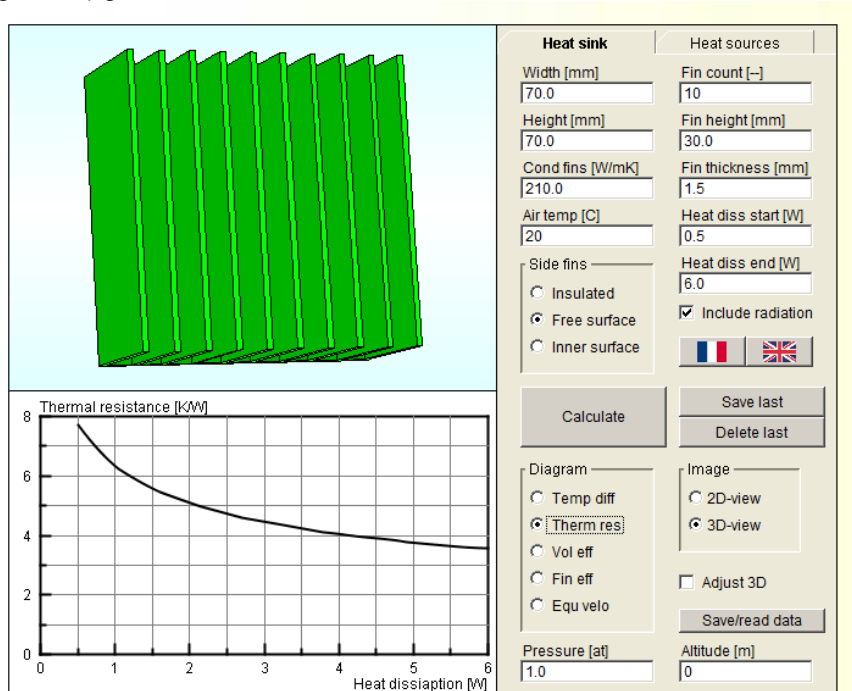


Figura 57 Esempio di dimensionamento di un dissipatore a convezione naturale

In Figura 57 è riportato il risultato del calcolo di un dissipatore, utilizzando uno degli strumenti gratuiti presenti in rete; sulla base di queste informazioni, sarà possibile dimensionare, di massima, il sistema di dissipazione dell'apparecchio, che dovrà poi essere verificato mediante misure su prototipi.

Tecniche di progetto più sofisticate, prevedono l'impiego di programmi di simulazione CFD (Computational Fluid Dynamics), che consentono di ottenere risultati più accurati riducendo il numero di prototipi e modifiche successive a cui è necessario ricorrere con il procedimento descritto precedentemente.¹⁵

Un esempio di applicazione¹⁶ di queste tecniche è riportato alla Figura 59, dove il comportamento di due diversi dispositivi è stato simulato mediante un programma CFD; il confronto tra i dati ricavati da simulazione e quelli misurati (Figura 58), fornisce un'idea circa l'accuratezza ottenibile da questo tipo di strumenti, in funzione dell'accuratezza del modello impiegato. Il fatto che la temperatura simulata sia maggiore di quella misurata, indica che il modello numerico non considera o sottostima alcuni fenomeni di dissipazione.

¹⁴ Si veda, ad esempio: http://www.frigprim.com/online/natconv_heatsink.html

¹⁵ La simulazione CFD consente anche di realizzare sistemi di dissipazione che differiscono di molto dai tradizionali dissipatori alettati, offrendo al progettista maggiori margini di manovra e creatività nella progettazione delle forme.

¹⁶ White Paper, "Thermal Modeling of High Power LEDs", by Oon Siang Ling, Solid State illumination Division, AVAGO Technologies.



	Measured RBA (°C/W)	Simulated RBA (°C/W)	Percentage Difference (%)
LED package on MCPCB with detailed model heat sink	25	23	8
LED package on MCPCB with compact model heat sink		27	8
LED package on FR4 with detailed model heat sink	37	35	8
LED package on FR4 with compact model heat sink		32	13.5

Figura 58 Risultati simulati vs misura per i due modelli considerati

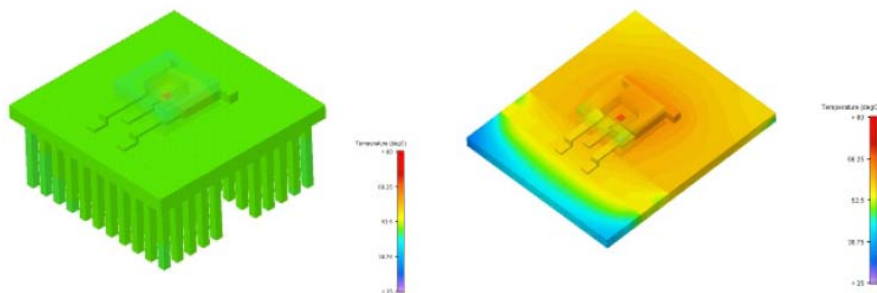


Figura 59 A sinistra è visualizzata la mappa delle temperature (ottenuta con simulazione CFD) di un LED package su MCPCB con un modello dettagliato di dissipatore. A destra è riportata la mappa delle temperature di un LED package su FR4 con un modello compatto di dissipatore.



2. Benchmarking dei prodotti di sensoristica e controllo per l'illuminazione pubblica

2.1 Considerazioni generali sui sistemi di controllo dell'illuminazione pubblica

La dinamica dei cambiamenti nella economia, nelle fonti energetiche e sul versante dell'ecologia su scala Nazionale, Europea e Mondiale, richiedono una adeguata modernizzazione della pubblica illuminazione.

Nel passato la pubblica illuminazione è stata controllata da interruttori orari che consentivano il funzionamento degli impianti nell'arco di tempo tra mezzora prima del tramonto a mezzora prima del sorgere del sole, e l'unica forma di risparmio implementabile consisteva nello spegnere parzialmente l'impianto dopo la mezzanotte.

L'utilizzo di interruttori orari astronomici rendeva difficile tenere in considerazione variazioni improvvise delle condizioni meteorologiche; di conseguenza oggi il più diffuso sistema di controllo degli impianti sono i sensori fotoelettrici che consentono di valutare la quantità di illuminazione naturale e di attivare l'impianto solo quando realmente necessario.

L'approccio più semplice per ridurre i consumi energetici potrebbe essere quello di ridurre il valore di illuminamento di soglia sui sensori fotoelettrici; ad esempio il passaggio da 70 lux di soglia a 55 lux, riduce il numero di ore di funzionamento dell'impianto di circa il 4% anno, con una conseguente riduzione dei consumi di pari entità¹⁷.

L'esperienza di tutti i giorni nella guida in strade in cui l'impianto di illuminazione è appena acceso, ci mostra che la luce naturale disponibile è molto elevata tanto da suggerire una riduzione della componente artificiale prodotta dall'impianto, tenendo presente che molte delle sorgenti luminose utilizzate per la pubblica illuminazione richiedono un certo periodo di riscaldamento per emettere il flusso luminoso di regime (altre sorgenti, come i LED consentono un passaggio quasi istantaneo dalle condizioni di funzionamento parzializzato a quelle di piena potenza).

La costruzione e l'organizzazione tradizionale della pubblica illuminazione non consente ulteriori sviluppi e modernizzazioni; occorre quindi introdurre il concetto di adattabilità nelle performance degli impianti che consenta di assicurare simultaneamente le condizioni di traffico sicuro, la diminuzione dei consumi energetici e di quelli di gestione e di manutenzione in accordo con il continuo variare dei parametri ambientali.

L'illuminazione stradale dovrà essere gestita dinamicamente in accordo con il cambiamento di disponibilità di luce naturale nell'arco delle 24h, con la variazione del volume di traffico, con la mutevolezza delle condizioni atmosferiche nelle varie stagioni dell'anno.

2.2 Sistemi dinamici di illuminazione

L'utilizzo di un sistema dinamico di illuminazione non comporta soltanto vantaggi dal punto di vista della riduzione dei costi energetici attraverso il dimming o l'accensione o spegnimento programmato dell'impianto, ma anche una serie di risparmi in altri settori della gestione, tra cui:

- ✓ Riduzione del tempo di ricerca dei guasti mediante l'uso di telesegnalazione di lampade, ausiliari guasti o lampade a fine vita;
- ✓ Migliore programmazione delle ore di accensione e spegnimento dell'impianto, secondo un programma definito dall'utente, rispetto ai sistemi di controllo tradizionali basati su interruttori fotoelettrici ;

¹⁷ Boyce, Fotios, Richards, "Road Lighting and energy saving", Lighting Res. Technol. 2009 , 41:245-260



- ✓ Registrazione, per ciascun centro luminoso, del numero di ore di funzionamento e di conseguenza la possibilità di predisporre dei programmi di manutenzione delle lampade adeguati;
- ✓ Informazioni circa i consumi dell'impianto in tempo reale, particolarmente importanti per definire accurati costi di esercizio dell'impianto;
- ✓ Dal momento che le potenze delle lampade a scarica sono standardizzate e la maggior parte degli apparecchi non sono dimmerabili, le strade sono generalmente sovra-illuminate per tener conto del decadimento del flusso luminoso della lampada e dall'apparecchio, in modo da garantire il soddisfacimento dei requisiti illuminotecnici per tutto l'intervallo temporale che separa due ricambi lampada successivi. Altri motivi di sovra-illuminazione potrebbero riguardare l'utilizzo di lampade di potenza troppo elevata rispetto alle necessità per mancanza della lampada di ricambio a più bassa potenza o per necessità di standardizzazione per ridurre i costi di manutenzione dell'impianto. In questi casi, il sistema di controllo può quindi essere utilmente impiegato per ridurre la potenza di lampada e risparmiare energia¹⁸;
- ✓ Eliminazione del funzionamento delle lampade durante il giorno, cioè di quegli impianti che rimangono erroneamente accesi anche di giorno a causa di un guasto all'interruttore fotoelettrico (per motivi di sicurezza il guasto dell'interruttore fotoelettrico determina l'accensione dell'impianto). Di norma tale tipo di anomalia viene risolta solo dopo la segnalazione di guasto all'ente gestore dell'impianto, che provvederà alla riparazione nei tempi previsti dal contratto. L'impiego di un sistema di controllo dell'impianto riduce drasticamente il numero di giorni di malfunzionamento dell'impianto.

Il controllo adattivo del livello di illuminazione, deve tenere conto almeno dei seguenti aspetti¹⁹:

- ✓ Volume di traffico;
- ✓ Presenza di zone di conflitto tra veicoli e pedoni;

Il flusso di traffico e la presenza di conflitto tra veicoli e pedoni sono condizioni che non si mantengono necessariamente costanti durante l'intera notte, ad esempio il numero di pedoni potrebbe essere significativamente ridotto nelle ore profonde della notte e alle prime luci dell'alba quando le attività commerciali sono ancora chiuse. Il livello di conflitto con i pedoni può anche variare in dipendenza del giorno della settimana, del mese o della stagione o in concomitanza di particolari eventi.

L'architettura di un sistema dinamico di illuminazione pubblica, è composta da 5 sottosistemi :

- ✓ Dispositivi di illuminazione stradale;
- ✓ Sistema di alimentazione;
- ✓ Sistema di controllo locale (PLC);
- ✓ Centrale di controllo e supervisione (CSCS);
- ✓ Sistema e rete di comunicazione;

I dispositivi di illuminazione stradale, comprendono lampade, apparecchi, alimentatori.

Il sistema di alimentazione comprende le cabine di trasformazione, armadi, linee di trasmissione di potenza, dispositivi di protezione, organi di manovra, ecc.

I sistemi di controllo locale possono essere suddivisi in base alla funzione svolta in due distinti livelli; il primo livello comprende:

- ✓ Apparecchi con alimentatore dimmerabile, dotato di modem per la ricezione dei comandi dalla linea di alimentazione;
- ✓ Sistema di controllo per lampade al sodio alta pressione o ioduri metallici;

¹⁸ Il dimming delle lampade a scarica comporta una riduzione dell'efficienza luminosa (rapporto lm/W). In alcuni tipi di lampade a scarica, ioduri metallici soprattutto con alimentatori magnetici, il dimming comporta una riduzione dell'indice di resa cromatica (Ra) ed una variazione della temperatura di colore. Risulta quindi più efficiente modificare, se possibile, il layout dell'impianto o il tipo di apparecchio utilizzato per evitare la sovra-illuminazione delle strade.

¹⁹ La norma UNI 11248 "Illuminazione Stradale Selezione delle categorie illuminotecniche" impone al progettista di tener conto dei parametri di influenza relativi al flusso di traffico e alle zone di conflitto per la determinazione della categoria illuminotecnica di progetto a partire da quella di riferimento che dipende esclusivamente dalla classificazione della strada secondo il Decreto Ministeriale 5 novembre 2001 n° 6792 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.



- ✓ Sistema di controllo della potenza di lampada mediante informazioni provenienti dalla linea di alimentazione;
- ✓ Sistemi di controllo di alimentatori magnetici o di ogni tipo di sensore, come una videocamera o stazione meteorologica, connesso alla rete di alimentazione;

Il secondo livello include:

- ✓ Sottostazioni con controllo di segmenti di rete (LSC);
- ✓ Controllo locale delle linee di potenza elettrica;

La centrale di controllo e supervisione è un sistema basato su web, che consente il monitoraggio e il controllo completo dell'impianto attraverso un programma accessibile da web. Tutte le informazioni raccolte dai sensori e dall'interrogazione dello stato delle varie componenti dell'impianto sono archiviate su un server.

Un opportuno sistema di permessi e password permette il controllo degli accessi al sistema in modo gerarchico (ad esempio solo visione malfunzionamenti, reset allarme su di un quadro elettrico, ecc).

Il sistema di controllo e supervisione riceve anche le informazioni provenienti dalle stazioni meteorologiche (WMC) (per la rilevazione dell'intensità della pioggia, la presenza di neve o di nebbia e foschia) e dai sistemi di monitoraggio del traffico (TM).

Il sistema di rete e di comunicazione consente lo scambio di informazioni tra i diversi sottosistemi e la trasmissione di tutte le informazioni tra i sistemi di controllo e di supervisione e le sottostazioni di controllo dei segmenti di rete.

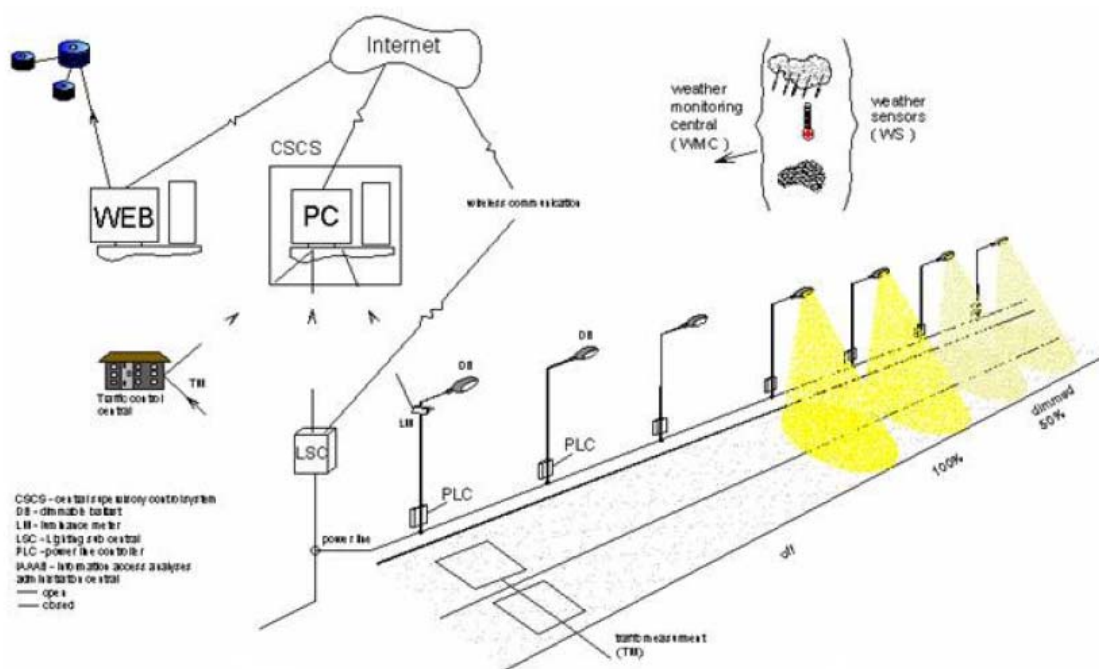


Figura 60 Schema di un sistema di controllo adattivo della pubblica illuminazione

2.3 Esempi applicativi di sistemi di controllo adattivi

Esempi di applicazione di illuminazione stradale adattiva, sono stati realizzati in Europa, USA e Canada nel corso del biennio 2001-2003.

