



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

### Stato dell'arte dei LED (Light Emitting Diodes)

*Franco Gugliermetti, Fabio Bisegna, Monica Barbalace*



## STATO DELL'ARTE DEI LED (LIGHT EMITTING DIODES)

Franco Gugliermetti, Fabio Bisegna, Monica Barbalace, (Università di Roma "La Sapienza",  
Dipartimento DIAEE)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Tecnologie per il risparmio elettrico  
nell'illuminazione pubblica

Responsabile Progetto: Simonetta Fumagalli, ENEA

ATTIVITA' DI RICERCA:  
***Stato dell'arte dei LED (Light Emitting Diodes)***

Nell'ambito del Tema di ricerca 5.4.3.1  
*"Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali",  
di cui all'art 11 del decreto 8 marzo 2006*

ACCORDO DI COLLABORAZIONE TRA

ENEA  
Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente

E IL

DIPARTIMENTO DI  
INGEGNERIA AERONAUTICA, ELETTRICA ED ENERGETICA  
AREA FISICA TECNICA  
DELLA "SAPIENZA" UNIVERSITA' DI ROMA

**RELAZIONE FINALE**

Roma, Giugno 2011

# CONTENUTI

## Cap. 1

**Introduzione** pag. 04

## Cap. 2

**Evoluzione della tecnologia di produzione e conformazione dei chip LED, gestione termica, alimentazione e colore** pag. 16

## Cap. 3

**Driver LED, durata di vita e affidabilità** pag. 47

## Cap.4

**Gestione elettrica e sistemi di controllo** pag. 62

## Cap.5

**Illuminazione stradale** pag. 95

## Cap. 6

**Altre applicazioni** pag. 130

## Cap. 7

**Evoluzione nelle normative e nelle certificazioni** pag. 154

## **Cap. 8**

**Elementi di progettazione software e dati  
fotometrici**

**pag. 170**

## **Cap. 9**

**Considerazioni finali**

**pag. 173**

## **Appendice 1**

**Illuminazione a LED in galleria: approccio alla  
progettazione**

**pag. 175**

## **Appendice 2**

**Misure di laboratorio**

**pag. 192**

## **Appendice 3**

**Valutazione della qualità dell'illuminazione LED**

**pag. 204**

*Bibliografia*

*pag. 208*

## Capitolo 1

### Introduzione

*I LED rappresentano una tecnologia molto recente, se intesa per applicazioni d'illuminazione, e per questo in forte sviluppo e soggetta a continui progressi: il 2010-2011 è stato un periodo di sensibili avanzamenti nella conoscenza che hanno portato alla definitiva risoluzione, ovvero a buone prospettive di riduzione, di problemi come flusso luminoso, efficienza, resa cromatica, binning. D'altra parte altri ne sono sorti, soprattutto in relazione ai circuiti di alimentazione e controllo. I campi principali di sviluppo su cui attualmente si sta lavorando maggiormente sono:*

- la performance, ai fini del superamento di quella delle sorgenti tradizionali;*
- l'ottimizzazione delle applicazioni, per consentire l'adattamento di sorgenti e apparecchi a tutte le situazioni in cui si usano sistemi di illuminazione;*
- la facilità d'uso, ovvero la creazione di apparecchi di facile montaggio, messa in opera, manutenzione.*

*Nonostante la commercializzazione di nuovi materiali e nuove tecnologie che hanno reso i LED pronti per invadere il mercato su larga scala, ciò non è ancora avvenuto e il progresso nella diffusione non è veloce come prospettato, per ragioni sia tecniche che di tipo socio-economico.*

*Nel presente capitolo introduttivo, viene presentata una ricerca svolta dal McKinsey Global Institute (MGI), organo di ricerca economica e gestionale americano, che ha cercato di individuare i motivi e le possibili soluzioni a tale difficoltà di inserimento sul mercato dei LED. Ma oltre ai problemi individuati dallo studio dell'MGI, esiste un problema di fondamentale importanza connesso alla valutazione della tecnologia LED e al confronto in fase progettuale con le tecnologie tradizionali, che può essere molto difficile se non impossibile da risolvere: spesso i grandi progetti di illuminazione per interni ed esterni si affidano infatti a sorgenti tradizionali semplicemente perché se ne ha maggiore esperienza e conoscenza. Al fine di facilitare le decisioni in fase di progetto illuminotecnico, la Philips Lighting Company, in attesa di studi approfonditi da parte di teorici e tecnici del settore, ha sviluppato una semplice metodologia di confronto tra le diverse tecnologie di illuminazione per esterni.*

*Nei prossimi capitoli verranno analizzati in dettaglio i progressi nel campo dei materiali e nella tecnologia del chip LED e di tutto quello che ruota attorno ad esso (alimentatori, ottiche, sistemi di controllo). Si discuterà delle applicazioni che attualmente si prestano di più ai recenti progressi nel settore e si focalizzerà l'attenzione in modo particolare sul settore del retrofitting di lampade esistenti e sull'illuminazione stradale, in pieno sviluppo grazie alle forti pressioni esercitate dagli obiettivi di risparmio energetico. Si concluderà poi la panoramica con le altre applicazioni LED degne di nota, tra cui quelle nel settore della salute umana e dell'agricoltura e infine si fornirà un aggiornamento del quadro normativo.*

## Velocità di diffusione della tecnologia LED

Il progresso dei LED sul mercato continua, sebbene la loro diffusione sia ancora piuttosto limitata: il mercato del Solid State Lighting (SSL), che ha fatturato complessivamente circa 5 milioni di dollari nel 2010, presenta come primo settore di vendita quello dei dispositivi portatili (29%), seguito dai prodotti per illuminazione architettonica (18%), quelli per l'illuminazione commerciale/industriale (15%), per l'illuminazione d'esterni (8%) e di sicurezza (7%) (Fig. 1.1).

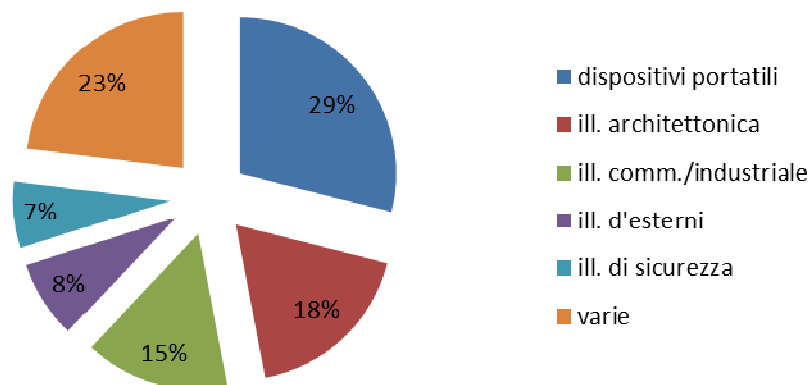


Figura 1.1. Vendite LED per l'anno 2010 (5 milioni di dollari) divise per settore di applicazione.

Tra i vantaggi dei LED ci sono maggiore variabilità del colore, accensione istantanea, capacità di dimmeraggio e libertà di design. L'elevata efficienza delle lampade LED le rende significativamente superiori alle lampade compatte fluorescenti in termini di costo totale (*total cost of ownership*, TCO), poiché i bulbi LED possono generare più di 100lm/W contro i 60-75lm/W delle fluorescenti e possono durare da tre a cinque volte di più. I LED sono superiori anche dal punto di vista ambientale, in quanto non contengono mercurio.

Nonostante i vantaggi offerti e i progressi tecnologici continui, l'adozione dei prodotti per l'illuminazione allo stato solido non si sta diffondendo secondo le aspettative: anche le previsioni di mercato più ottimistiche prevedono che i LED per retrofitting non raggiungeranno il 50% della penetrazione in ambito residenziale prima di 10 anni: una velocità pari a meno della metà di quella dei DVD, di internet a banda larga e delle televisioni.

Per meglio comprendere gli ostacoli alla diffusione dei LED, il Competence Center del McKinsey Global Institute (MGI) ha condotto una ricerca che ha riguardato anche visite nei negozi e una indagine sui principali produttori di LED. I risultati hanno evidenziato che le ragioni di questo fenomeno sono da imputare a cinque barriere principali all'adozione di tali prodotti, cinque problemi principali per ognuno dei quali è stato sviluppato un ventaglio di possibili soluzioni.



1. *Il costo delle unità LED è troppo elevato.* A 20-40euro in media a bulbo, le lampade LED sono ancora quattro volte più costose di una equivalente lampada compatta fluorescente da 40W. La soluzione individuata consiste nel ridurre i costi impiegando migliori tecniche di produzione al fine di diminuire i prezzi di vendita almeno del 30%.

2. *Il posizionamento dei prodotti nei negozi li rende poco appetibili.* Nei negozi dove sono in vendita sorgenti LED non ci sono sezioni dedicate ad essi, né si trova un vasto assortimento, ma solamente alcune lampade a luce bianca nelle potenze più comuni: la soluzione è l'impiego di stand espositivi informativi che facciano da guida per il consumatore, presentando vetrine che rendano possibili i confronti delle caratteristiche fotometriche principali per le diverse tecnologie (Fig. 1.2).

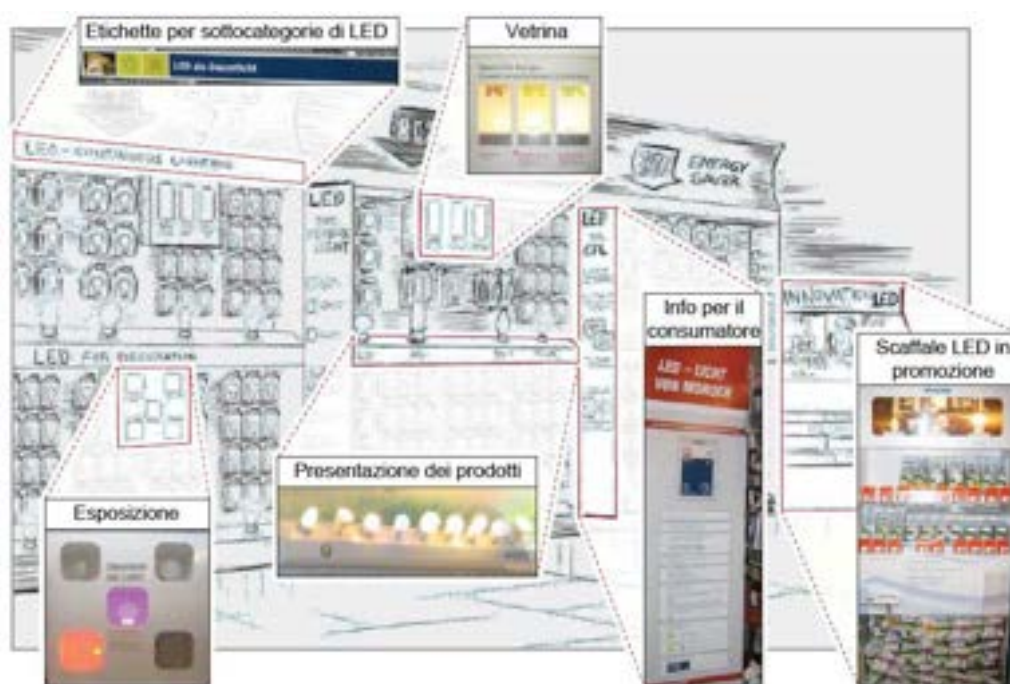


Figura 1.2. Una guida chiara e informativa per il consumatore è fondamentale per favorire la diffusione sul larga scala dei LED e creare fiducia verso questa nuova tecnologia. (Fonte: McKinsey)

3. *Conflitti tra i principali attori del progetto illuminotecnico.* Nella maggior parte delle situazioni di progetto e realizzazione di illuminazione commerciale (ad esempio uffici), i costruttori che sostengono i costi di realizzazione prendono la maggior parte delle decisioni sull'illuminazione sulla base dei costi iniziali d'impianto, piuttosto che dei benefici di lungo periodo. D'altra parte i gestori, che sopportano i costi di gestione, tenderebbero verso sorgenti innovative come i LED, a maggior costo ma migliore efficienza. Una soluzione consiste nel creare fornitori di servizi di illuminazione conto terzi: questi interessi, che ora confliggono, creerebbero un'opportunità per l'introduzione di un nuovo modello di business per soddisfare entrambi gli interessi, e cioè la fornitura di servizi di illuminazione da parte di un produttore, di una compagnia di servizi o di terze parti. Evitando che siano i costruttori a fare la scelta dell'illuminazione, tali fornitori potrebbero

basare le loro scelte strategiche di mercato e definire i prezzi dei loro servizi per far apprezzare al consumatore, fin dal primo giorno, i vantaggi dell'adozione dei LED.

4. *Carenza di supporto governativo.* Nonostante la messa al bando delle lampade a incandescenza in un numero sempre maggiore di Paesi, l'adozione dei LED ha poco supporto governativo nella sfera del consumatore rispetto alle lampade fluorescenti compatte, diversamente da altre tecnologie per il risparmio energetico che ne hanno molto di più, come ad esempio i pannelli solari e le automobili a emissioni ridotte. La soluzione consiste nel pubblicizzare i vantaggi ambientali ed economici dei LED su vasta scala: a Taiwan, ad esempio, il governo ha imposto di avere il 100% di segnaletica stradale a LED entro il 2011. Nell'Unione Europea, programmi simili potrebbero contribuire significativamente al raggiungimento dell'obiettivo "20-20-20" (20% di riduzioni di CO<sub>2</sub> entro il 2020) (Fig. 1.3).

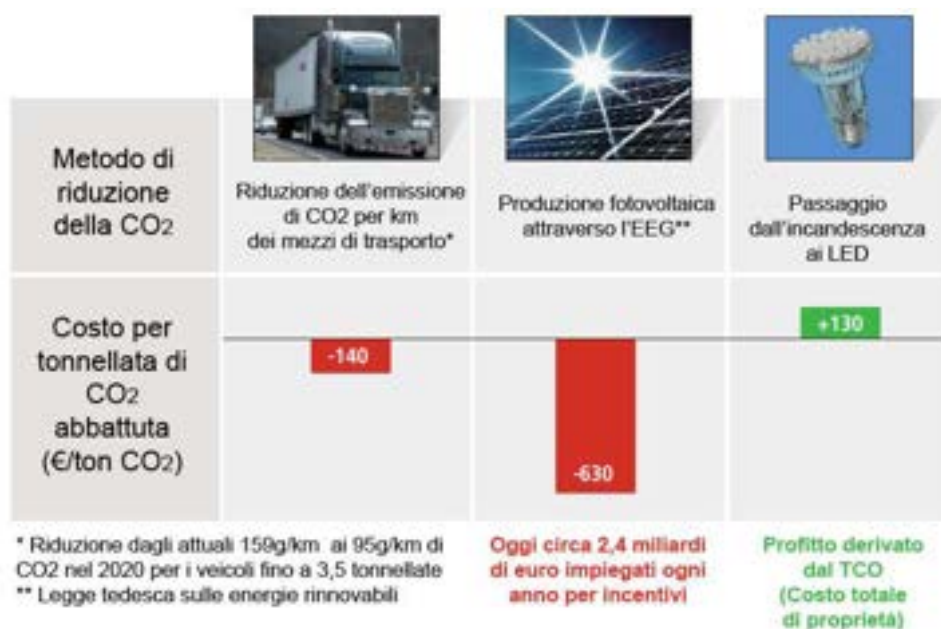


Figura 1.3. L'abbattimento delle emissioni di CO<sub>2</sub> nei veicoli e tramite il solare comporta costi elevati; l'illuminazione a LED è economicamente più attraente, ma non è ancora sufficientemente apprezzata dalla popolazione né sostenuta dai Governi.