Lo scopo di queste installazioni pilota era quello di quantificare i possibili risparmi energetici nell'illuminazione stradale, mediante l'utilizzo di queste nuove tecnologie.

Anche se le situazioni e lo stato di partenza delle installazioni è molto differente da paese a paese e tra città e città, i risparmi ottenibili possono quantificarsi in 60%-70% nei casi in cui si è passati da sorgenti a vapori di Mercurio e sorgenti a vapori di Sodio in concomitanza



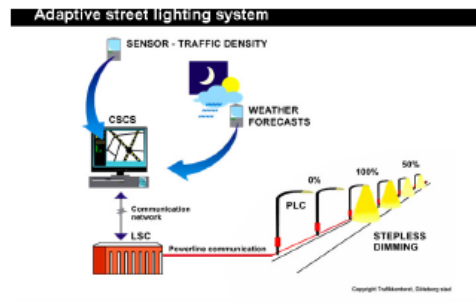
all'adozione di sistemi di gestione dinamica della pubblica illuminazione, mentre risultano più ridotti, nell'intorno del 20%-25%, se l'impianto sui cui si è operato l'intervento disponeva di sorgenti luminose efficienti²⁰.

Di seguito viene riportata la sintesi delle caratteristiche di alcuni impianti pilota realizzati in diversi paesi Europei²¹.

SWEDEN



Adaptive street lighting, road sections Högsboleden and Tuveleden in Goteborg



Adaptive lighting	
Name:	Supervisory Control and Monitoring System – ÖSÖ and local intelligent street lighting system - Local Controller – MP-01 (developed by Capelon AB and Infracontrol AB in Gothenburg)
Number of luminaries before adaptive lighting	366
Number of luminaries after adaptive lighting	283
Kind of lamps	high pressure sodium lamps
Energy savings	~ 37% in summer and ~ 40-45% in winter

²⁰ "Intelligent Road and Street Lighting in Europe (E-Street)" WP3: Market penetration and procurement activities D3.4 Procurement evaluation report, 30 June 2008, Sofia

²¹ "Intelligent Road and Street Lighting in Europe (E-Street)" WP3: Market penetration and procurement activities D3.4 Procurement evaluation report, 30 June 2008, Sofia



SLOVENIA - Pilot projects from Ljubljana:

PROJECT A): Highway junction:



Adaptive lighting	
Name:	Javna razsvetljava centralized power control system
Number of luminaries	~105
Kind of lamps	high pressure sodium lamps
Wattage of lamps [W]	100 W /150 W/ 250W
Installed power of the adaptive lighting [kW]	96 kW
Energy savings (predicted)	20-25%

Example No. 2 – Revereri power control system (Prague, Jižní spojka):

- power control unit in the cabinet
- remote management at “switchboard level”



Adaptive lighting	
Name:	Revereri telemanagement system
Number of luminaries	600
Kind of lamps	high pressure sodium lamps
Type of lamp	SON -T PIA Plus
Wattage of lamps [W]	70,100,150, 250 W
Energy consumption before adaptive lighting [kWh/a]	748 000
Energy consumption after lighting [kWh/a]	575 000
Energy savings	23%



UNITED KINGDOM

Milton Keynes

Adaptive lighting	
Name:	Echelon remote control system
Number of luminaries	400
Kind of lamps	high pressure sodium lamps
Kind of ballasts	SELC electronic ballasts
Wattage of lamps [W]	70,100,150 W
Energy savings (predicted)	~40%

ITALIA

(Lighting control in street lighting – An overview of the state of the art in technology and application – **Authors:** Dr.Nguyen van Tien –Institute of Materials Science, VAST Hanoi, Vietnam

Location: city of Costello, Italia

The overall installed power	650KW
Type of controller: power reducer by chopping wave shape with built in time switch SEC St/QIR	
Manufacture	Merloni-Progetti, Italia
Quantity of used controllers:	71 pieces
Annual working hours:	4200 h
Reduced rated working hours:	2270 h
Investment cost:	202,349.32 Euro
Annual energy saving %:	34, 9
Annual electricity cost saving:	74363.37 Euro
Pay back time:	2.7 years

Alcune installazioni di sistemi di controllo della pubblica illuminazione sono stati installati in Finlandia al fine di poter studiare i risparmi energetici conseguibili dall'adozione di queste nuove tecnologie²².

Il sistema di controllo Ring III è stato realizzato nell'autunno del 2005 ed è entrato in servizio nel Gennaio del 2006. L'impianto utilizza 492 apparecchi equipaggiati con lampade al sodio alta pressione disposti su 4 km di strada a 6 corsie; la categoria illuminotecnica è la ME2 con un livello medio di luminanza sulla carreggiata pari a 1.5 cd/m².

Il secondo impianto di cui si trova documentazione è denominato VT7 ed è entrato in esercizio dal Gennaio 2006; l'impianto si trova su una autostrada a 4 corsie per una lunghezza di 31 Km. L'impianto utilizza lampade al sodio alta pressione di varia potenza 150W-250W-400W, che realizzano una luminanza media di 1.0 cd/m² soddisfacendo i requisiti illuminotecnici previsti dalla categoria ME3.

In entrambi i casi il centro di controllo analizza e archivia i dati relativi al volume di traffico, la luminanza della superficie stradale, le condizioni della superficie stradale, come mostrato nella Figura 61.

²² Liping Guo "Intelligent road lighting control systems – experiences, measurements and lighting control strategies", report 51, Helsinki University of Technology Department of Electronics Lighting Unit, Espoo Finland 2008

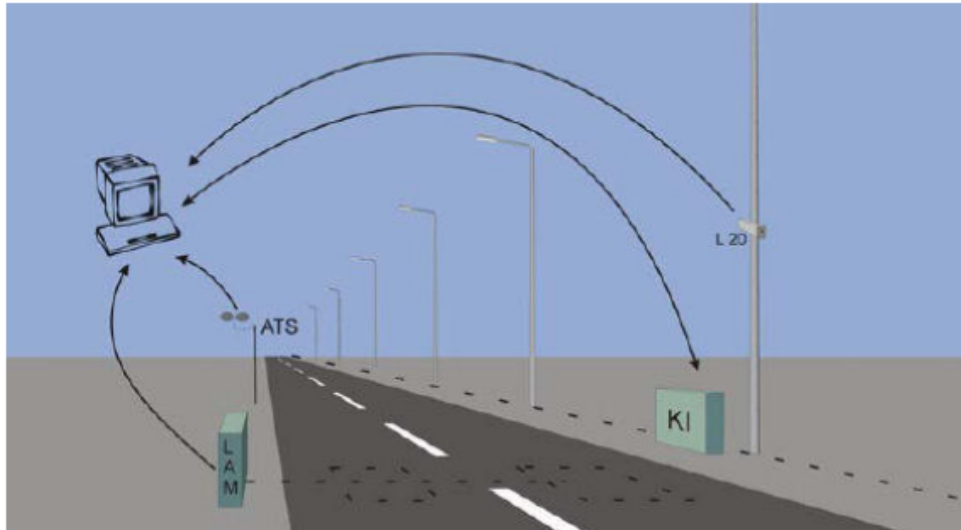


Figura 61 Sistemi informativi sugli impianti Ring III e VT7 (ATS stazione meteorologica stradale, LAM sistema di monitoraggio del traffico, L20 misuratore di luminanza in un angolo $2 \times 10^\circ$, KI quadro di distribuzione elettrica)

Lo scopo del monitoraggio delle condizioni della superficie stradale è quello di evitare la diminuzione del livello di luminanza in presenza di asfalto bagnato; mentre il sistema di monitoraggio della luminanza stradale ha come obiettivo quello di fornire un segnale di retroazione per la precisa regolazione dei livelli di luminanza della carreggiata.

Gli impianti hanno manifestato alcuni problemi nella comunicazione dei dati di luminanza e delle condizioni meteorologiche e di conseguenza la regolazione viene effettuata sulla base delle informazioni provenienti dalla rilevazione del flusso di traffico.

Entrambi gli impianti impiegano apparecchi con alimentatore magnetico e il sistema di controllo è basato sul dimming della tensione mediante triac.

In entrambi gli impianti lo stato delle lampade è monitorato dal centro di controllo; il sistema è in grado di riconoscere le lampade fuori servizio, quelle a fine vita, e problemi di alimentazione.

Il sistema di controllo Ring III è basato su una regolazione continua con passo di regolazione del 5% con valore minimo di luminanza pari a 0.75 cd/m^2 quando l'impianto funziona al 40% della potenza nominale (Figura 62).



Control parameters for Ring III

Vehicles per 5 minutes	Luminance (cd/m ²)	Lamp power (%)
1	0.75	40
10	0.80	45
20	0.85	50
35	0.95	55
40	1.00	60
50	1.02	65
60	1.05	70
70	1.10	75
80	1.15	80
90	1.20	85
100	1.30	90
150	1.40	95
170	1.50	100

Note: The number of vehicles per 5 minutes is collected from all six lanes.

Figura 62 Corrispondenza tra il numero di veicoli ogni 5 minuti e il livello di dimming dell'impianto espresso come luminanza media della carreggiata e percentuale della potenza di lampada. Sono possibili 13 differenti livelli di parzializzazione dell'impianto.

Il sistema VT7 funziona con un numero inferiore di livelli di dimming, soltanto quattro e quindi le lampade funzionano ad un dato regime di potenza per un periodo di tempo sufficientemente lungo.

Nel caso della Figura 62, quando il flusso del traffico scende al di sotto dei 100 veicoli ogni 5 minuti, la potenza di lampada diventa molto sensibile alle variazioni del volume di traffico; per esempio una variazione di 5 veicoli ogni 5 minuti comporta una variazione della potenza di circa il 5% (Figura 63).

Control parameters on VT7

Vehicles per 5minutes	Luminance (cd/m ²)	Lamp Power (%)
24 or less	0.25	40
25 – 69	0.50	60
70 -99	0.70	80
Over 100	1.00	100

Note: The luminaires in two driving directions, from Helsinki to Porvoo and from Porvoo to Helsinki, are controlled separately according to traffic volume per driving direction. The number of vehicles per 5 minutes is collected for each direction.

Figura 63 Corrispondenza tra il numero di veicoli ogni 5 minuti e il livello di dimming dell'impianto espresso come luminanza media della carreggiata e percentuale della potenza di lampada. Sono possibili 13 differenti livelli di parzializzazione dell'impianto.

I dati collezionati dal sistema di controllo per tutto il 2006 relativamente all'impianto Ring III, consentono di dedurre importanti statistiche relative ai consumi, alla potenza media di funzionamento delle lampade nel corso dei mesi e sul numero di ore di funzionamento mensili dell'impianto.



Il consumo medio giornaliero per apparecchio, per ciascuno dei 12 mesi dell'anno è riportato alla Figura 64, dove si nota come il consumo sia molto più basso in Giugno rispetto ai mesi di Ottobre, Novembre e Dicembre a causa della differente durata della giornata nei mesi invernali

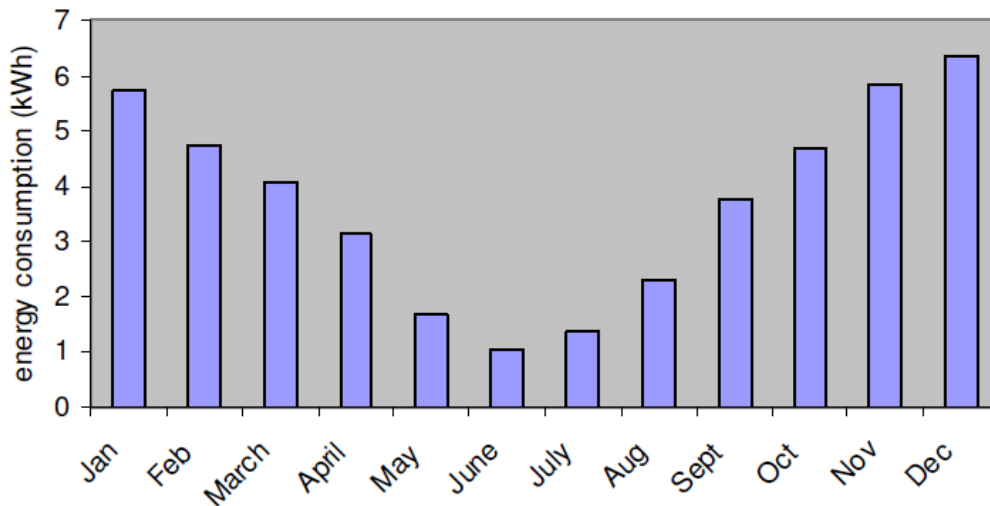


Figura 64 Energia media giornaliera per apparecchio, nei diversi mesi dell'anno. I dati si riferiscono all'impianto Ring III.

Per quanto riguarda il numero di ore medie di funzionamento mensili e la potenza media mensile per lo stesso impianto, gli andamenti sono riportati alla Figura 65 e alla Figura 66.

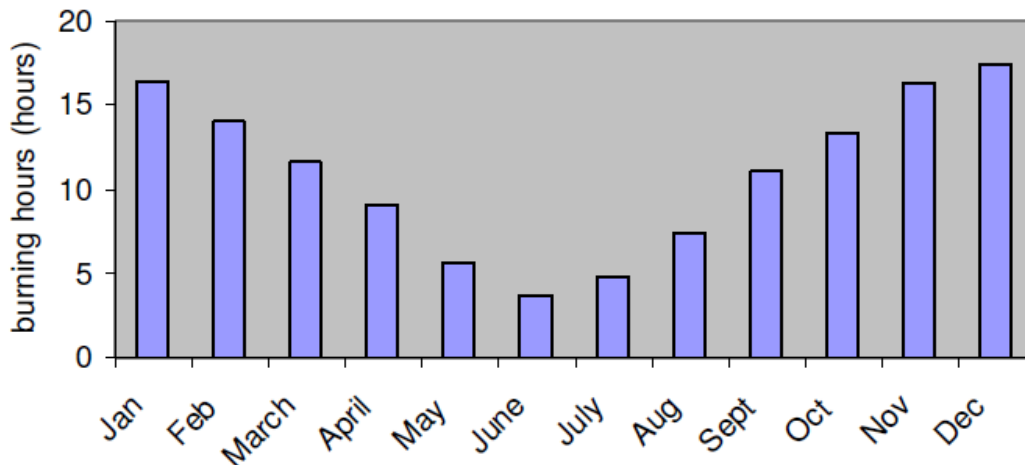


Figura 65 Distribuzione del numero di ore di funzionamento giornaliero medie mensili per l'impianto Ring III. In Giugno il numero medio di ore di funzionamento giornaliero è pari a 3.7 h, mentre d Dicembre è pari a circa 17.5 h. Nel corso dell'intero anno l'impianto ha funzionato 3850 h

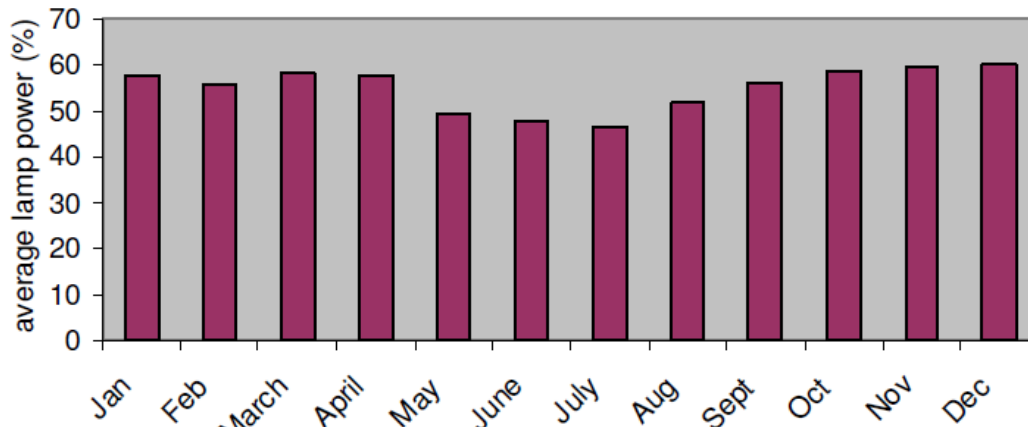


Figura 66 Percentuale della potenza media mensile rispetto a quella nominale per l'impianto Ring III. Nel corso dell'intero anno, le lampade hanno funzionato mediamente al 55% della loro potenza nominale.