5. *L'incertezza nelle transizioni tecnologiche.* Gli esempi passati di transizioni tecnologiche hanno evidenziato rischi e benefici per i produttori di tecnologie tradizionali: nel passaggio delle macchine fotografiche da analogiche a digitali, ad esempio, compagnie come la Leica hanno rischiato di scomparire dal mercato. La soluzione è quella di seguire le linee di mercato dei principali produttori e dare molta importanza al settore di ricerca e sviluppo, in particolare per l'abbattimento dei costi.

Secondo gli studi del MGI, adottando queste misure i LED potrebbero raggiungere un tasso di retrofitting del 50% in 5 anni, diventando così la tecnologia dominante nell'illuminazione residenziale e commerciale.

### **Una metodologia di approccio per la valutazione dell'illuminazione a LED**

Se è vero che l'introduzione dei power LED sta rivoluzionando il mondo dell'illuminazione, è anche vero che non si possono dimenticare i miglioramenti che stanno avvenendo nei campi delle tecnologie più convenzionali, in alcuni casi più velocemente che mai: i progettisti e illuminotecnici devono quindi valutare attentamente tutte le tecnologie disponibili ed i requisiti dell'applicazione specifica per poter fare le scelte migliori per le specifiche applicazioni.

Per questo, è innanzitutto necessario focalizzarsi sulle principali caratteristiche per l'utilizzo delle sorgenti, piuttosto che sui dettagli tecnici. Oggi, le tre principali tecnologie per l'illuminazione di esterni sono i LED, le lampade a scarica ad alta intensità (HID high-intensity discharge), e le lampade a induzione.

La tecnologia LED offre tra i suoi principali vantaggi:

- durata di vita attorno alle 50000 ore; quando applicati in spazi confinati, come in apparecchi incassati o per retrofitting, le durate di vita sono tipicamente di 20000-30000 ore, in spazi aperti, come per le applicazioni in esterni, la durata di vita può essere più elevata;
- l'efficienza dei LED ha superato i 100lm/W, mentre la maggior parte dei prodotti LED che hanno efficienze dell'ordine di 50-80lm/W
- eccellente controllabilità, con possibilità di dimming, accensione immediata, scelta del colore, definizione di scenari di illuminazione.

La tecnologia HID offre:

- in termini di efficienza, la maggior parte dei prodotti HID ha un'efficienza di 100lm/W, mentre i prodotti più efficienti arrivano a 120lm/W;
- la durata di vita dei sistemi HID sono tipicamente attorno alle 15000 ore per le lampade di bassa potenza (sotto i 100W) e fino a 30000 ore per le lampade di potenza elevata;
- costi relativamente bassi con periodi di payback di 1-3 anni; esistono soluzioni per retrofitting che offrono un risparmio del 15-20% con la sostituzione di una semplice lampada, e fino al 50% con sostituzione del sistema.

L'illuminazione a induzione può essere vista come una forma particolare di illuminazione fluorescente. Alcuni dei principali punti di forza di questa tecnologia sono:

- efficienze di 100-110lm/W sono comuni per sorgenti fluorescenti, mentre per i sistemi a induzione l'efficienza è di circa 70-80lm;
- le lampade fluorescenti con durata superiore alle 40000 ore sono ampiamente diffuse, mentre le lampade a induzione possono durare fino a 100000 ore.

Per un confronto dettagliato delle tecnologie, l'aspetto essenziale consiste nello stabilire i requisiti e le priorità per l'illuminazione. Sulla base di una serie di considerazioni, (atmosfera che il committente vuole creare, come si intende utilizzare l'area, come verrà coordinata l'illuminazione con le attività che si svolgeranno, requisiti di legge sulla potenza per unità di superficie, interesse dell'utente per risparmiare energetico o payback period breve, accessibilità per manutenzione) le differenti tecnologie (e i prodotti all'interno delle stesse) devono essere confrontate, valutate e infine scelte. Il confronto può essere eseguito semplicemente attraverso una tabella in cui sia riportato un elenco delle proprietà e delle performance delle varie tecnologie o prodotti, e utilizzarla per confrontare i parametri di riferimento: efficienza, durata di vita, flusso medio, costo iniziale, periodo di payback. Due sono i problemi principali di questo tipo di metodo:

- 1) le tabelle tendono ad essere troppo grandi e quindi non leggibili;
- 2) l'utente finale spesso non ha la sensibilità per la lettura e l'utilizzo di questo strumento.

La metodologia di confronto proposta da Philips si basa sulla scelta di 5 criteri principali per la progettazione illuminotecnica e sulla determinazione di una scala per ognuno di essi. I cinque criteri scelti sono poi trasferiti su un diagramma a ragnatela. La Fig. 1.4 ne illustra due esempi: nel diagramma a) sono stati individuati cinque criteri di progettazione per confrontare le diverse tecnologie di illuminazione, indipendentemente dalla specifica applicazione. In Fig. 1.4b viene proposto un diagramma di confronto con una selezione di aspetti di costo per l'installazione.

In generale, gli indicatori presentano performance migliori quando ci si allontana dal centro della ragnatela; gli unici ad avere un comportamento diverso sono, nel diagramma b), il tempo di payback e l'indice di costo iniziale, scalati in ordine inverso. Gli indicatori scelti per i diagrammi di Fig. 1.4a e successivamente per Fig. 1.4b sono:

Controllo del fascio luminoso: la minimizzazione delle perdite luminose è importante per molte applicazioni e può aiutare a ridurre la potenza, limitare il passaggio di luce, creare accenti;

Regolazione: l'accensione immediata e la riaccensione a caldo possono essere messi in relazione con la sicurezza, il dimming è utilizzato principalmente per i risparmi energetici. Altre forme di regolazione, come la variazione del colore, sono utilizzate per creare effetti emozionali e attrarre l'attenzione;

Valore intrinseco e percepito: alcune installazioni illuminotecniche sono puramente funzionali, ma in molti casi gli aspetti intrinseci entrano in gioco nella progettazione e nella scelta della sorgente luminosa;

Risparmio energetico: i risparmi sono determinati dall'efficienza della sorgente in combinazione con l'efficienza dell'apparecchio;

Distribuzione della luce al contorno: il termine "illuminazione al contorno" è utilizzato in questo contesto come opposto di "controllo del fascio luminoso". In alcune applicazioni si vuole che la luce si diffonda e si distribuisca intorno al punto sorgente (i.e. nei centri cittadini, dove si vuole che la luce illumini marciapiedi e facciate degli edifici per evitare un'atmosfera opprimente, conseguenza di un'illuminazione concentrata verso il basso, con un "effetto tunnel luminoso"). Inoltre il controllo del flusso deve essere rigoroso. Un buon controllo del fascio luminoso inevitabilmente comporta una limitata distribuzione della luce al contorno;

Prendendo in considerazione i vari aspetti di costo, è necessario per installazioni esistenti focalizzarsi sul costo degli apparecchi, mentre per installazioni nuove il costo è dominato dai pali, laddove presenti, e dalle connessioni piuttosto che dal costo degli apparecchi.

Manutenzione preventiva: per le applicazioni in esterni, la manutenzione preventiva è in generale necessaria per aumentare la durata di vita dell'apparecchio;

Ciclo di sostituzione degli apparecchi: quasi tutti i prodotti attualmente in commercio hanno delle parti non sostituibili;

Indice di costo iniziale: si impiega la tecnologia HPS come riferimento per l'indice di costo iniziale perché è quella che è più spesso sostituita;

Periodo di payback: periodo di rientro economico dell'investimento.

Realizzati, questi diagrammi si popolano con un confronto tra le tre più importanti tecnologie di produzione di luce bianca utilizzate per l'illuminazione d'esterni proposte per sostituire lampade ai vapori di sodio ad alta pressione e installazioni al quarzo a ioduri metallici: i LED, le lampade a induzione e quelle HID (ad esempio ad alogenuri metallici ceramiche).



a



B

Figura 1.4. Due esempi di diagrammi a ragnatela: a) Confronto di diversi criteri di progettazione; b) Confronto di diversi criteri di costo

*Approfondimento: lampade a ioduri metallici a tecnologia ceramica*

Le lampade a ioduri metallici a tecnologia ceramica (Fig. 1.5) sono caratterizzate dall'aver il tubo di scarica realizzato in materiale ceramico trasparente: grazie a questo sistema la luce prodotta è simile a quella delle lampade alogene e quindi la resa del colore è elevata.

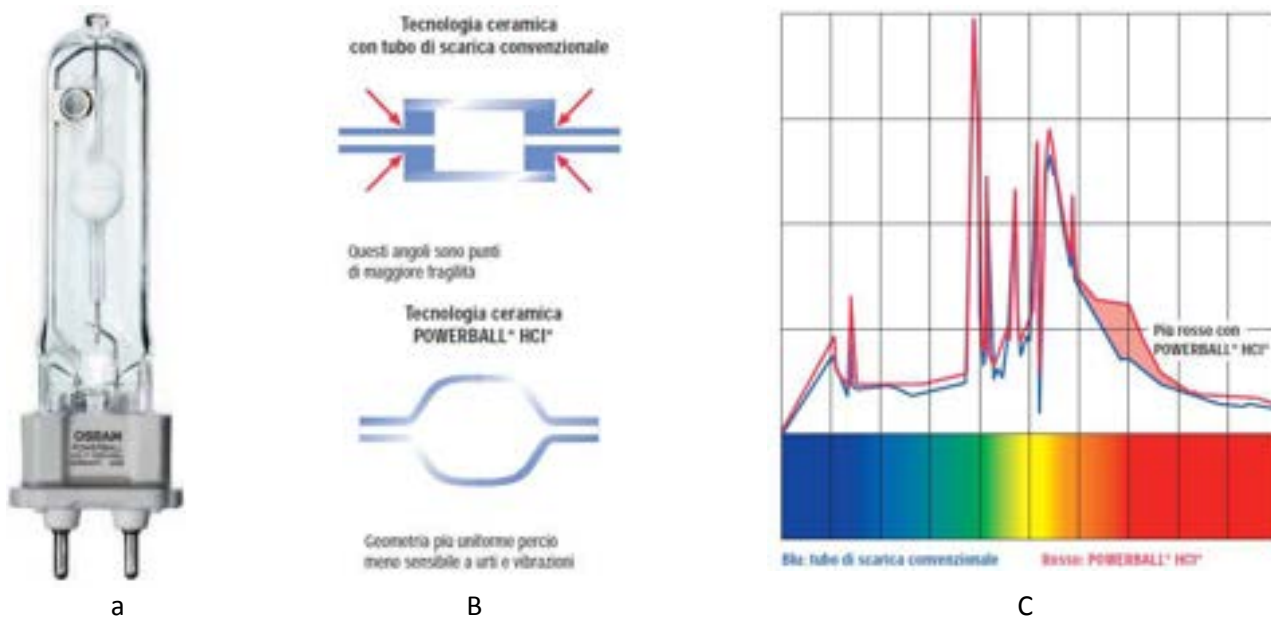


Figura 1.5. Lampada a ioduri metallici in tecnologia ceramica.

a) Immagine della lampada PowerBall HCl di Osram.

b) Sezione schematica del tubo di scarica in materiale ceramico di tipo tradizionale e di ultima generazione.

c) Andamento spettrale delle lampade a ioduri metallici con tubo di scarica di forma convenzionale (in blu) e con tubo di scarica arrotondato (in rosso). Si evidenzia una maggiore resa del colore rosso dovuta al minore spessore del tubo.

Di seguito (Fig. 1.6), vengono presentati (e commentati) i punteggi dei sistemi LED per i differenti criteri di progettazione proposti.

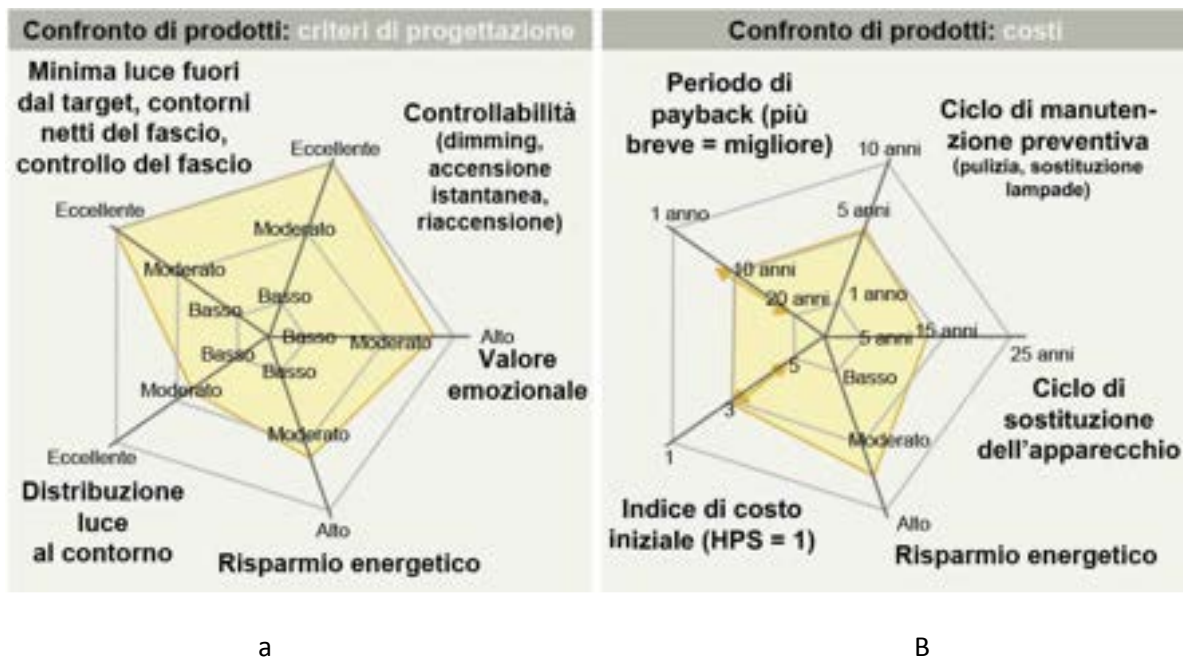


Figura 1.6. Diagrammi a ragnatela con i parametri relativi ai sistemi LED.

Prendendo in considerazione i vari criteri progettuali (Fig. 1.6a):

Controllo del fascio luminoso: la direzionalità dei singoli chip consente un ottimo controllo del fascio luminoso;

Regolazione: I LED sono validi come ogni altra tecnologia, e addirittura migliori;

Valore intrinseco e percepito: i LED sono la tecnologia più avanzata con ulteriori possibilità di miglioramento e hanno quindi valore simbolico di modernità;

Risparmio energetico: i LED hanno elevata efficienza se confrontati con i prodotti a incandescenza, ma la maggior parte dei prodotti LED hanno ad oggi un'efficienza minore rispetto ai prodotti HID o ai prodotti fluorescenti di tipo lineare. D'altro canto, l'elevata efficienza ottica dei LED migliora il loro livello di efficienza, con un risultato complessivo oggi di risparmi energetici medio-alti.

Distribuzione luce al contorno: con i LED, risulta necessaria la presenza di elementi aggiuntivi che irradiano nelle diverse direzioni.