L'andamento dei grafici della Figura 64 e della Figura 65 sono molto simili, mentre l'andamento della percentuale di potenza di lampada giornaliera nei diversi mesi dell'anno non riflette tale andamento perché dipende dal flusso di traffico registrato.

Assumendo un funzionamento annuale medio delle lampade al 55% della loro potenza nominale e che l'alimentatore consumi il 10% circa della potenza nominale di lampada, per una lampada da 600W, il sistema di gestione intelligente ha consentito un risparmio di circa 40.9% rispetto a un impianto tradizionale che utilizzasse le medesime lampade²³.

L'energia totale annua consumata da ciascun apparecchio funzionante per 3850 h/anno sempre alla massima potenza (10% della potenza nominale di lampada rappresentano, in prima approssimazione, le perdite nel ballast)

$$0.6 \text{ KW} * 1.1 * 3850 \text{ h} = 2541.0 \text{ KWh}$$

L'energia risparmiata per apparecchio, mediante l'adozione di un sistema di controllo

$$0.6 \text{ KW} * 0.45 * 3850 \text{ h} = 1039.5 \text{ KWh}$$

L'energia risparmiata in percentuale è pari a:

$$1039.5 / 2541.0 = 40.9\%$$

I dati relativi all'installazione VT7 sono stati analizzati per l'intero anno 2007; il numero medio di ore mensili di funzionamento è riportato alla Figura 67; dove si nota la mancanza dei dati del mese di Aprile. Il numero di ore di funzionamento giornaliero medio mensile è simile a quello rilevato per l'altra installazione descritta, con 4 ore di funzionamento medio giornaliero nel mese di Giugno e di 17 ore medie giornaliere per il mese di Dicembre.

²³ Liping Guo, Marjukka Eloholma, Liisa Halonrn "Intelligent road lighting control systems ", report 50, Helsinki University of Technology Department of Electronics Lighting Unit, Espoo Finland 2008

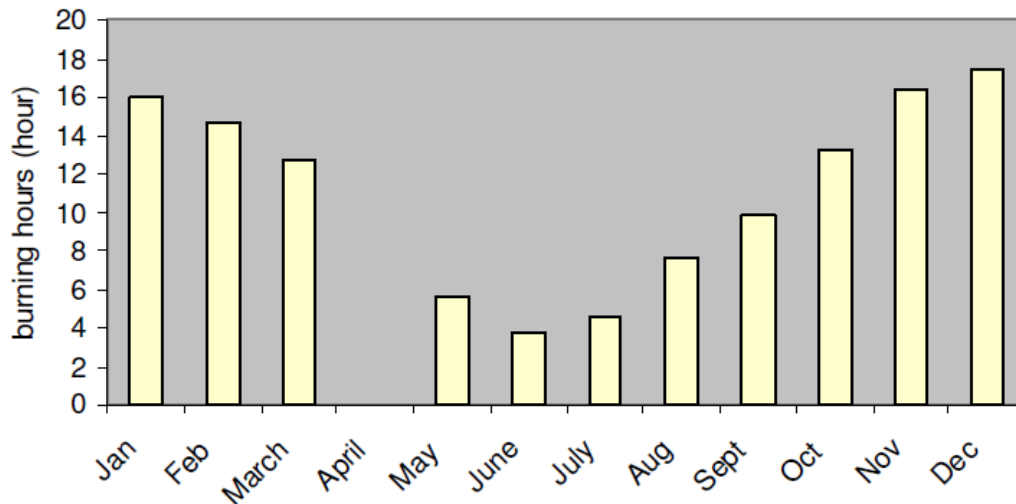


Figura 67 Distribuzione del numero di ore di funzionamento giornaliero medie mensili per l'impianto VT7. In Giugno il numero medio di ore di funzionamento giornaliero è pari a 4h, mentre d Dicembre è pari a circa 17h. Il numero totale di ore di funzionamento si aggira intorno alle 3850 h annue.

La Figura 68, mostra la potenza media giornaliera dell'impianto VT7, per i diversi mesi dell'anno, dove la potenza media oscilla tra il 40% e 50% della potenza nominale, mentre nell'impianto Ring III la potenza media giornaliera oscilla tra 50% e il 60% del valore nominale. Il risultato si spiega considerando i diversi flussi di traffico e i differenti livelli di dimming.

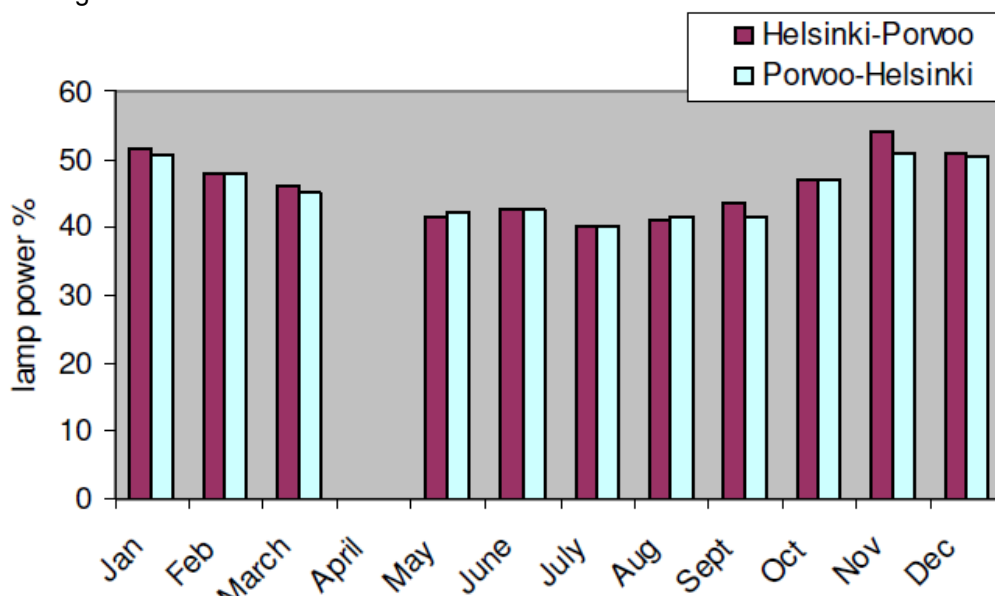


Figura 68 Potenza media percentuale (in percentuale sulla potenza nominale) mensile per l'impianto VT7

L'impianto VT7 consente una differenziazione del comportamento nelle due direzioni di marcia, al fine di massimizzare il risparmio energetico tenendo conto delle differenti sostanziali nel flusso di traffico nelle due direzioni di marcia; la Figura 69 mostra l'andamento del flusso di traffico rilevato in un giorno feriale della settimana. Il risparmio si concentra principalmente in inverno, nelle fasce orarie 6:30 alle 18:00 e dalle 15:30 alle 18:00 dei giorni lavorativi.

Il numero di ore di funzionamento nelle ore di punta del mattino sono 234.8 annue corrispondenti all'intervallo di tempo in cui le lampade nella direzione Helsinki_Porvoo stanno funzionando ad una potenza minore rispetto a quella nella direzione opposta; il numero di ore



di funzionamento nelle ore di punta della serata in cui le lampade nella direzione Porvoo-Helsinki funzionano ad una potenza inferiore rispetto alle altre, è stimata in circa 116.4 ore annue.

I calcoli indicano che i risparmi energetici aggiuntivi, derivanti dalla separazione del controllo delle due direzioni di marcia è modesto, pari a circa 2,2% nella direzione Helsinki-Porvoo e pari a 1.1% nella direzione opposta²⁴.

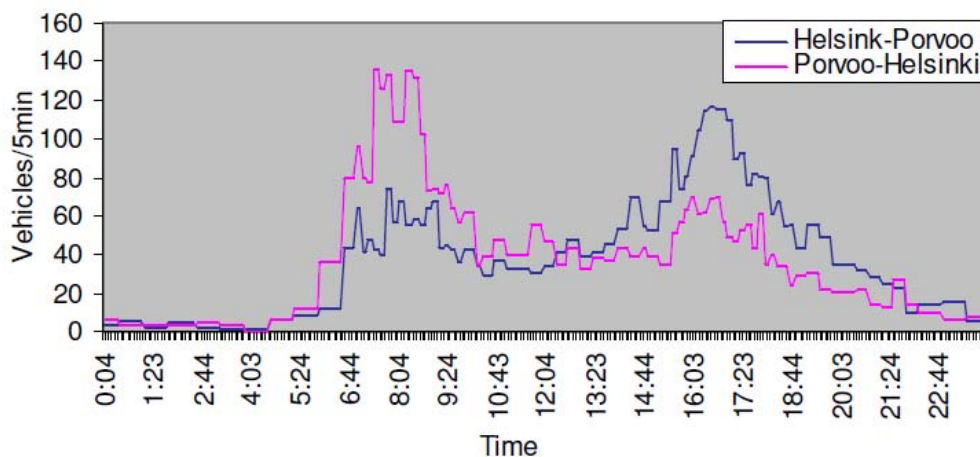


Figura 69 Volume di traffico nelle due direzioni di marcia in un giorno feriale

Lo scopo di un sistema di gestione intelligente del traffico stradale è quello di risparmiare energia sulla cui quantificazione si è cercato di dare una rapida panoramica nell'analisi dei casi precedenti; tuttavia occorre anche valutare che il progetto sia, nel suo complesso, economicamente vantaggioso.

Per i sistemi di controllo intelligente i risparmi maggiori provengono da due capitoli distinti:

- ✓ Riduzione dei consumi energetici;
- ✓ Riduzione degli oneri di manutenzione;

Il payback-period è uno strumento che normalmente viene impiegato nelle valutazioni economiche per determinare dopo quanti anni, il progetto avrà ripagato i costi sostenuti attraverso i risparmi; tuttavia questo metodo di solito non tiene conto esattamente dei rischi del progetto, dell'inflazione, dei problemi finanziari che si potrebbero generare all'interno del ciclo di vita dell'impianto.

L'analisi del ciclo di vita dell'impianto è alquanto difficoltosa per la presenza di componenti (soprattutto elettronici e informatici) di cui non si conosce esattamente il ciclo di vita.

La Tabella 1 mostra i costi stimati di un sistema di controllo intelligente VT7 rispetto a quelli di un sistema tradizionale, supponendo che i due impianti abbiano lo stesso numero e tipo di apparecchi, le stesse fondazioni, linee aeree, pali, linee sotterranee, ecc.

²⁴ Liping Guo "Intelligent road lighting control systems – experiences, measurements and lighting control strategies", report 51, Helsinki University of Technology Department of Electronics Lighting Unit, Espoo Finland 2008



Tabella 1 Comparazione costi impianto tradizionale e con gestione intelligente²⁵

A comparison of the construction costs of the intelligent road lighting control system of VT7 and a traditional road lighting system

Item	Intelligent control system	Traditional system
	Cost in percentage compared to the total cost of the traditional system (%)	Percentage of total costs (%)
Foundations	18.3	18.3
Columns	26.0	26.0
Luminaires (including light control units)	18.5	9.9
Cables	10.2	10.2
Cabinets	1.7	0.4
Control system (including planning, database, software, training, luminance meters)	6.1	0
Earth work	32.5	32.5
Demolition	2.8	2.8
	116.1	100

Il costo complessivo dell'impianto intelligente è più alto del 16.8% rispetto a quello tradizionale, ma alcune voci dell'impianto hanno un costo considerevolmente superiore; ad esempio gli apparecchi hanno un costo superiore 87% rispetto a quelli tradizionale e il costo degli armadi e dei relativi apparati per la trasmissione e ricezione dei comandi, risultano più costosi del 325%, anche se non rappresentano le principali voci di incremento di spesa.

Nei sistemi tradizionali, apparecchi e quadri rappresentano il 10% circa del costo complessivo dell'impianto, mentre nei sistemi di controllo avanzati come quello descritto, rappresentano circa il 22.7% del costo totale.

2.4 Benchmarking di prodotti per il controllo dinamico della pubblica illuminazione

Esperienze analoghe a quelle descritte in precedenza, sono state compiute anche negli USA, dove nel corso del 2010 è stato reso pubblico un report preparato dalla Pacific Gas and Electric Company sui sistemi di gestione intelligente della pubblica amministrazione²⁶. Le informazioni riportate nel report sono state desunte dalla documentazione fornita dai costruttori e da due sperimentazioni sul campo svoltesi nel corso del 2009 che riguardavano le performance ottenibili da apparecchi di illuminazione a LED e sistemi di controllo intelligente per la pubblica illuminazione.

L'indagine ha individuato 5 aziende, ritenute leader di mercato per questo genere di prodotti/applicazioni, mediante esame della documentazione disponibile.

Tutti i prodotti testati consentono il controllo remoto di ciascun apparecchio, gruppo di apparecchi, o dell'intera rete con specifico riferimento all'accensione e allo spegnimento manuale o attraverso programmazioni orarie mediante interruttore astronomico. Gli operatori sono inoltre in grado di controllare, tramite PC, il funzionamento dell'impianto mediante log a un sito web.

Tre dei cinque prodotti testati hanno capacità di dimming delle sorgenti per l'adattamento dinamico del livello di flusso luminoso emesso alle condizioni ambientali.

²⁵ Liping Guo "Intelligent road lighting control systems – experiences, measurements and lighting control strategies", report 51, Helsinki University of Technology Department of Electronics Lighting Unit, Espoo Finland 2008

²⁶ Pacific Gas and Electric Company, "Emerging Technologies Program Application Assessment Report #0914 Street Lighting Network Controls Market assessment Report", January 2010



2.4.1 Caratteristiche dei sistemi di gestione analizzati

Nel seguito vengono descritte le principali caratteristiche dei 5 sistemi di gestione analizzati nel report citato.

Echelon consente il dimming con programmazioni predefinite basate su informazioni a priori sul flusso di traffico, meteorologiche, o sulla disponibilità di luce naturale. Il sistema consente il dimming continuo, attraverso un dashboard o l'accesso ad un sito internet, consente il dimming dell'impianto ad un valore predefinito, che può essere personalizzato impianto per impianto.

Un aspetto interessante di questo sistema di controllo è che utilizza una infrastruttura esistente per la trasmissione dei comandi o delle informazioni; infrastruttura che non sempre risulta adatta alla trasmissione di una mole elevata di informazioni.

Il sistema consente di gestire ballast HID dimmerabili o LED driver forniti da costruttori terzi. Il controllo è effettuato da un nodo installato all'interno dell'apparecchio; viene utilizzata la tecnologia PLC per la comunicazione tra l'impianto e il centro di controllo.

Le principali caratteristiche del sistema di controllo sono:

- ✓ Calendario astronomico per accensione e spegnimenti senza fotocellule;
- ✓ Possibilità di avere differenti livelli di dimming;
- ✓ Report sul consumo energetico di potenza su una singola lampada o su un gruppo di lampade;
- ✓ Controllo adattivo del dimming per poter aumentare i risparmi energetici nelle zone di basso conflitto o in alcuni giorni del mese o dell'anno;
- ✓ Rilievo delle lampade fuori servizio e tracciamento per la manutenzione;

Il sistema di comunicazione adattato per collegare gli apparecchi al segment controller sfrutta la linea elettrica tramite onde convogliate consentendo di ridurre, almeno in linea teorica, i costi di installazione e di impianto. Questo potrebbe generare dei problemi quando la linea di alimentazione della pubblica illuminazione non è separata da quella che alimenta le normali utenze domestiche (nella sperimentazione a cui il report accenna, l'impianto era spezzettato in una serie di linee a 120 V con pochi apparecchi collegati mediante una serie di trasformatori sulla linea di alimentazione di distribuzione; in questo modo il numero di segment controller installati era cresciuto a dismisura essendocene uno a valle di ciascun trasformatore) o quando si desidera aggiungere qualche centro luminoso che non fa parte del circuito di alimentazione utilizzato dagli altri apparecchi dell'impianto.

Ciascun segment controller è in grado di controllare fino a 200 apparecchi; consente di monitorare e controllare lo stato delle lampade, l'energia utilizzata e le ore di funzionamento, di controllare la luce naturale attraverso un calendario astronomico che consente di pianificare le accensioni e gli spegnimenti. Altre opzioni possono essere la registrazione di dati relativi al flusso di traffico o le condizioni meteorologiche per controllare il flusso, in modo automatico, di alcuni o tutti gli apparecchi dell'impianto.

Il dispositivo risulta equipaggiato con un apparato di trasmissione WiFi (802.11G wireless local area network protocol) per comunicare con il system gateway che connette la rete stradale al centro di controllo mediante una connessione internet per il controllo remoto e per l'archiviazione dei dati.

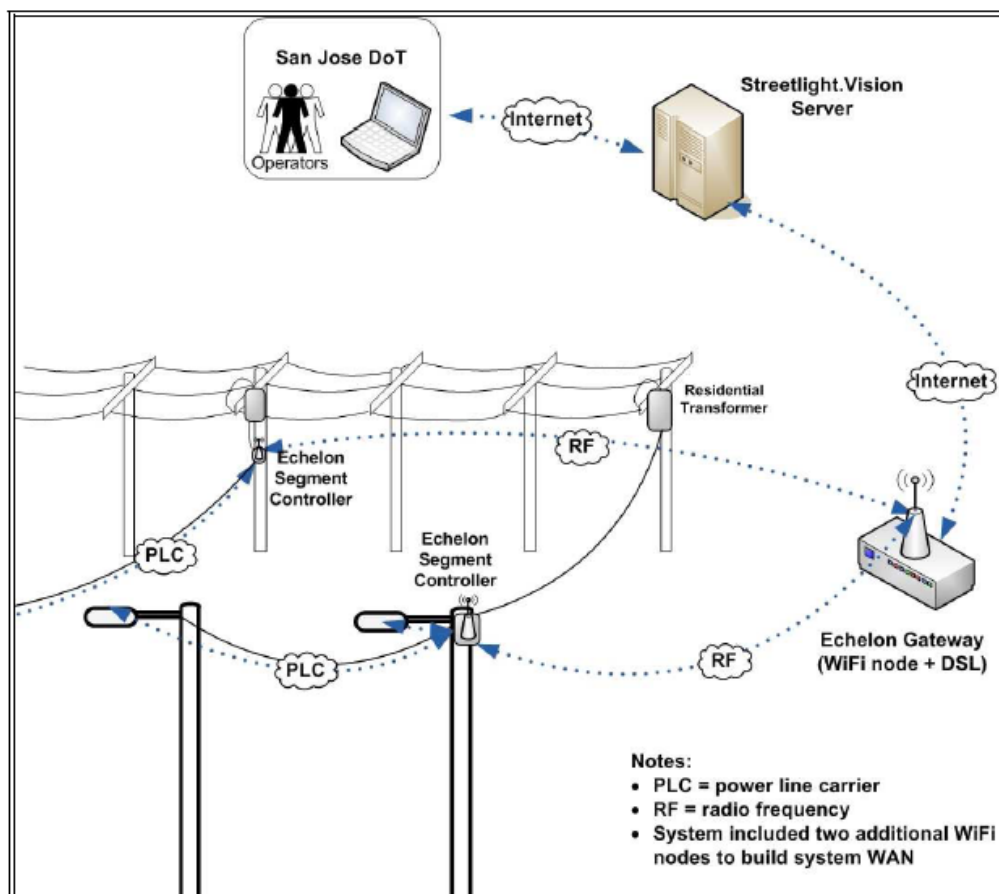
La comunicazione PLC utilizza il protocollo ANSI 709.2 (LonWorks); si tratta di un protocollo aperto, architettura estensibile che consente la comunicazione tra dispositivi di diversi costruttori.

I consumi dei diversi componenti del sistema sono i seguenti:

- ✓ Segment controller 10W (in accordo con quanto dichiarato dal costruttore <15W)
- ✓ Gateway 41.3 W
- ✓ Smart driver device : componente elettrico da inserire all'interno dell'apparecchio di illuminazione che consente la comunicazione tra il centro luminoso e il segment controller, ha un consumo continuo pari a 1.3 W

Nella sperimentazione di San Jose, il sistema non era in grado di realizzare una misura di potenza di ciascun apparecchio in real time, i dati relativi alla potenza sono quindi stati

ricavati mettendo in correlazione le misure fatte in laboratorio (consumo dell'apparecchio con driver 1-10V e smart driver device a diversi valori di dimming) con le regolazioni effettivamente impostate sull'impianto.



Basic System Architecture Diagram of Echelon Pilot System in San Jose Demonstration

Figura 70 Architettura di sistema del sistema di controllo Echelon nella applicazione di San Jose

Il programma di gestione della rete è risultato nella sperimentazione poco intuitivo al personale incaricato della gestione dell'impianto; consente di decidere mediante un orologio astronomico l'accensione o lo spegnimento di gruppi o singoli centri luminosi, di dimmerare gli apparecchi in modo continuo (nella sperimentazione i livelli utilizzati erano 100%, 75%, 50% e 25% della potenza nominale). Il sistema è in grado di identificare gli apparecchi fuori servizio e di informare l'operatore mediante un messaggio di testo via e-mail.

L'intero sistema è coperto da una garanzia di 1 anno, rilasciata dal produttore.

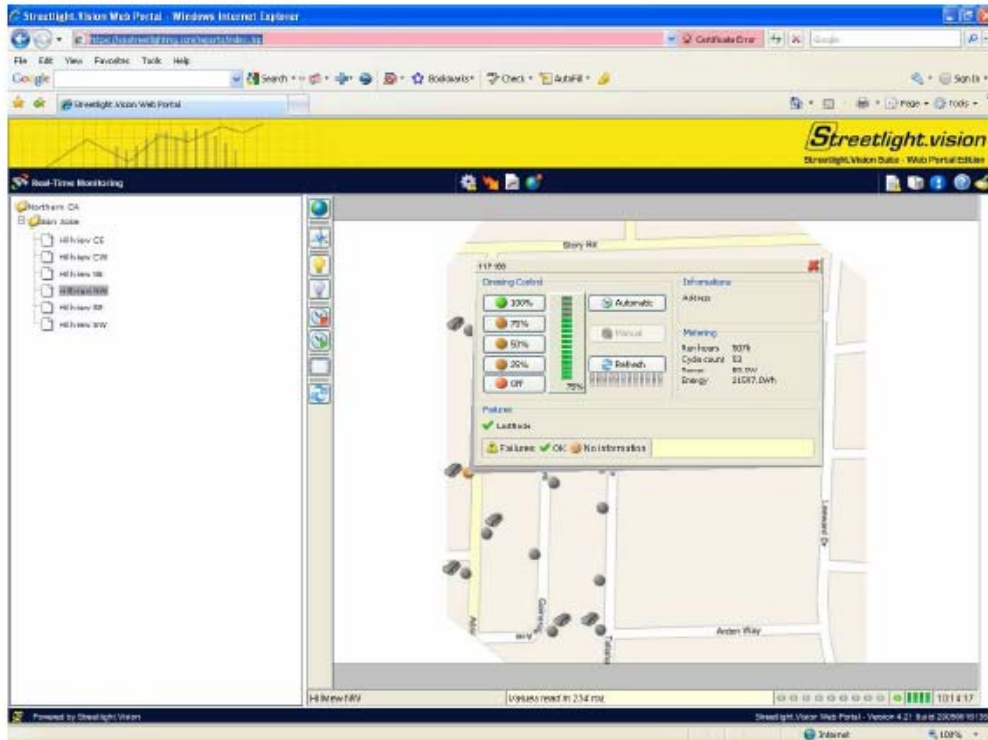


Figura 71 Esempio di schermata del sistema di controllo (controllo del dimming)

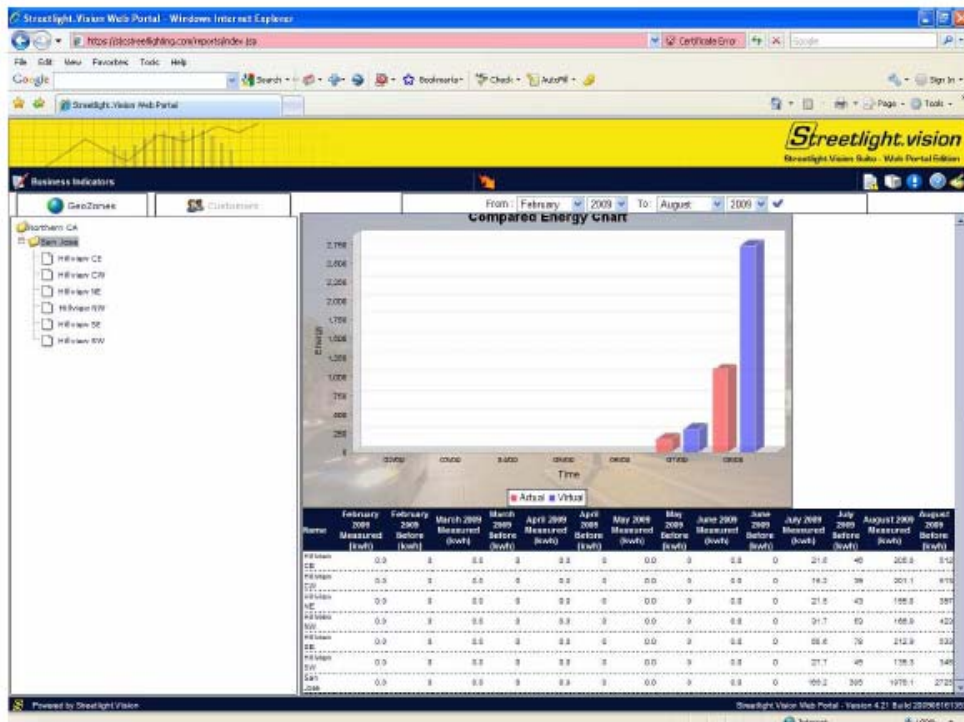


Figura 72 Esempio di schermata del sistema di controllo (report consumi)



Il sistema **ROAM Acuity** (Remote Operation Assert Monitor) consiste nelle seguenti componenti:

- ✓ Sistema ROAM di comunicazione/diagnostica fotoelettrica: è un dispositivo che si monta sull'apparecchio al posto del normale interruttore fotoelettrico, mediante un sistema di aggancio rapido standardizzato. Consente il controllo di sorgenti con potenza compresa tra i 45W e 1000W di ogni tipo, come ad esempio fluorescenti compatte, scarica, LED, induzione e incandescenza.



Figura 73 Sistema di controllo/diagnostica in sostituzione dell'interruttore fotoelettrico

Il sistema di comunicazione/diagnostica rileva e riporta lo stato di funzionamento dell'apparecchio (completamente funzionante, malfunzionamento apparecchio, nessuna comunicazione, malfunzionamento inaspettato, ecc), lo stato dell'alimentazione ogni ora (potenza media oraria, tensione minima e massima mediata nell'arco di 1h). L'accuratezza di misura delle grandezze elettriche è circa -5% al +10% nel range tra 40W e 1000W. Per una potenza di lampada di 400W, l'accuratezza è di circa 0.5%. La misura della luce ambiente è effettuata con un sensore al silicio opportunamente filtrato (correzione della risposta spettrale);

- ✓ ROAM gateway che consente di collegare fino a 2000 nodi alla rete wireless;
- ✓ Il centro di controllo remoto (NOC Network Operation Center) che gestisce le comunicazioni, la sicurezza, comunica i dati e gestisce la diagnostica a più alto livello;
- ✓ Internet Portal consente l'amministrazione completa dell'impianto, con la gestione del calendario delle accensioni attraverso un orologio astronomico o in modo manuale;

Il sistema non dispone, ad oggi, della funzione di dimming, limitando i risparmi conseguibili; l'azienda produttrice sta lavorando alla realizzazione di un modulo di controllo da incorporare negli apparecchi che consenta la regolazione mediante ballast/LED driver dimmerabili con segnale 0-10 V (ROAM DCM).

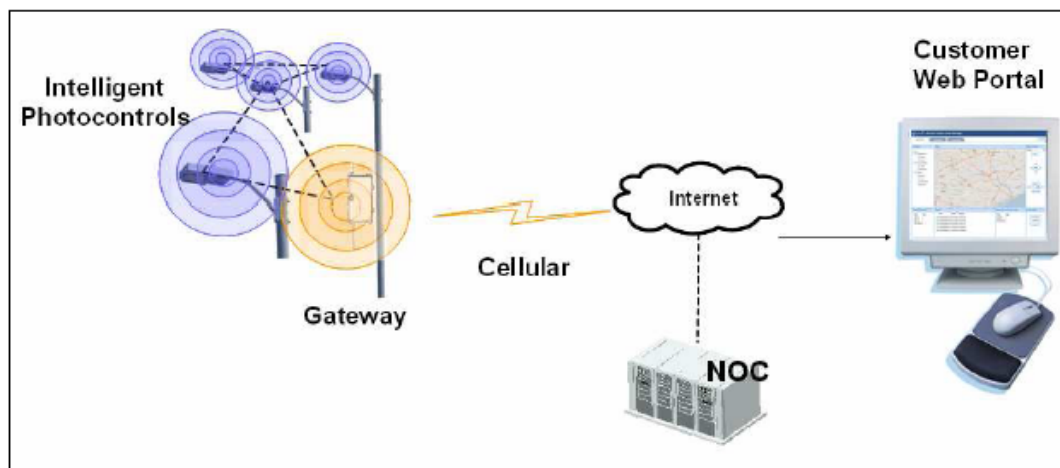


Figura 74 Schema di funzionamento del sistema di controllo ROAM



Il sistema è coperto da una garanzia di tre anni ed è progettato per una durata di 8 anni. I dati stimati di mortalità per il controllo fotoelettrico intelligente sono un tasso di guasti pari 0.76% annui, mentre i dati provenienti da esperienze sul campo (riferiti a circa 2 anni con 25.000 installazioni), suggeriscono un tasso di mortalità annuale del 1%.

Per quanto riguarda i consumi, ciascun controllo fotoelettrico intelligente consuma in media 1.6W con un massimo di 2.2W; il gateway assorbe una potenza media di circa 5.5 W con un massimo di 12 W e il sistema di monitoraggio che fornisce il consumo medio giornaliero non tiene conto di questi carichi. Il consumo dell'unità DCM (dimming) non è noto.

Il gateway serve da centrale di raccolta per le informazioni puntuali provenienti dai controlli fotoelettrici intelligenti posti nelle vicinanze. I nodi della rete comunicano con il gateway a 2.4 GHz, utilizzando il protocollo standard IEEE 802.15.4 ad un baud/rate di 250Kbit/s, con una portata in aria libera di circa di 300 m.

I nodi e i gateway formano una WAN; ciascun nodo comunica con gli altri nodi al fine di rendere disponibile le informazioni al gateway; il routing viene effettuato a livello di nodo in modo da migliorare la robustezza della rete.