Prendendo in considerazione i vari aspetti di costo dei LED (Fig. 1.6b):

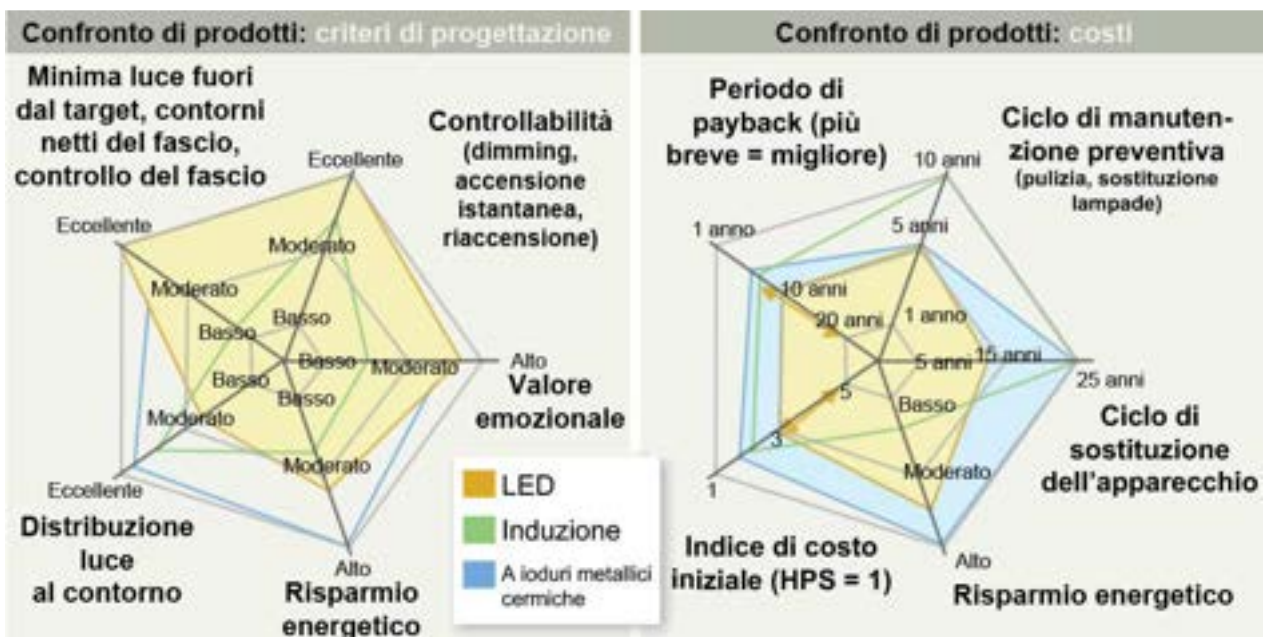
Manutenzione preventiva: l'elevata durata di vita dei prodotti LED suggerisce che i costi di manutenzione siano trascurabili, nonostante per le applicazioni in esterni una manutenzione preventiva vada comunque sempre prevista. A seconda del design dell'apparecchio, potrebbe essere necessario pulire le lenti, per mantenere basso il decadimento del flusso, e il dissipatore di calore, per aumentare la durata di vita;

Ciclo di sostituzione degli apparecchi: quando i LED o i loro driver smettono di funzionare, è necessario cambiare l'intero apparecchio. In alcuni casi, il ciclo di sostituzione è più corto perché i miglioramenti nella tecnologia LED portano a degli aggiornamenti tecnologici dell'installazione. C'è una tendenza in crescita verso un approccio modulare in cui le schede LED possono essere sostituite alla fine della loro vita o quando gli aggiornamenti tecnologici diventano economici;

Indice di costo iniziale: i sistemi LED sono 3-5 volte più costosi rispetto ai sistemi HPS di potenza e flusso simili;

Periodo di payback: i sistemi LED presentano grande variabilità nella durata del periodo di payback a seconda della tecnologia che sostituiscono e del tipo di prodotto utilizzato. Periodi di payback relativamente brevi (3-8 anni) sono raggiungibili per le installazioni per cui esistono sovvenzioni; senza tale supporto finanziario, il periodo di payback è di 8-15 anni.

In Fig. 1.7 lo stesso tipo di analisi è riportato e discusso per le lampade ad induzione e per quelle a ioduri metallici in ceramica.



a

B

Figura 1.7. Diagrammi a ragnatela di confronto tra LED, lampade ad induzione e lampade a ioduri metallici ceramiche.



Il controllo del fascio luminoso e la minimizzazione della luce dispersa con le lampade a ioduri metallici ceramiche sono buoni come per i LED, anche se questi ultimi consentono minori dispersioni luminose. D'altro canto, le efficienze sono spesso più alte con le lampade HID con ottiche ottimizzate; tali sorgenti, se installate senza ottiche, distribuiscono la luce in tutte le direzioni secondo una curva sferica, con un punteggio conseguentemente alto per l'illuminazione omnidirezionale. La forma voluminosa delle lampade a induzione limita la performance ottica, mentre i punteggi sono alti quando si richiedono distribuzioni sferiche, specialmente se a forma di bulbo.

La controllabilità della tecnologia a induzione è buona. La ragione principale per cui ha una valutazione inferiore ai LED è la mancanza di variabilità del colore e del controllo spaziale del fascio luminoso. Le lampade a ioduri metallici ceramiche presentano un punteggio ancora inferiore. Attualmente, esistono in commercio soluzioni a ioduri metallici e alcune tipologie a ioduri metallici con ceramica che non cambiano colore quando vengono dimmerate; ciononostante, la controllabilità non è un punto di forza delle sorgenti HID.

In termini di valore estetico, le lampade a ioduri in ceramica hanno un punteggio elevato per il loro effetto e per la qualità della luce. Le lampade a induzione e le altre sorgenti fluorescenti sono invece più funzionali.

I risparmi energetici sono superiori per le lampade a ioduri in ceramica, sia perché questi sistemi di illuminazione hanno l'efficienza maggiore oggi raggiungibile, sia perché le lampade a ioduri metallici compatte di ultima generazione hanno efficienze ottiche molto elevate. L'efficienza delle sorgenti ad induzione è confrontabile con quella delle sorgenti LED, i quali presentano un punteggio superiore per la superiore efficienza ottica.

Gli aspetti relativi al costo sono mostrati sul diagramma a destra della Fig. 1.7. L'illuminazione a induzione è spesso installata in luoghi in cui i costi di manutenzione sono molto elevati, come ad esempio nei tunnel. La manutenzione preventiva in questi ambienti non viene eseguita e la tecnologia lo permette grazie alla sua affidabilità e longevità. Anche in installazioni in esterni più accessibili può non essere necessario fare manutenzione preventiva, visti i bassi fattori di decadimento del flusso delle lampade ad induzione di buona qualità. Malgrado l'aumento della durata di vita delle sorgenti a ioduri metallici in ceramica, i cicli di manutenzione preventiva sono ancora di circa 5 anni.

La durata di vita degli apparecchi a induzione e HID è tipicamente di 20-35 anni. Il costo iniziale degli apparecchi a induzione e di quelli HID è circa 1,5-3 volte superiore a quello delle HPS.

La combinazione di risparmio energetico, costo iniziale e costo di manutenzione restituisce in media un periodo di payback di circa 2-5 anni sia per le lampade a induzione che per le lampade a ioduri metallici in ceramica. Mettendo a confronto le tecnologie per l'illuminazione nel diagramma a ragnatela della fig. 1.6 si dà un'immagine sintetica delle principali differenze di performance tra di esse. In questo modo è possibile una comunicazione visiva rapida dei parametri relativi alla performance sia agli esperti che ai non esperti.