La comunicazione tra il gateway e il NOC, viene effettuata attraverso rete cellulare, collegamento internet, se il primo non è disponibile nella zona. In alternativa si può sfruttare una connessione WiFi, se disponibile. Le comunicazioni tra il gateway e il NOC sono criptate secondo lo standard AES. Nel caso in cui la rete ROAM non sia disponibile, i sensori fotoelettrici intelligenti si commutano sul protocollo di default di accensione e spegnimento.

Il portale WEB consente i seguenti report/segnalazioni:

- ✓ Apparecchi completamente funzionanti;
- ✓ Apparecchi mal funzionanti;
- ✓ Apparecchi che funzionano ma presentano delle anomalie, quali ad esempio lampade a fine vita, lampada funzionanti durante il giorno, problemi di connessione;
- ✓ Sistemi senza alimentazione che non riescono a comunicare con il sistema ROAM;
- ✓ Misura Parametri elettrici con relativi report (tensione, potenza corrente) e allarmi su valori eccessivi di corrente o di potenza assorbita;
- ✓ Report sulle ore di funzionamento;

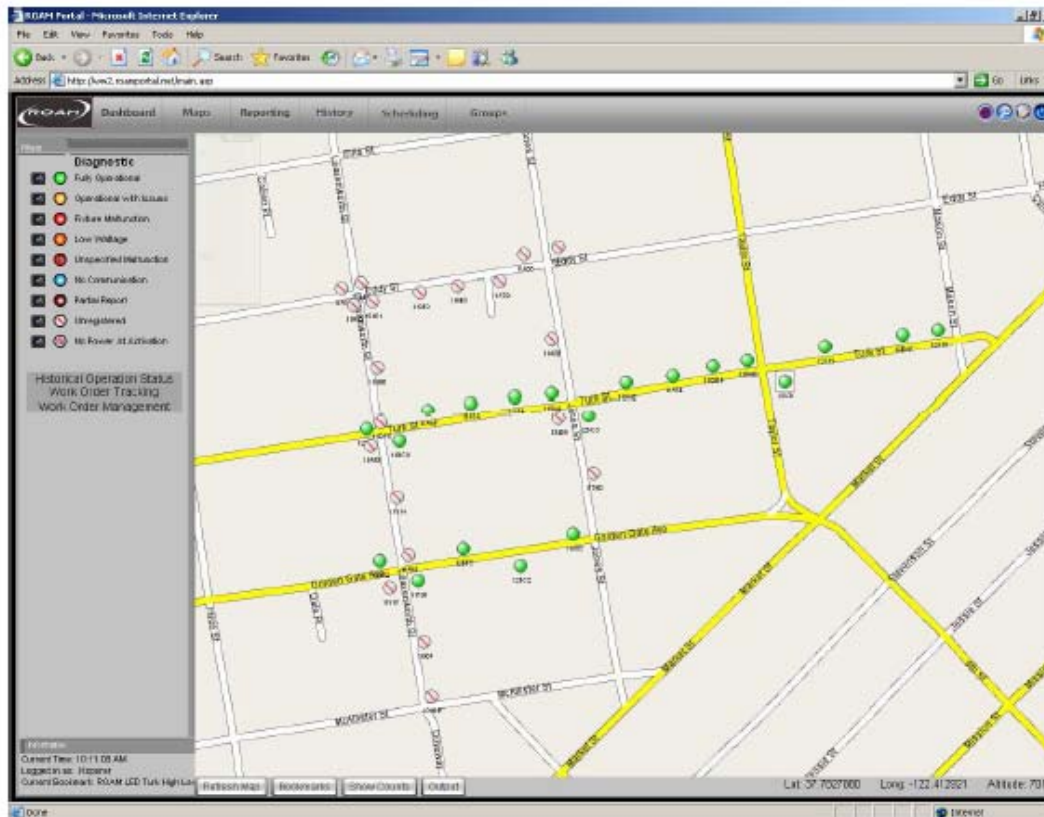


Figura 75 Schermata principale della rete di illuminazione a il riassunto della diagnostica ROAM

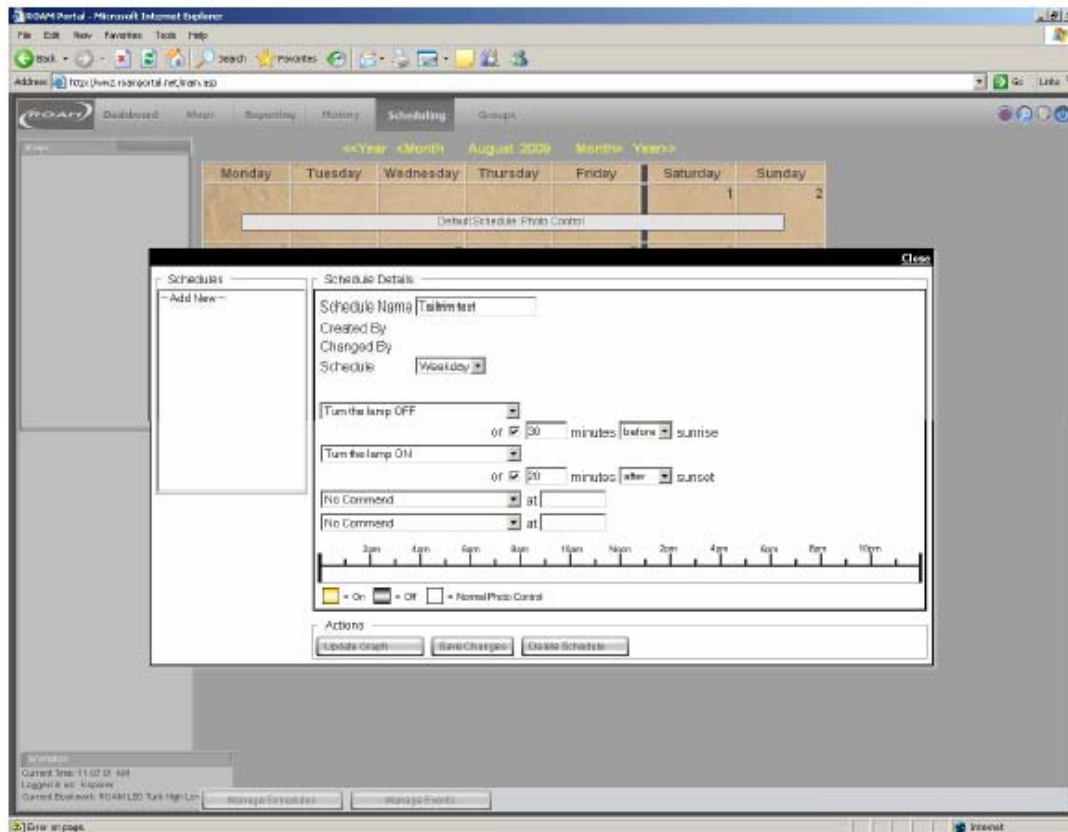


Figura 76 Interfaccia per la programmazione delle accensioni e spegnimento ROAM

Il sistema **Lumen IQ** comprende uno o più lamp controller (Lummen IQ C200), una o più lumen IQ station che servono da hub di comunicazione, lumen IQ Commander per la programmazione e il setup, Lumen IQ Central, il software di gestione basato su internet per l'amministrazione da un centro di controllo remoto.

Il lamp controller IQ C200, installato in ciascun apparecchio, è dotato di 3 componenti: un microprocessore dotato di interfaccia di comunicazione sulla banda dei 900 MHz²⁷ su una rete di comunicazione a RF che consente lo scambio di informazioni con IQ Station e altri apparecchi sulla stessa rete locale, un sensore di lampada in tempo reale, e una fotocellula intelligente.

Le informazioni rilevate dal sensore di lampada sono utilizzate dal microprocessore per controllare e regolare le performance della lampada in modo da soddisfare le specifiche inserite dal gestore attraverso Lumen IQ commander. Le cellule fotoelettriche, dotate di un sistema di orientamento proprietario per meglio rilevare il decadimento nel tempo del flusso emesso dalla lampada, non devono essere necessariamente presenti in ciascun apparecchio, ma di norma ce ne devono essere almeno 2 per ogni rete di 250 apparecchi. Il sistema può essere completato da un sensore GPS, per la localizzazione delle coordinate geografiche del centro, al fine di fornire informazioni più precise all'orologio astronomico per la determinazione dell'accensione e dello spegnimento.

La stazione Lumen IQ Station ha un raggio di azione di circa 300m e distribuisce le informazioni e i comandi alla rete in cui sono raggruppati fino a 250-500 lamp controller (compatibilmente con la portata).

La stazione IQ controller raccoglie le informazioni dai nodi e le invia a IQ Lumen Central attraverso una connessione internet dove una applicazione gestisce l'interfaccia tra il Data Base e uno o più Lumen IQ Station, consentendo agli operatori l'accesso alla rete di gestione

²⁷ Tutte le comunicazioni del sistema sono criptate a 128 bit (protocollo DES)

della pubblica illuminazione attraverso una connessione internet (sfrutta la rete GSM, CDMA o altra rete disponibile).

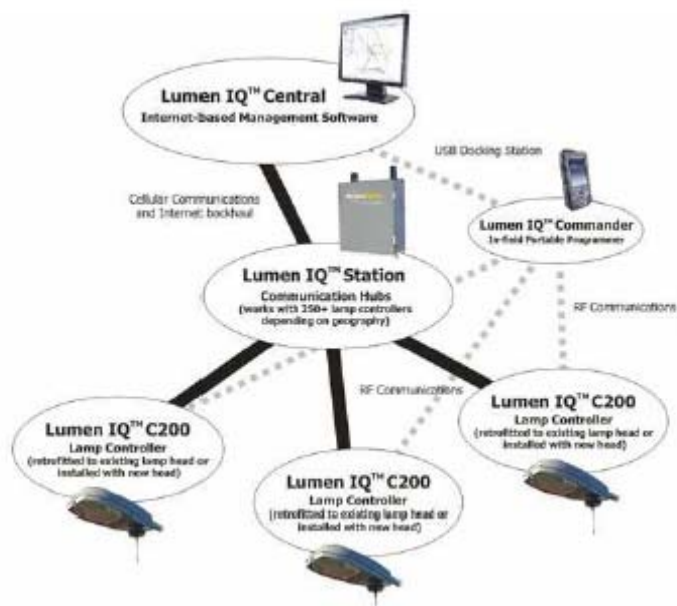


Figura 77 – Schema del sistema Lumen IQ.

Nella fase iniziale di messa in esercizio la stazione Lumen IQ Station invia a ciascun lamp controller i parametri operativi²⁸ (in alternativa possono essere un preset dei parametri effettuato in fabbrica), il sistema associa l'identificativo del lamp controller a ciascun palo, setta le informazioni relative al calendario e all'orario e tutte le informazioni sui componenti dell'apparecchio, incluso costruttore e modello, tipo di alimentatore, accenditore, condensatore per rifasamento. Il personale di manutenzione può aggiornare e modificare tale informazioni con un terminale portatile connesso alla Centrale di controllo.

Il sistema è in grado di regolare il flusso della lampada secondo 60 steps, approssimativamente con un intervallo pari a 1%; con le lampade a scarica la potenza di lampada può essere ridotta fino al 50%, mentre in abbinamento con i LED la potenza può essere variata nel range 0-100%.

I risparmi energetici possono derivare, sia dalla riduzione di flusso luminoso, nei periodi di riduzione del flusso di traffico, sia la gestione del flusso luminoso per tenere conto della riduzione del flusso luminoso al crescere delle ore di funzionamento delle lampade; in questo caso i risparmi conseguibili, dichiarati dal costruttore possono variare dal 17% (Sodio alta pressione da 150W) al 22% (Sodio alta pressione da 400W).

Il sistema di controllo delle lampade è in grado di rilevare la lampade a fine vita, togliendo l'alimentazione in modo da salvaguardare l'elettronica e risparmiare energia. La potenza di lampada è misurata una volta ogni 10 min, con accuratezza pari a 1%.

Il sistema è coperto da una garanzia di 2 anni e viene dichiarato un MTBF pari a 20 anni.

Per quanto riguarda i consumi elettrici, Lumen IQ station assorbe una potenza tra 20W e 40W, in funzione della tensione di alimentazione di ingresso e della configurazione, mentre il Lamp controller assorbe da 1 a 4W a seconda della tensione di alimentazione di ingresso (120V o 480V).

L'interfaccia del sistema di gestione consente la stesura del report della potenza consumata, la potenza risparmiata attraverso il dimming o la riduzione dovuta all'eliminazione della sovra-illuminazione dovuta al fattore di manutenzione dell'impianto, le anomalie e rotture dei componenti.

²⁸ I dati memorizzati vengono conservati per 7 giorni, per mancanza di alimentazione elettrica

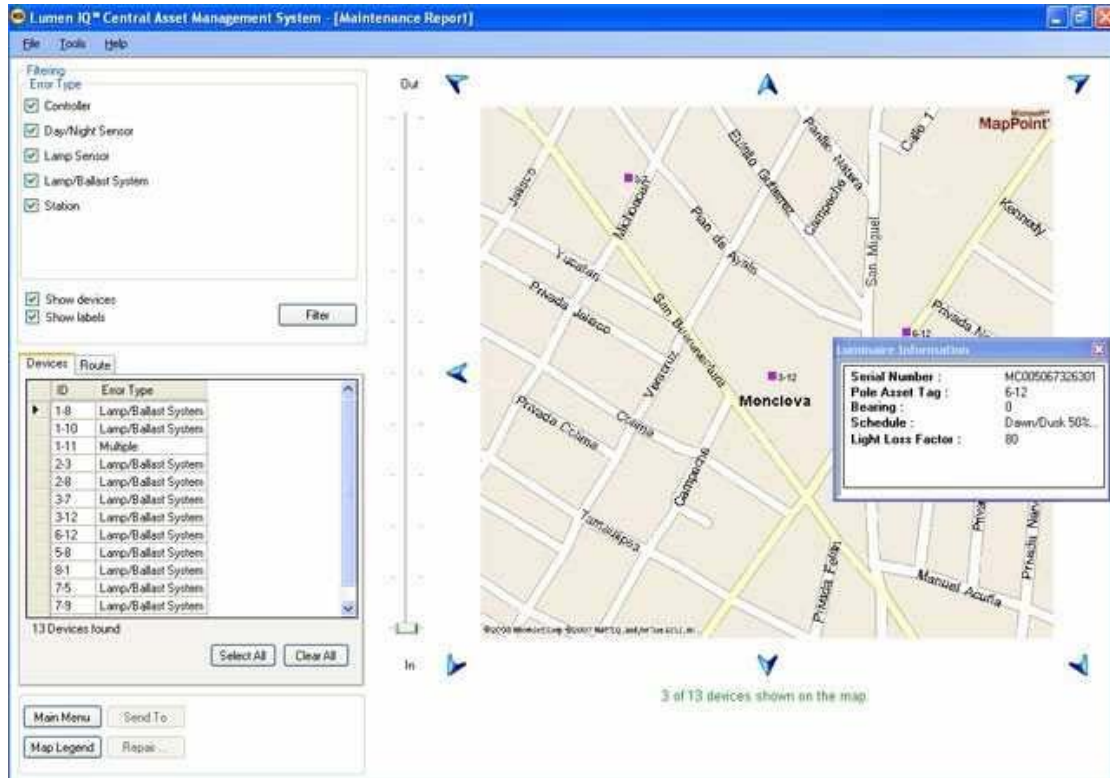


Figura 78 Interfaccia utente Lumen IQ

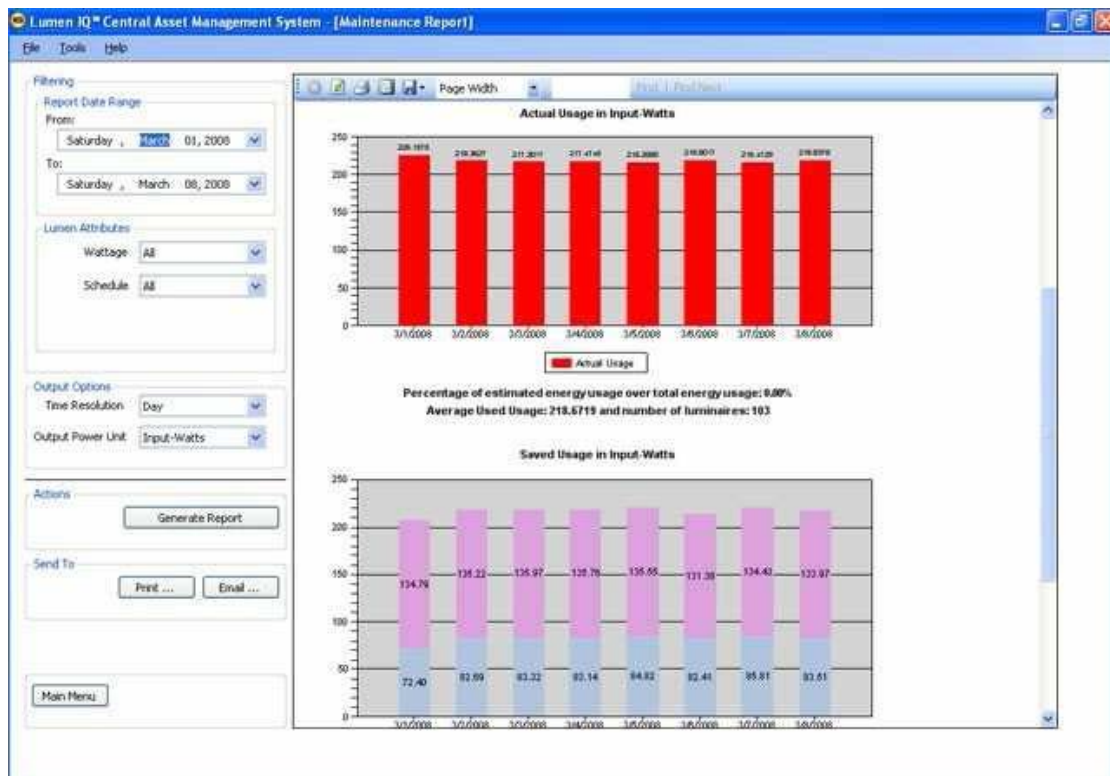


Figura 79 Esempio di report generati Lumen IQ



Il sistema della **TYCO Electronics Lumiwise²⁹** è costituito dalle seguenti componenti: Checkpoint che sono i nodi di una rete wireless per diagnosticare e controllare le lampade e comunicare con altri nodi della rete di controllo proprietaria (900 Mhz 2.4 GHz ISM band), Access point che esegue la mediazione tra il Data Center e ciascun CeckPoint (fino ad un massimo di 500). Lo scambio di informazioni tra access point a il Data Center avviene tramite connessione internet attraverso GPRS, Wi-Fi, Ethernet, ecc.



Twistlock Photocontroller socket mounted version



Figura 80 TYCO. Sistema di controllo e monitoraggio della lampada Ceckpoint in sostituzione dell'interruttore fotoelettrico standard (a sinistra) e l'Access point da incorporare all'interno dell'apparecchio in sostituzione del normale interruttore fotoelettrico e svolge le medesime funzioni del CeckPoint, oltre che il controllo della rete

Il sistema è adatto per lampade scarica e a induzione facenti uso di diversi tipi di ballast; il produttore garantisce inoltre la compatibilità con LED driver, anche se i test sono ancora in corso a livello di prove di laboratorio.

Per ciascun apparecchio, vengono monitorati i seguenti parametri (di solito ogni 3 h):

- ✓ Volt efficaci della linea di alimentazione;
- ✓ Corrente di alimentazione, comprensiva del sistema di controllo;
- ✓ Potenza totale del carico;
- ✓ Energia totale consumata;
- ✓ Fattore di potenza;
- ✓ Numero delle ore di funzionamento;
- ✓ Accenditore;

Il costruttore fornisce una garanzia di 1 anno sui difetti di fabbricazione e la vita stimata del sistema è valutata maggiore di 10 anni. Il valore di MTBF suggerisce una durata di 40 anni.

Per quanto riguarda i consumi il CeckPoint consuma circa 1.5W, mentre l'Access point consuma mediamente meno di 2.5W.



Figura 81 Esempio di Report di guasto generato dal sistema di controllo TYCO



Figura 82 Homepage del sistema di controllo e gestione che mostra le capacità di monitoraggio degli apparecchi, attraverso la visualizzazione del loro stato e delle proprietà TYCO

Il sistema consente il funzionamento degli apparecchi secondo la seguente modalità:

- ✓ On e Off basate su cellula fotoelettrica locale, con funzionalità di backup su un sistema basato su accensioni e spegnimenti a orari predefiniti in caso di rottura del dispositivo di controllo fotoelettrico;
- ✓ Accensione continua;
- ✓ Spegnimento continuo;



- ✓ Accensione e spegnimento basato su un programma;
- Il sistema è in grado di fornire una diagnostica sulla sua condizione di funzionamento:
- ✓ Funzionamento normale;
 - ✓ Controllo fotoelettrico non funzionante;
 - ✓ Oscillazione del controllo fotoelettrico;
 - ✓ Tensione di alimentazione al di fuori del range di funzionamento;
 - ✓ Lampada a fine vita;
 - ✓ Apparecchio non funzionante;
 - ✓ Autodiagnostica del dispositivo fallita;
 - ✓ Nessuna comunicazione (alimentazione, rete, o rottura del dispositivo);

Relume Sentinel è un sistema di controllo che consente l'accensione e lo spegnimento di gruppi e singoli apparecchi e offre la possibilità di dimming e di lampeggio (per individuazione delle vie di fuga) per LED sia di singoli apparecchi, sia di zone.

Il sistema è composto da tre parti principali:

- ✓ **Wireless Lighting Control**, che è incorporato o connesso all'apparecchio di illuminazione. Nel caso si utilizzi un apparecchio con lampade a scarica, il sistema andrà connesso ai terminali dell'interruttore fotoelettrico. Il sistema di comunicazione è di tipo bi-direzionale; i comandi di dimming, flashing, accensione e spegnimento sono ricevuti dal Wireless Lighting Control ed eseguiti. Il modulo è in grado di monitorare la corrente, la temperatura ambiente e gestire fino a due interfacce per la realizzazione di pulsanti di emergenza. Gli apparecchi possono essere equipaggiati anche con antenne per migliorare le performance nelle zone in cui il segnale RF è debole. Il componente, dotato di microprocessore e di una memoria flash, può essere aggiornato via software.

Il Wireless Lighting Control è dotato di un sensore fotoelettrico per la rilevazione della luce ambiente; al tramonto se il sistema non riceve informazioni dalla rete, attiva l'apparecchio con l'ultimo flusso di lampada conosciuto; all'alba l'apparecchio rimane nel suo stato di funzionamento presente, se nessun comando viene ricevuto dalla rete. Queste due modalità di funzionamento di default possono essere disabilitate.



Figura 83 Wireless Lighting Control

- ✓ Master network control, installato nel centro di controllo della città e funziona da interfaccia tra l'apparato RF dei singoli apparecchi e il computer di controllo a cui si può avere accesso anche da remoto, attraverso un collegamento internet. Le comunicazioni RF sono criptate con chiave a 128 bit;
- ✓ Una rete di comunicazione nella banda UHF 450 – 470 MHz (con opportuni ripetitori installati nella città) che consente di raggiungere ciascun nodo della rete;

L'utilizzo della rete UHF già disponibile in alcune città degli USA, riduce i costi di installazione iniziale dell'impianto.

Il sistema è stato progettato espressamente per sorgenti LED (la società che lo produce è anche un costruttore di apparecchi di illuminazione a LED) e quindi la compatibilità con materiali di altri fabbricanti potrebbe essere difficoltosa.

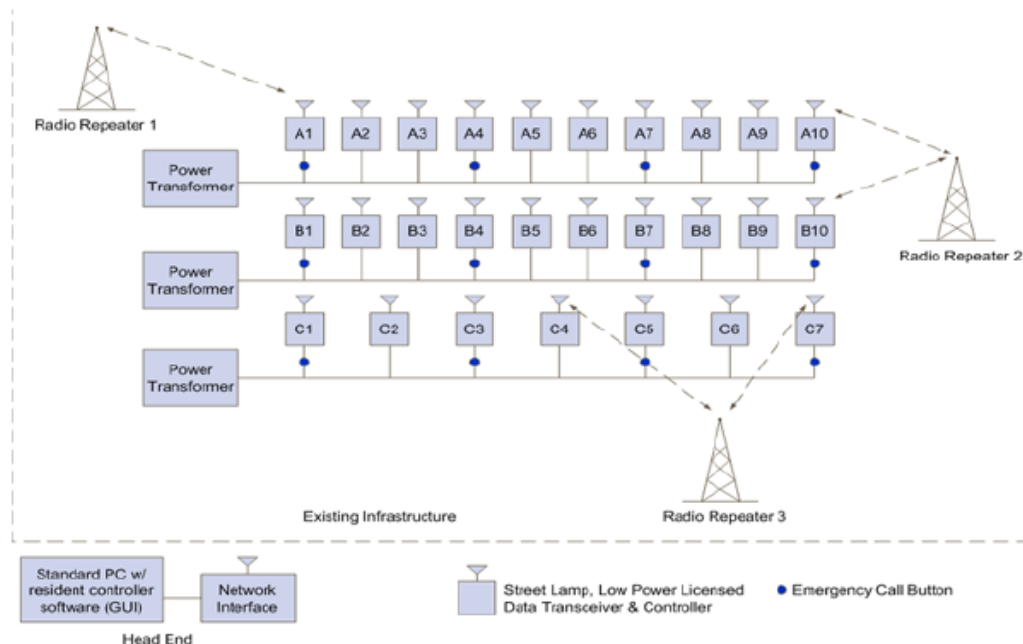


Figura 84 Architettura del sistema di controllo Relume Sentinel

Il sistema può comunque essere adattato a sorgenti tradizionali di illuminazione, quali lampade al sodio ad alta pressione o ioduri metallici.

In abbinamento con sorgenti LED, il flusso può variare dal 0% al 100% attraverso 16 passi di dimming a cui si aggiungono accensione e spegnimento. I livelli sono predefiniti e memorizzati nei ricevitori, ma possono essere personalizzati secondo le indicazioni del committente. Per quanto riguarda le lampade a scarica, i livelli di regolazione possibili sono soltanto due, pari al 100% e 50%-60% del flusso luminoso.

La garanzia offerta dal costruttore è di 5 anni, il consumo del modulo di controllo da incorporare è minore di 0.5W in standby.

Il software di gestione consente il controllo delle singole lampade, di gruppi (fino a 255 diversi, in modo che il funzionamento dell'impianto possa essere diversificato da zona a zona) e di conoscere lo stato di funzionamento di ciascun apparecchio.

Il sistema consente di avvertire l'operatore (per predisporre le opportune azioni correttive) in caso di lampada fuori servizio, eccessivo consumo di energia, temperatura apparecchio eccessiva, rottura elemento fotoelettrico, riduzione del segnale RF. Il controllo di ciascun gruppo di lampade o della singola sorgente può essere fatto manualmente, attraverso l'interfaccia grafica, o mediante la modalità programmata.

La tabella che segue mette a confronto, in maniera rapida, le funzionalità dei 5 sistemi di controllo e gestione fino ad ora descritti.



Summary of Network Control Product Characteristics, Features and Cost

Product	Echelon	ROAM	Lumen IQ	Lumawise	Sentinel
Company	Echelon http://www.echelon.com/	Roam Acuity http://www.roamservices.net	Streetlight Intelligence http://www.streetlightiq.com/	Tyco Electronics http://www.tycoelectronics.com	Rehume Technologies http://www.rehume.com/
Communications					
Communication Type	PLC	Mesh RF	Mesh RF	RF	RF
Frequency	N/A	2.4 GHz (802.15.4)	900 MHz	900 MHz, 2.4 GHz	450-470 MHz
Range	N/A	1,000 ft clear line of sight	1,000 ft	1,000 ft	Unknown
Backhaul Communications	Ethernet, Cellular, or Wi-Fi	Ethernet, Cellular, or Wi-Fi	Ethernet, Cellular, or Wi-Fi	Ethernet, Cellular, or Wi-Fi	Local Municipal UHF Radio
Controls and Components					
Fixture Level	LonWorks Node	Intelligent Photocontrol / Node	IQ C200 Lamp Controller	CheckPoints	Wireless Lighting Control Module
Gateway (ratio to streetlights)	Gateway (1: 1,000)	Gateway (1: 2,000)	IQ Station (1: 250-500)	AccessPoint (1: 500)	Master Network Module (1)
Other Interface Components (ratio)	Segment Controller (1:100)	N/A	N/A	N/A	City's existing UHF repeaters
System and Fixture Compatibilities					
Lamp Type(s) Compatibility	HID, LED, possibly others	HID, LED, CFL, Induction, Incandescent.	HID (†)	HID, MV, Induction, LED (limited)	HID (‡), LED
Ballast/Driver Min. Requirements	Dimmable elec. ballast or driver	N/A	N/A	N/A	N/A
Capabilities, Functions and Features					
Dimmability	Yes	No (‡)	Yes	No	Yes
Remote On/Off	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Power Metering (Accuracy)	No (‡)	Yes (0.5%)	Yes (1.0%)	Yes (Unknown)	Yes (1%)
Monitoring and Reporting	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Failure Detection	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Network Management, User Interface					
Web Interface	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Load from Network Control Components					
Node	1.3W	1.6W	1 - 4W	1.5W	0.5W
Gateway	41.3W	5.5W	20 - 40W	2.5W	N/A
Other	Segment Controller: 10W	N/A	N/A	N/A	N/A
Additional load per streetlight (‡)	3.1W	3.4W	2.3 - 8.9W	3.2W	1.1W



- (1) Currently, the company is working with several LED fixture manufacturers to tailor the Lumen IQ technology to LED fixtures.
- (2) Although designed for LEDs, Relume reports that their Sentinel technology is also adaptable to traditional MH and HID streetlights
- (3) ROAM Acuity's next generation product (expected to be available in summer 2010, in production volume) also will be compatible with dimmable streetlights
- (4) Future versions of Echelon's technology will reportedly include actual luminaire-level power monitoring devices.
- (5) Since controls components run continuously, to represent controls load on a per-streetlight basis for the period of time during which the streetlights are on, controls power must be multiplied by a factor of 24 hours (controls runtime) / 11.23 hours (average nightly streetlight runtime) = 2.14. The total controls power load per streetlight was calculated by dividing the number of controls components by the number of streetlights and multiplying this by the load per controls component times the runtime factor of 2.14.



2.4.2 Conclusioni ed osservazioni sui sistemi di controllo analizzati nel mercato statunitense

Sulla base delle informazioni riportate nel report, si può concludere che il controllo della rete di illuminazione, nel caso sia possibile un dimming dei flussi luminosi emessi, può consentire un risparmio fino al 30% rispetto ai sistemi tradizionali. Il costo iniziale di impianto è indubbiamente maggiore rispetto al tradizionale, ma i risparmi energetici e manutentivi sono effettivi³⁰.