## Capitolo 2

# Evoluzione della tecnologia di produzione e conformazione dei chip LED, gestione termica, alimentazione e colore

*Essendo i LED prodotti in forte ascesa e soggetti a continue innovazioni, le attività di ricerca e sviluppo sono promosse essenzialmente dall'industria, per quanto riguarda sia i processi e le tecnologie di produzione, che la sperimentazione e la pubblicazione di informazioni. Questo report è stato pertanto realizzato sulla base di ancora statisticamente pochi dati ricavati da enti pubblici e da report e comunicazioni divulgati dai maggiori produttori di LED. Per questo, è opportuno considerare i dati qui riportati come "ottimistici" e potenzialmente passibili di adattamenti e correzioni da verificare prima di poter essere effettivamente considerati dati ufficiali.*

*Nell'ultimo anno, si sono moltiplicati i nuovi tipi di diodo, basati su nuove tecnologie produttive; grazie all'introduzione della nano-texturizzazione, è oggi possibile ottenere diodi caratterizzati da una migliore efficienza luminosa, mentre grazie allo sviluppo di circuiti elettrici a celle sono ottenibili LED ad alto voltaggio, che si affiancano a quelli tradizionali e a quelli alimentati a corrente alternata; il settore delle ottiche ha inoltre fatto importanti progressi.*

*La ricerca sui materiali innovativi ha individuato alcuni punti di partenza per importanti sviluppi futuri: in particolare, sono stati sviluppati nuovi materiali per la realizzazione di dissipatori di calore più leggeri e lavorabili rispetto ai metalli tradizionalmente impiegati, ed è stato per la prima volta messo in produzione un LED a substrato di silicene, anziché di zaffiro.*

*Per quanto riguarda le tecniche di produzione, le principali fabbriche di diodi si stanno riconvertendo da wafer di substrato (ancora in gran parte zaffiro) da due pollici a wafer più grandi, da quattro o sei pollici, ed entro l'anno si prevede di arrivare a substrati da dieci pollici di diametro. Tale fatto è molto importante perché consente un abbattimento dei tempi (e quindi dei costi) di produzione dei LED.*

*Per ciò che concerne la gestione termica, aspetto fondamentale per lo sviluppo di LED con flusso luminoso sempre maggiore, i nuovi materiali hanno consentito l'introduzione di nuovi metodi per migliorare le prestazioni termiche dell'apparecchio, tra cui il raffreddamento attivo e l'impiego di liquido di raffreddamento inerte.*

## **Evoluzione nella tecnologia di produzione**

Lo sviluppo tecnologico nella produzione di LED ad elevata luminosità ha come obiettivo l'abbattimento dei costi per soddisfare alle esigenze del mercato.

Una delle soluzioni possibili per ridurre i prezzi di mercato fino a 10 volte rispetto agli attuali consiste nel lavorare sulle dimensioni e sul materiale di cui sono fatti i wafer, dischi sottili e dalla superficie molto levigata, al di sopra dei quali viene fatto crescere l'epilayer di semiconduttore da utilizzare per la realizzazione dei diodi. Solitamente, tali dischi vengono ottenuti a partire da grandi cristalli di zaffiro artificiale, molto costosi da realizzare. I cristalli, il cui materiale di partenza è alluminio puro in forma di pellets o microperle, vengono fatti crescere in forma più o meno cilindrica e, dopo la mappatura e la rimozione delle aree con difetti di crescita del cristallo, vengono tagliati in forma di dischi circolari e puliti per prepararli alla crescita epitassiale. Ad oggi, ancora circa il 50% dei diodi prodotti vengono scartati a causa di difetti di crescita e disomogeneità dell'epilayer. Uno spostamento della produzione verso wafer più grandi, così come una transizione verso grandi wafer di silicone, che possono essere prodotti in modo più economico, potrebbe consentire di arrivare a ridurre ad un decimo l'attuale costo di produzione; entrambe le tecnologie, però, presentano dei punti deboli.

### Aumento delle dimensioni dei wafer

Attualmente i grandi produttori di LED impiegano in massima parte wafer dal diametro di 2 pollici (5 centimetri), ma già alcune di esse, come ad esempio la Osram Opto Semiconductors, hanno cominciato a convertire le linee di produzione per utilizzare wafer da 4 e da 6 pollici (Fig. 2.1): in questo modo si aumenta la velocità di produzione dei diodi, abbattendone pertanto il costo.



Figura 2.1. La Osram Opto Semiconductors è passata dai wafer da 4 pollici (a destra) a quelli da 6 pollici (a sinistra), aumentando la capacità produttiva e quindi abbattendo i costi.

L'utilizzo di wafer di diametro maggiore porta però con sé alcuni svantaggi: a causa della mancanza di normativa a riguardo, lo spessore dei wafer di dimensioni superiori a quelle standard di 2 pollici è maggiore: un wafer da 150mm ha 9 volte l'area di uno da 50mm e uno spessore di circa 1-1,5mm, contro gli 0,43mm di un wafer tradizionale. Un wafer da 150mm può quindi avere un volume di circa 30 volte quello di uno da 50mm, con un minor numero di wafer per cristallo e maggiore costo. Un altro svantaggio di questa tecnologia è la minore flessibilità d'impiego all'interno della catena di produzione, dovuta alla minore maneggevolezza dei wafer.

### Realizzazione di chip a partire da substrati diversi dallo zaffiro

Tutti i LED GaN in commercio fino a pochi mesi fa erano cresciuti a partire da wafer di zaffiro: sebbene siano state studiate alternative, esse si sono rivelate di difficile realizzazione per via dei problemi di attecchimento del semiconduttore su substrati di materiali diversi. La Lattice Power, è stata la prima a commercializzare LED cresciuti su substrato di silicene: per risolvere il problema dell'attecchimento e staccare il semiconduttore dal substrato, è stata realizzata un'incisione sul substrato inumidito per rimuoverlo dopo la crescita, che ha luogo su un substrato pre-texturizzato utilizzando un buffer multilayer sviluppato dall'azienda.

### **Nuovi tipi di chip LED e loro caratteristiche**

La tecnologia delle sorgenti LED è più che mai in fase di evoluzione e i progressi in questo campo riguardano molteplici aspetti:

- la struttura del diodo (LED planari, vari tipi di struttura, texturizzazione);
- la tipologia del diodo (diodi tradizionali, ad alta luminosità e ad alto voltaggio);
- l'alimentazione dei diodi tramite driver di vari tipi, più sicuri e precisi;
- la gestione termica finalizzata alla dissipazione del calore generato nella giunzione, che ormai va oltre il semplice dissipatore di calore, verso sistemi di raffreddamento attivo e con l'impiego di materiali innovativi come i composti termoplastici o la schiuma di grafite;
- la realizzazione di ottiche primarie, secondarie e terziarie di ultima generazione, fondamentali sia per le applicazioni relative all'illuminazione stradale che per l'illuminazione architettonica.

La buona gestione di tutti gli aspetti legati al chip LED è fondamentale per la realizzazione di elementi più efficienti con flusso luminoso maggiore e sempre più controllato, tale da superare le performance delle sorgenti luminose tradizionalmente impiegate (Fig. 2.2).



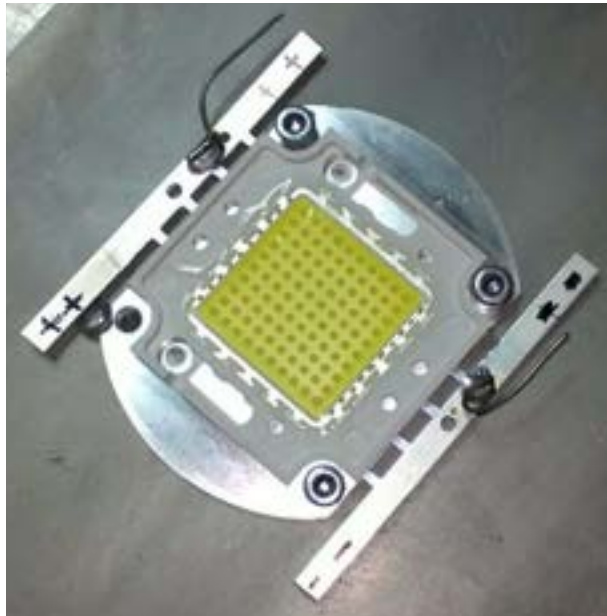
Figura 2.2. Relazione tra variabili relativamente al flusso emesso da un chip LED

A questo proposito, ha senso fornire alcuni dati di confronto: nel 2010, l'efficienza luminosa dei LED toccava i 100lm/W, ma per la maggior parte dei prodotti si aggirava attorno ai 70-80lm/W. Sebbene solo fino allo scorso anno sembrasse impossibile arrivare ai 200lm/W, a maggio 2011 la Cree ha riportato il valore record di 231lm/W, misurato per un diodo singolo con una temperatura di colore di 4500K, una corrente di 350mA e a temperatura ambiente. La sfida dell'illuminazione LED in questo settore è quella di incrementare, assieme all'efficienza, il flusso luminoso emesso per unità di costo (lm/€): in particolare per i LED bianchi a luce fredda si mira ad ottenere un valore di circa 700lm/€ entro i prossimi tre anni.