Scenario	Lamp Type	Type of Savings	Annual Energy Use per Streetlight (KWh/yr)	Savings (% from Baseline)
	Baseline (HPS)	NA	528	NA
H1	HPS	-Adaptive dimming	422	20%
H2	HPS	-Adaptive dimming -Depreciation compensation	409	23%
H3	HPS	-Adaptive dimming -Depreciation compensation -Shorten runtime	372	29%
L0	LED	-HID-to-LED savings (No network controls)	239	55%
L1	LED	-HID-to-LED saving - Adaptive dimming	191	64%
L2	LED	-HID-to-LED saving -Adaptive dimming -Depreciation compensation	185	65%
L3	LED	-HID-to-LED saving -Adaptive dimming -Depreciation compensation -Shorten runtime	168	68%

Figura 85 Risparmi conseguibili attraverso l'adozione di sistemi di controllo intelligente rispetto a quelli tradizionali, nel caso di impiego di lampade scarica (HPS) e sorgenti LED

Si osserva che la tabella è basata sulle seguenti assunzioni, alcune da verificare con dati sperimentali:

- ✓ Il risparmio dovuto alla compensazione della sovra illuminazione iniziale degli impianti è basata su una lampada Sodio Alta pressione da 150W, con flusso luminoso iniziale di 10.500 lm, vita utile 15000 h e una riduzione del 13% del flusso luminoso durante la prima metà della vita utile per compensare la sovra illuminazione. Si considera, per semplicità, un andamento lineare nel tempo della potenza in funzione del flusso e della riduzione di flusso al trascorrere delle ore di funzionamento;
- ✓ Riduzione dei livelli nelle ore centrali della notte (apparecchi funzionano al 100% della potenza per il 60% delle ore di funzionamento, mentre funzionano a potenza ridotta al 50% per il rimanente 40%);
- ✓ Equivalenza delle prestazioni impiantistiche, secondo gli standard USA, di un apparecchio a LED con un consumo 58.3 W con uno dotato di lampada al sodio alta pressione, con potenza assorbita pari a 129W. Sarebbe un parametro da verificare,

³⁰ Pacific Gas and Electric Company, "Emerging Technologies Program Application Assessment Report #0914 Street Lighting Network Controls Market assessment Report", January 2010



- secondo gli standard Europei, ed eventualmente correggere tutte le stime, tenuto conto dei dati sperimentali del confronto;
- ✓ Il risparmio dovuto alla riduzione del sovra illuminamento iniziale per gli apparecchi a LED è stato calcolato supponendo che la vita utile coincida con il raggiungimento del 70% del flusso iniziale; il risparmio sarebbe quindi dovuto ad una riduzione lineare dal 15% a 0% del flusso luminoso durante la prima metà di vita utile del componente per compensare la sovra-illuminazione iniziale;

La combinazione di questi sistemi di controllo con la tecnologia LED, porterà a ulteriori risparmi rispetto a un impianto tradizionale, basato su lampade al Sodio Alta pressione e sistemi di controllo tradizionali.

2.5 Il sistema di telecontrollo della Pubblica Illuminazione Milanese

Il sistema di telecontrollo della pubblica illuminazione del comune di Milano è stato realizzato da AEM (oggi A2A) nell'ambito del piano urbano della luce varato nel 1999 dal Comune di Milano, che prevedeva l'ammodernamento degli impianti di illuminazione presenti sul suo territorio.

Ogni impianto di illuminazione pubblica consiste in un armadietto in vetroresina contenente il quadro di comando e protezione al quale si attestano una linea di alimentazione a 400 Vac per l'allacciamento alla rete di distribuzione elettrica e 4 linee a 230 V per l'alimentazione dei punti luce.

Le linee di alimentazione sono raggruppate in due tipologie, distinguendo quelle adibite alla illuminazione di sicurezza (viabilità e sicurezza del cittadino) e quelle destinate all'illuminazione scenografica dei beni storici e monumentali.

Il sistema di controllo è responsabile del monitoraggio dell'intervento di eventuali protezioni presenti nel quadro elettrico, alla lettura dei consumi energetici del singolo quadro elettrico, al settaggio degli orari di accensione e spegnimento delle due tipologie di impianto in funzione dello stato degli interruttori fotoelettrici e delle esigenze di risparmio energetico (spegnimento anticipato dell'illuminazione scenografica).

Gli impianti non sono distribuiti in maniera uniforme sul territorio comunale; questo crea la necessita di utilizzare diversi sistemi di trasmissione (GMS, WAN, Wired Ethernet) in base alle disponibilità nelle zone in cui sono ubicati gli impianti.

Al fine di ridurre il numero di comunicazioni verso il centro di controllo, i gruppi di dispositivi di telecontrollo sono stati connessi in minireti (fino a 64 dispositivi collegati), mediante fibra, lasciando solo ad uno di essi il compito di connettersi con il centro di controllo (il nodo della mini rete collegato al centro di controllo, denominato MTU, si trova di solito in prossimità della rete telematica AEM o utilizza un collegamento GSM). Le MTU funzionano quindi come dispositivi di controllo degli altri nodi della mini rete e come concentratore delle RTU (dispositivi di acquisizione e controllo periferici) verso la centrale di controllo.

L'accensione e lo spegnimento degli impianti sono gestiti sulla base dello stato di tutte le fotocellule che afferiscono ai quadri della minirete; l'accensione si avrà quindi solo quando una certa percentuale di essi avrà superato il valore di soglia definita dal gestore dell'impianto. In modo analogo viene gestito lo spegnimento dell'illuminazione funzionale, mentre per le aree verdi e l'illuminazione monumentale, viene definito un orario di spegnimento anticipato.

Risulta inoltre possibile una gestione manuale (in accensione e in spegnimento) degli impianti, in maniera del tutto indipendente dallo stato delle fotocellule.

Nel caso di interruzione del collegamento all'interno della minirete, saranno le fotocellule a governare le accensioni e gli spegnimenti dell'impianto; mentre nel caso di interruzione della comunicazione tra MTU e centro di controllo vengono ripristinate le condizioni di accensione e spegnimento ordinario per tutte le periferiche che si trovano in stato di funzionamento manuale (si evita che alcuni impianti rimangano permanentemente accesi o spenti).

Il sistema è in grado di rilevare lo stato di ciascun quadro elettrico controllato, con riferimento alla protezione sulle linee di alimentazione delle lampade, l'intervento della protezione sulla fotocellula, la dispersione di corrente verso terra prima che scatti la protezione dell'interruttore



differenziale, lo stato di alimentazione del sistema di controllo RTU, con segnalazione dell'avvenuta entrata in servizio della batteria tampone.

2.6 Conclusioni sui sistemi di controllo dinamici

Dall'analisi dei dati provenienti da differenti studi pilota su applicazioni di controllo adattivo degli impianti di illuminazione pubblica, le seguenti conclusioni possono essere tratte³¹:

- ✓ Circa 80000 apparecchi sono controllati con le nuove tecnologie in differenti paesi del mondo; per la maggior parte i centri luminosi impiegano lampade a vapori di sodio e in qualche caso lampade fluorescenti compatte;
- ✓ Le tecnologie per la trasmissione delle informazioni e dei segnali di controllo sono le più diverse, PLC (power line controller), RF (radio frequency), collegamento in fibra ottica, Internet, SMS, GSM;
- ✓ Il risparmio stimato dall'adozione di questo genere di impianti varia tra 20% e 50% in dipendenza di molti fattori; in alcuni paesi la sostituzione di apparecchi di illuminazione ormai obsoleti, ha consentito di raggiungere risparmi 60%-70%;
- ✓ Il risparmio di energia dovuto alla gestione intelligente dell'installazione luminosa, può essere quantificato tra il 10%-20%;
- ✓ Il mercato dei sistemi di controllo per la pubblica illuminazione basati su queste nuove tecnologie è molto dinamico e ancora nuovo sia come struttura, sia come prezzi. Le tendenze che si possono intravedere riguardano la riduzione dei prezzi dei nuovi prodotti e tecnologie come risultato dello sviluppo dei prodotti e della comparsa sul mercato di un gran numero di produttori in tutti i paesi del mondo. L'aumento del costo dell'energia e del costo della manodopera specializzata per la manutenzione avrà come conseguenza la necessità di ridurre queste due voci attraverso un sistema di gestione intelligente dell'illuminazione pubblica;
- ✓ La preparazione di standard e regolamenti dettagliati, soprattutto da un punto di vista tecnico/tecnologico, potrà essere un valido strumento per la diffusione di queste nuove tecnologie in tutti i paesi Europei. Occorre infatti superare la diffidenza verso le nuove tecnologie (ciò che c'è funziona bene, ciò che è nuovo deve dimostrare di funzionare meglio prima di essere adottato in uno standard o in una prescrizione di legge) e questo sforzo può essere fatto solo realizzando degli impianti pilota da cui trarre preziose informazioni;
- ✓ Si ravvisa la necessità di un protocollo aperto (di interscambio tra i diversi sistemi e tecnologie ad oggi in uso) per le comunicazioni, soprattutto per garantire l'espandibilità futura degli impianti e per non essere legati indissolubilmente a un solo fornitore (occorre infatti ipotizzare che installazioni molto complesse possano essere realizzate in tempi successivi, con fornitori e materiali diversi da lotto a lotto);

Anche se le strutture dei sistemi di controllo sono molto simili tra loro, i parametri di controllo e le strategie possono essere notevolmente differenti e dipendenti dal caso specifico, dal budget, dalle necessità del committente.

I sistemi basati su una pianificazione oraria sono ad oggi molto usati quando il pattern di variazione del traffico è molto ben conosciuto e quindi si può ragionevolmente assumere che una semplice pianificazione oraria sia sufficiente a garantire un risparmio energetico senza compromettere la sicurezza stradale.

L'analisi del flusso di traffico è basata su analisi precedenti o con analogie con altre situazioni o installazioni; il flusso delle lampade è controllato a livello centrale dal sistema di controllo che regola il flusso luminoso delle lampada su due o quattro livelli, in accordo con il programma orario definito, che dipende dal flusso di traffico stimato in quelle ore della giornata. L'accensione o lo spegnimento degli impianti è determinato da una o più cellule fotoelettriche (l'accensione o lo spegnimento avvengono quando un certo numero di sensori fotoelettrici si trova sopra o sotto soglia), oppure da un interruttore astronomico. La soluzione è facilmente applicabile e consente un significativo risparmio energetico rispetto a un

³¹ "Intelligent Road and Street Lighting in Europe (E-Street)" WP3: Market penetration and procurement activities D3.4 Procurement evaluation report, 30 June 2008, Sofia



impianto tradizionale; tuttavia il sistema è incapace di adattarsi in tempo reale alle reali necessità di illuminazione che dovessero rendersi necessarie.

Se lo scopo del sistema di controllo è quello di massimizzare il risparmio è necessario che il flusso luminoso emesso sia ridotto in accordo con le condizioni del traffico; la possibilità di utilizzare telecamere o spire inserite nell'asfalto per monitorare il numero di veicoli nell'intervallo di osservazione fissato, in modo da poter regolare opportunamente la potenza delle lampade installate.

La misura del numero di veicoli in un'ora è un parametro di ingresso del sistema che varia troppo lentamente per rispondere alle variazioni di traffico e quindi risulta inadatto a determinare le esigenze di illuminazione della strada.

Un intervallo di rilevazione di 15 minuti e l'utilizzo di almeno due o quattro livelli di dimming potrebbero essere un buon compromesso tra le esigenze di regolazione e le necessità tecniche di trasmissione delle informazioni e dei comandi e le transizioni che occorre realizzare per passare da un livello di dimming ad un altro³².

Con le spire o le camere di controllo del traffico è possibile monitorare la densità dei veicoli in ciascun corsia (o direzione di marcia), in modo da poter prendere in considerazione variazioni legate a ore di punta o condizioni di viabilità difficoltosa dovute ad esempio a lavori (limitatamente alle strade che portano un elevato volume di traffico, come tangenziali, raccordi autostradali, ecc).

Informazioni circa le condizioni meteorologiche, in collegamento con le informazioni sulla complessità del traffico, dovrebbero consentire di stabilire le condizioni di visibilità degli automobilisti in modo da poter regolare l'impianto al migliore livello di illuminazione possibile senza pregiudicare la sicurezza stradale.

Un altro possibile parametro di controllo potrebbe essere la condizione della superficie stradale, rilevata da stazioni meteorologiche, con particolare riferimento alle condizioni potenzialmente pericolose per la circolazione dei veicoli come la presenza di ghiaccio, pioggia, neve sulla carreggiata³³.

2.7 Sistemi di controllo e Mesopic Street Lighting

L'impiego di sistemi di controllo dinamico degli impianti di illuminazione pubblica, pone la necessità di investigare se la risposta alla luce degli esseri umani, in condizioni di dimming, ottenga qualche vantaggio dall'impiego di sorgenti ad ampio spettro (a luce bianca) rispetto ad altre sorgenti con emissione spettrale assai più limitata (es. lampade sodio alta pressione). La sensibilità spettrale dell'occhio umano non è costante lungo tutto lo spettro del visibile (380-780 nm), ma varia in funzione della lunghezza d'onda; questo comportamento segue due differenti curve di risposta spettrale in dipendenza del livello di illuminazione.

Per un occhio adattato a livelli di illuminazione al di sopra delle 3 cd/m², si utilizza la curva fotopica, come accade ad esempio in condizioni di luce naturale diurna, in cui la risposta dell'occhio umano è dominata dai coni.

Tuttavia, al di sotto di un livello di adattamento pari a 0.01 cd/m², quando i fotorecettori attivi sono i bastoncelli, la risposta spettrale dell'occhio umano segue l'andamento della curva di visibilità scotopica.

Nelle condizioni intermedie tra le condizioni di luce diurna e quelle dell'oscurità, in un intervallo di adattamento compreso tra 0.01 cd/m² e 3 cd/m², in cui cadono i tipici valori di luminanza prodotti dall'illuminazione stradale notturna, coni e bastoncelli provvedono entrambi a determinare la risposta spettrale dell'individuo, con un aumento della risposta dei

³² La transizione tra due livelli di regolazione del flusso lampada non può essere troppo repentina, se si vuole assicurare una lunga durata delle lampade. Inoltre, per alcune sorgenti, occorre prevedere un certo transitorio per il raggiungimento di una condizione di "equilibrio" caratterizzata da una emissione di flusso stabile.

³³ La luminanza della carreggiata potrebbe essere un indicatore delle condizioni della superficie stradale perché ha una buona dinamica e in condizioni di asfalto bagnato il suo valore cambia significativamente rispetto ad un manto asciutto. Tuttavia vi sono un a serie di difficoltà nella sua misura, prima tra tutte il posizionamento dello strumento (che tipo di strumento, tradizionale o image based) per la misura (in direzione perpendicolare al flusso del traffico o per quanto possibile in direzione longitudinale in accordo con il senso di marcia dei veicoli) e l'effetto degli oggetti che circondano il campo visivo (segnali stradali, edifici, luci di spazi commerciali, ecc)



coni e una diminuzione dei bastoncelli al crescere del livello della luminanza di adattamento. Questo intervallo di valori di luminanza coincide con la visione mesopica.

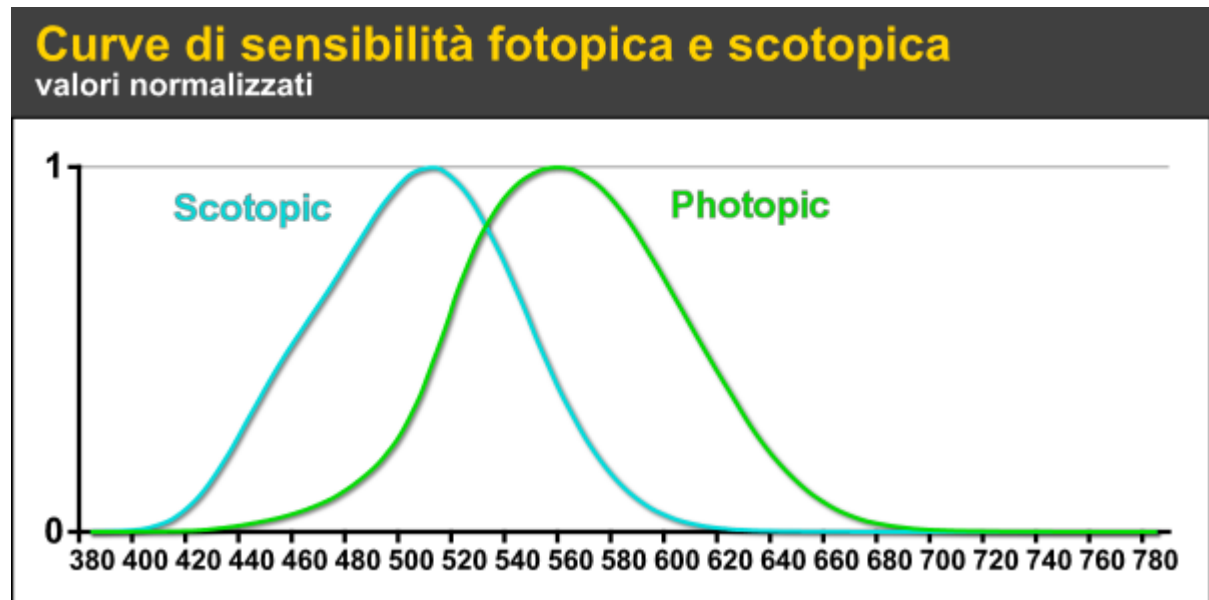


Figura 86 Andamento della curva di sensibilità spettrale fotopica (verde) e scotopica (blu)

Le sorgenti di luce bianca (es. ioduri metallici, LED, induzione) emettono energia all'incirca su tutto lo spettro del visibile e ciò fa sì che tutti i tipi di coni, sensibili a diverse lunghezze d'onda (corte, medie, lunghe), siano eccitati dallo stimolo luminoso, insieme ai bastoncelli in misura che dipende dal livello di luminanza di adattamento del compito visivo. In caso di sorgenti a spettro stretto (sodio alta pressione, sodio bassa pressione, LED colorati) queste sono in grado di eccitare uno specifico tipo di fotorecettore (lo spettro potrebbe essere uno stimolo insufficiente per i bastoncelli o i coni che rispondono alle corte o medie lunghezze d'onda).

La performance visiva e la percezione di brillantezza a livelli di adattamento della curva mesopica, possono essere quindi aumentati mediante l'utilizzo di sorgenti che emettono nelle corte-medie lunghezze d'onda dello spettro del visibile.

Dal momento che la visione mesopica è il risultato della risposta combinata della curva di efficienza luminosa fotopica e scotopica, allora ogni miglioramento di brillantezza percepita o di performance visiva dovuto all'utilizzo di sorgenti ad ampio spettro dipenderà dalla risposta di entrambi i tipi di fotorecettori (coni e bastoncelli).

La distribuzione di questi fotorecettori non è uniforme all'interno della retina; i coni responsabili della risposta fotopica sono abbondanti nella parte centrale della retina e quindi prevalgono nella visione di compiti visivi in asse. I bastoncelli, associati alla risposta scotopica, si trovano maggiormente nella zona periferica della retina e quindi prevalgono per compiti visivi fuori dall'asse di visione.

La conseguenza è che gli studi compiuti per valutare l'effetto di sorgenti ad ampio spettro nella pubblica illuminazione, portano a risultati differenti a seconda del tipo di compito visivo utilizzato per la valutazione. Dal momento che i coni dominano nella risposta in asse, gli studi che hanno utilizzato compiti visivi in asse e sono basati sulla capacità di riconoscimento degli oggetti, mostrano uno scarso miglioramento dovuto all'impiego di sorgenti ad ampio spettro.

Al contrario, studi che utilizzano l'intero campo visivo (percezione della brillantezza) o target posti al di fuori dell'asse di visione hanno mostrato significativi miglioramenti.

L'importanza dei due diversi compiti visivi dipende dall'applicazione, e in generale nella guida notturna entrambi i compiti visivi risultano presenti.

Attualmente gli standard e le norme si riferiscono soltanto alla visione fotopica e non tengono in conto le caratteristiche scotopiche o mesopiche della sorgente impiegata; risparmi sono



possibili solo attraverso una revisione degli standard per tenere conto dei miglioramenti della performance visiva dovuti all'impiego di sorgenti con differenti distribuzioni spettrali.

Due sono i modelli principali definiti dalla letteratura scientifica per definire il livello mesopico di illuminazione equivalente a partire dal livello di illuminazione e dalla distribuzione spettrale della sorgente:

- ✓ X-model (Unified System of Photometry)³⁴;
- ✓ MOVE (Mesopic Optimization of Visual Efficiency)³⁵;

Ci sono due differenze principali tra i due modelli:

- ✓ Il tipo di esperimenti/compiti visivi utilizzati per ricavare i dati iniziali su cui i due modelli sono basati;
- ✓ Il limite superiore del range di percezione mesopica;

Nel X-model, gli esperimenti sono stati condotti valutando il tempo di reazione e il brightness matching nel range mesopico; il modello MOVE è basato sul tempo di reazione, il contrasto di soglia e su esperimenti di riconoscimento di soglia.

Il modello di Rea (X-model) si applica solo per luminanze fino a 0.6 cd/m^2 , mentre il modello MOVE considera livelli fino a 10 cd/m^2 .³⁶

Il modello LEM (lumen effectiveness multiplier) proposto da Lewin nel 2001, offre un differente approccio per la valutazione dell'efficienza delle sorgenti a luce bianca in condizioni di bassi livelli di illuminazione.³⁷

Il modello prevede che il valore di luminanza calcolato utilizzando la risposta spettrale fotopica e il valore di flusso luminoso nominale delle sorgenti indicato dal fabbricante, sia moltiplicato per il coefficiente LEM, per tenere conto dell'effettivo incremento nel livello di brillantezza percepita dovuto all'utilizzo di uno spettro di lampada migliorato.³⁸

Il modello è stato originariamente sviluppato tenendo conto delle sorgenti maggiormente utilizzate nella pubblica illuminazione (sodio alta pressione, sodio bassa pressione, ioduri metallici e vapori di mercurio) e i valori LEM sono stati normalizzati in modo tale che il moltiplicatore attribuito alla lampada al sodio alta pressione sia pari a 1.0.

Successivamente il modello è stato esteso con l'introduzione delle distribuzioni spettrali di altre 4 sorgenti luminose (LED a luce calda e fredda e lampada ad induzione a luce calda e fredda).

Il valore del coefficiente assume valori tanto più elevati tanto più la distribuzione spettrale della sorgente si sposta verso la banda del blue/verde, con una diminuzione del livello di luminanza.

³⁴ Mesopic Optimization for Visual Efficiency. Performance Based Model for Mesopic Photometry. Helsinki University of Technology Lighting Laboratory. Report 35. Espoo, Finland 2005

³⁵ Viikari M, Chen W, Eloholma M, Halonen L, Chen D, 2006 Comparative study of two visual performance based on mesopic reaction time and contrast threshold data. Light & Engineering, 14(4):2132

³⁶ Recentemente (2008) una variante del modello è stata proposta, riducendo il limite superiore a 5 cd/m^2

³⁷ Lewin, Ian "Lumen effectiveness Multipliers for Outdoor Lighting Design" Journal of Illuminating Engineering Society, JIES Summer 2001, Illuminating Engineering society of North America

³⁸ Lewin, Ian "Lumen effectiveness Multipliers for Outdoor Lighting Design" Journal of Illuminating Engineering Society, JIES Summer 2001, Illuminating Engineering society of North America



Lumen Effectiveness Multipliers from Brightness Matching Mesopic Functions.

Luminance (cd/sq.m.)	.001	.01	.1	1	3	10
Metal Halide	2.25	2.11	1.82	1.35	1.13	1.00
High Pressure Sodium	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Clear Mercury	1.48	1.43	1.38	1.22	1.09	1.00
Low Pressure Sodium	0.47	0.51	0.61	0.82	0.95	1.00
Cool White LED	2.75	2.57	2.09	1.47	1.22	1.00
Warm White LED	1.71	1.67	1.50	1.23	1.10	1.00
Cool White Induction	2.24	2.14	1.83	1.36	1.17	1.00
Warm White Induction	1.83	1.77	1.56	1.24	1.11	1.00

Figura 87 Valore del moltiplicatore per diversi tipi di sorgente (dati ricavati da esperimenti di Brightness matching) per livelli di adattamento mesopico.³⁹

Lumen Effectiveness Multipliers from Reaction Time Mesopic Functions.

Luminance (cd/sq.m.)	Scotopic	0.03	0.1	0.3	Photopic
Metal Halide	2.58	2.30	1.88	1.40	1.00
High Pressure Sodium	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Clear Mercury	1.98	1.79	1.53	1.22	1.00
Low Pressure Sodium	0.35	0.46	0.64	0.83	1.00
Cool White LED	3.11	2.45	1.98	1.51	1.00
Warm White LED	1.86	1.64	1.45	1.24	1.00
Cool White Induction	2.47	2.05	1.72	1.38	1.00
Warm White Induction	1.97	1.72	1.51	1.27	1.00

Figura 88 Valore del moltiplicatore per diversi tipi di sorgente (dati ricavati da esperimenti sul tempo di reazione) per livelli di adattamento mesopico.⁴⁰

La norma UNI 13248 prevede la riduzione/aumento del livello minimo mantenuto della luminanza stradale in funzione della distribuzione spettrale delle lampade utilizzate. La giustificazione di questa possibilità risiede nel fatto che le sorgenti di luce con una distribuzione spettrale che fornisce un elevato rapporto scotopico/fotopico (sorgente il cui spettro stimola meglio i bastoncini dell'occhio a parità di valore di luminanza fotopica), produce una percezione di maggiore brillantezza⁴¹ e una più rapida percezione degli ostacoli periferici a parità di livello di luminanza^{42,43}.

³⁹ Lewin I, O'Farrell j. "Extension of the Concept of Lumen Effectiveness Multiplier to LED's and Induction Lamps" Report to Sacramento Municipal Utility District, May 2009. Lighting Sciences Inc. Scottsdale, AZ

⁴⁰ Lewin I, O'Farrell j. "Extension of the Concept of Lumen Effectiveness Multiplier to LED's and Induction Lamps" Report to Sacramento Municipal Utility District, May 2009. Lighting Sciences Inc. Scottsdale, AZ

⁴¹ Fotios SA, Cheal C. Lighting for subsidiary streets: investigations of lamps of different SPD, part 2 – brightness. Lighting Research and Technology 2007; 39: 215–232.

⁴² Akashi Y, Rea MS. Peripheral detection while driving under a mesopic light level. Journal of

La Figura 89 pone in relazione la percentuale di illuminamento di una scena di test illuminata con lampade a ioduri metallici rispetto a quello ottenuto con lampade al sodio ad alta pressione, affinché una percentuale di intervistati, riportata sulle ascisse, ritenga che la scena illuminata con le lampade a luce bianca sia più brillante di quella illuminata con il sodio⁴⁴.

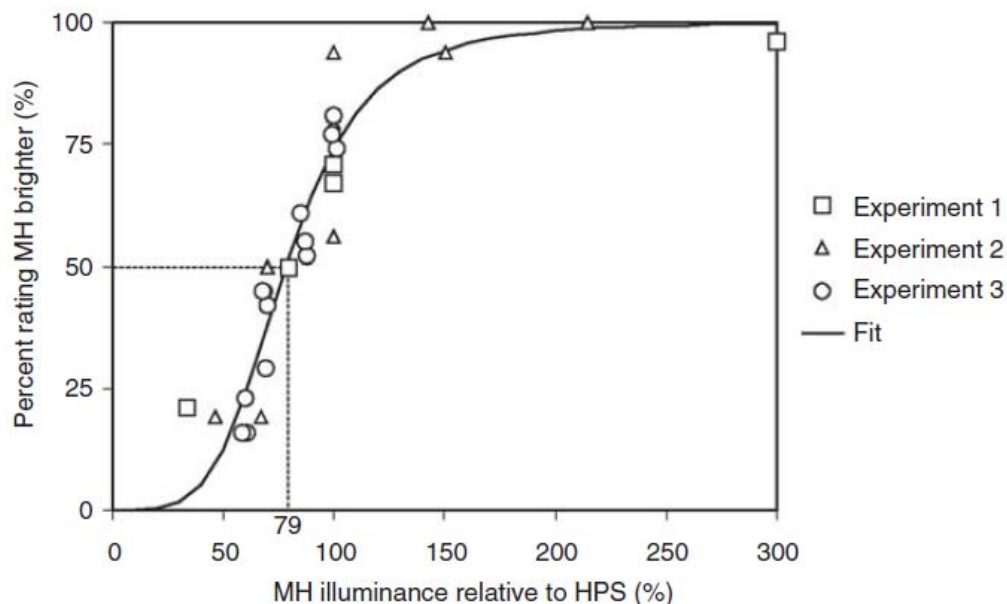


Figura 89 Valori di brillantezza percepita dai soggetti intervistati negli esperimenti 1,2,3 insieme a una funzione che riporta, sulle ascisse, il rapporto percentuale tra illuminamento con lampade MH rispetto a quello ottenuto con lampade HPS e sulle ordinate la percentuale di risposte in cui la scena illuminata con MH è stata giudicata più brillante.

La riduzione di classe illuminotecnica è ammessa dalla norma UNI solo per le sorgenti con un indice di resa cromatica (R_a) maggiore di 60, la norma sulla illuminazione stradale del Regno Unito BS 5489-1:2003 limita questa possibilità alle sole strade classificate come “subsidiary road” (strade dove l’utente principale è il ciclista o il pedone) corrispondenti alle classi S della norma EN 13201.

Per maggiori dettagli, si veda quanto riportato alla Figura 90.

Table B.4 — Lighting classes for subsidiary roads (pedestrians and cyclists)

Crime rate	R_a value	Lighting class					
		Low traffic flow ^a		Normal traffic flow ^b		High traffic flow ^c	
		E1/E2 ^d	E3/E4 ^d	E1/E2 ^d	E3/E4 ^d	E1/E2 ^d	E3/E4 ^d
Low	$R_a < 60$	S5	S4	S4	S3	S3	S2
	$R_a \geq 60$	S6	S5	S5	S4	S4	S3
Moderate	$R_a < 60$	S4	S3	S3	S2	—	S1
	$R_a \geq 60$	S5	S4	S4	S3	—	S2
High	$R_a < 60$	S2	S2	S2	S1	—	S1
	$R_a \geq 60$	S3	S3	S3	S2	—	S2

NOTE 1 Crime rates are relative to the local area, not national. Assistance can be obtained from the local crime prevention officer.
NOTE 2 The lighting levels shown in this table may be increased by one lighting class in the vicinity of traffic calming measures.
NOTE 3 It is recommended that the actual overall uniformity of illuminance U_0 be at least 0.25. (3)

Figura 90 Norma BS 5489-1 Allegato B: Selezione delle classi di illuminazione

the Illuminating Engineering Society 2002; 31: 85–94.

⁴³ Akashi Y, Rea MS, Bullough JD. Driver decision making in response to peripheral moving targets under mesopic light levels. Lighting Research and Technology 2007; 39:53–67.

⁴⁴ MS Rea, JD Bullough, Y Akashi, “Several views of metal hide and high pressure sodium lighting for outdoor applications” Lighting Research and Technology 2009; 41:297–320.



Il motivo di tale scelta risiede nel fatto che questo tipo di illuminazione riguarda prevalentemente i pedoni piuttosto che gli automobilisti dal momento che la migliore percezione della brillantezza è di fondamentale importanza per diminuire la sensazione di paura di atti criminosi⁴⁵.

L'estensione di questa possibilità anche alle classi ME (strade a traffico motorizzato), potrebbe trovare una giustificazione con il fatto che la visione periferica è importante nella guida per il mantenimento della corsia di marcia⁴⁶ e che la rapida percezione degli ostacoli periferici può essere determinante per evitare perdoni che spuntano improvvisamente sul bordo della carreggiata o quando si segue un altro veicolo.

Sulla base degli studi preliminari citati in precedenza, per lo più ottenuti in laboratorio o sul campo con scenari molto semplificati, sarebbe interessante realizzare una applicazione stradale di test che mantenendo le attuali prescrizioni (senza la riduzione di classe) e utilizzando sorgenti con un elevato rapporto scotopico/fotopico consentisse di misurare sul campo i benefici (se presenti) di tale soluzione.

⁴⁵ MS Rea, JD Bulloch, Y Akashi, "Several views of metal hide and high pressure sodium lighting for outdoor applications" *Lighting Research and Technology* 2009; 41:297–320.

⁴⁶ Leibowitz HW, Owens DA. Nighttime driving accidents and selective visual degradation. *Science* 1977; 197: 422–423.