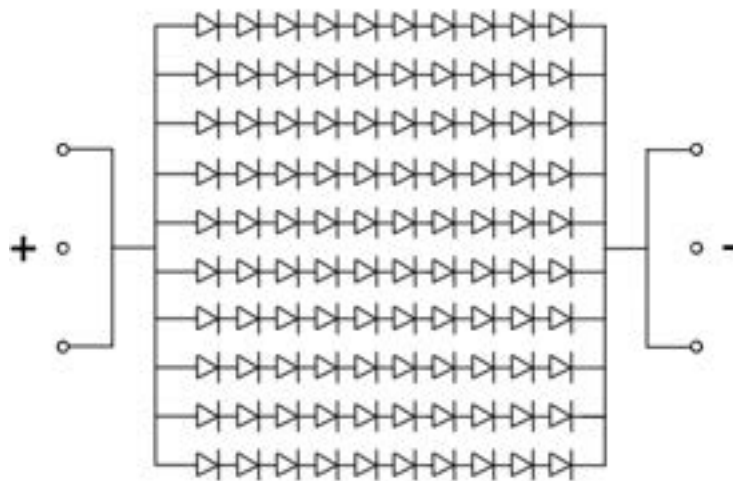
Alcuni produttori hanno messo in commercio una nuova tipologia di LED piani contenenti un numero variabile di giunzioni (di solito 100) denominato "LED Emitter Metal Plate" (Fig. 2.3): la piastra misura circa 50x50x5mm ed offre circa 8000lm di flusso luminoso, con un assorbimento di 100W e una TCC di 6000-6500K. Questo tipo di LED è attualmente quello che fornisce il miglior rapporto lm/€, perché invece di avere molti chip montati insieme presenta una serie di giunzioni quasi continua, che consente un abbattimento dei costi di produzione. Avendo un flusso estremamente alto, questa tipologia di chip trova impiego come sorgente unica all'interno di apparecchi per illuminazione d'esterni, stradale, e più in generale urbana.

Un dato particolarmente importante per le implicazioni tecnologiche, è quello relativo all'efficienza dei LED verdi: i primi tipi di retroilluminazione per TV utilizzavano LED RGB, ma era necessario utilizzare due LED verdi per ogni LED rosso e blu, con significativi costi aggiuntivi, per cui si è poi passati all'utilizzo di LED blu con fosfori gialli, soggetti però a viraggio del colore. L'inefficienza dei LED verdi è dovuta all'effetto di separazione delle cariche, per cui gli elettroni e le lacune si trovano separati all'interno della regione del "pozzo quantico" del dispositivo, cioè quella zona molto ristretta di materiale all'interno della quale l'energia di un elettrone è minore di quella dell'orbitale esterno, per cui il movimento dell'elettrone perpendicolare a tale regione è quantizzato. La luce è generata quando gli elettroni si combinano con le lacune, ma nei LED verdi

la separazione tra i due porta a un numero minore di combinazioni. Il team della Rensselaer Polytechnic Institute di Troy (NY) ha ottenuto un LED verde ad alta efficienza grazie all'impiego di una texturizzazione nanoscopica del substrato di zaffiro: con questo sistema è stato raggiunto un raddoppio dell'efficienza quantica interna, con un incremento dell'estrazione di luce del 58%.



a



b

Figura 2.3. Il LED Emitter Metal Plate commercializzato dalla Prime. Diverse altre aziende, come la WAYS S.r.l. o la Zon, commercializzano prodotti con caratteristiche simili, di forma quadrata, rettangolare o circolare.

- a) Immagine della piastra.
- b) Schema elettrico di funzionamento.

Più in generale, l'efficienza dei LED misura il flusso luminoso per un dato input elettrico, ed è determinata da quattro fattori: l'efficienza quantica interna, l'efficienza di estrazione, l'efficienza elettrica e l'efficienza dell'involucro.

L'efficienza quantica interna misura quanti fotoni possono essere prodotti per ogni coppia generata di elettrone-lacuna ed è determinata principalmente dalla qualità dello strato epitassiale. L'efficienza nell'estrazione della luce definisce la proporzione di fotoni che, tra quelli generati, riescono ad uscire dal dispositivo LED ed è determinata dalla struttura del chip. L'efficienza elettrica è il rapporto tra la potenza elettrica fornita ai diodi e quella assorbita ed è determinata dal tipo di circuito e dal driver. L'efficienza dell'involucro definisce la proporzione di fotoni che riescono ad uscire dall'involucro del chip e dipende dalla struttura e dai materiali di cui esso è composto.

I chip LED hanno solitamente una bassa efficienza di estrazione dovuta all'elevato indice di rifrazione del mezzo semiconduttore, per cui la maggior parte della luce generata è riflessa internamente nell'interfaccia tra il semiconduttore e l'aria, e solo una piccola frazione di essa può essere estratta. Sono state proposte molte soluzioni per aumentare l'efficienza dei LED migliorando l'estrazione luminosa; i due approcci principali adottati sono:

- la crescita di strati epitassiali (*epilayers*) su substrati lisci, dai quali vengono poi staccati, per subire una texturizzazione;
- la crescita di strati epitassiali su un substrato di zaffiro modulato e texturizzato in maniera random (*Patterned Sapphire Substrate, PSS*).

I chip LED si dividono in quattro diverse categorie, a seconda dell'esistenza di un substrato di zaffiro e del metodo di collegamento all'involucro (Fig. 2.4).

In un chip convenzionale (Fig. 2.4a) il layer di p-GaN è posizionato sul lato superiore insieme con gli elettrodi p- e n-. Questi elettrodi sono connessi ai capi dell'involucro attraverso collegamenti elettrici. La texturizzazione random dello strato superiore p-GaN è un modo molto diffuso nell'industria per aumentare l'estrazione luminosa. La texturizzazione è solitamente fatta in situ durante la crescita del layer epitassiale. È un metodo poco costoso ed efficiente e il processo non richiede altri step, ma all'aumentare della dimensione del substrato, si possono presentare perdita di emissione e uniformità.

In un LED flip-chip (Fig. 2.4b) il substrato di zaffiro è in superficie, e gli elettrodi sono collegati al substrato di montaggio attraverso un collegamento flip-chip. La rimozione del substrato di zaffiro e l'uso di un supporto conduttivo ha molti vantaggi nell'estrazione della luce e nella dissipazione del calore. Normalmente impiegata per rimuovere il substrato di zaffiro dai layer epitassiali, formando un sottile film LED, è la tecnologia laser-lift-off.

In un LED verticale a film sottile (Fig. 2.4c) l'elettrodo negativo è posizionato sullo strato superiore e il conduttore di supporto lavora un elettrodo positivo. La corrente elettrica fluisce verticalmente, il che costituisce un ulteriore vantaggio di questo approccio in termini di diffusione della corrente.

Quando il chip LED privo del substrato di zaffiro è collegato attraverso collegamento flip-chip, è chiamato LED flip-chip thin-film (Fig. 2.4d). In questo caso, sia l'anodo che il catodo sono posizionati dallo stesso lato come nei LED flip-chip convenzionali.

Nel caso di LED flip-chip o thin-film, il layer n-GaN è rivolto verso l'alto, e dovrebbe essere reso ruvido o texturizzato per aumentare l'estrazione della luce. La texturizzazione di tale superficie viene solitamente ottenuta attraverso un'incisione sul materiale umido.

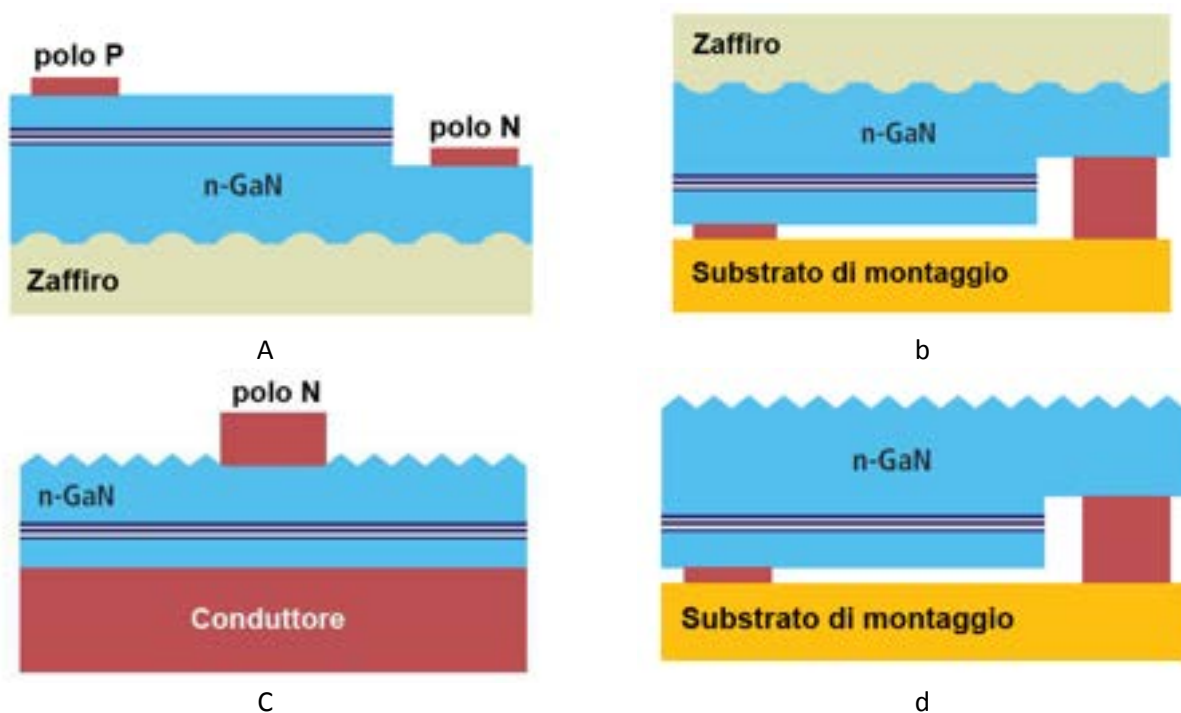


Figura 2.4. Strutture dei chip LED che utilizzano la nano-texturizzazione delle superfici.

- a) Chip LED convenzionale con substrato di zaffiro texturizzato.
- b) LED flip-chip, con l'interfaccia tra zaffiro e GaN texturizzata.
- c) LED a film sottile verticale con texturizzazione dell'n-GaN
- d) Chip LED flip-chip a film sottile.

La tecnologia a substrato di zaffiro texturizzato (PSS) (Fig. 2.5) è un altro approccio adottato nella produzione di LED assieme alla texturizzazione random: l'idea di base, in questo caso, è quella di far crescere strati epitassiali su substrati micro-texturizzati invece che su un substrato liscio. Due sono le conseguenze positive di tale approccio: la prima è un aumento dell'efficienza quantica interna dovuto alla minore densità di dislocazione delle superfici riflettenti nell'epilayer cresciuto sul PSS; la seconda è un aumento nell'efficienza di estrazione dovuto al fatto che le texturizzazioni all'interfaccia epilayer-zaffiro funzionano da centri di diffusione o di rifrazione, riducendo la riflessione totale interna.



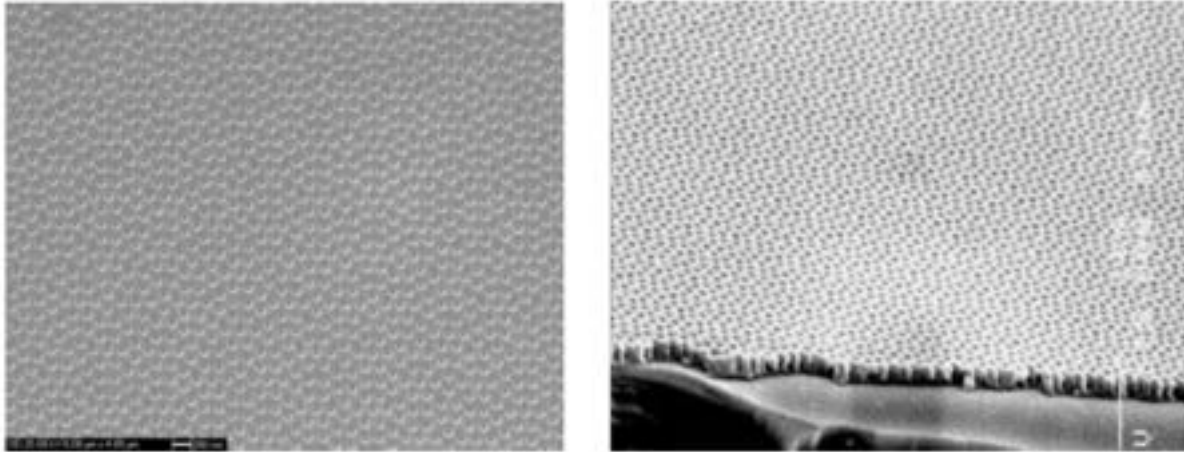


Figura 2.5. Misure SME di una texturizzazione quasi-cristallina stampata su un epistrato di GaN. La texturizzazione copre l'intera superficie malgrado i difetti di crescita mostrati a destra. Il diametro del foro è di 90nm.

Esistono molte opportunità di aumentare ulteriormente l'efficienza dei LED attraverso la nano-texturizzazione. Il cristallo fotonico (PC) sulla superficie del chip è stato oggetto di ricerca per molti anni, ma finora non ha mostrato benefici sufficienti per giustificare l'alto costo di produzione rispetto alla testurizzazione random. Il PC può però sopravvivere se impiegato in combinazione con il substrato di zaffiro nano-texturizzato (*nano-patterned sapphire substrate*, NPSS) e la sovra crescita epitassiale laterale (ELO). Ad oggi, l'NPSS sembra avere il maggiore potenziale per raggiungere il successo commerciale perché è una naturale estensione della tecnologia esistente, e molti studi hanno mostrato risultati promettenti. Ci si aspetta inoltre che l'NPSS possa offrire ulteriori vantaggi in termini di processo produttivo in confronto alla tecnologia micro PSS. Grazie al suo buon rapporto costi-benefici e alla performance superiore, la litografia nano imprinting svolgerà un ruolo cruciale nel portare l'industria LED in un nuovo mondo di LED nano-texturizzati ad elevatissima efficienza. Di seguito, vengono brevemente descritti alcuni aspetti di queste tecnologie.

### Substrati di zaffiro nano-texturizzati

Molte nuove pratiche sono recentemente state sperimentate per aumentare l'efficienza dei LED impiegando la nano-texturizzazione. Tra queste, quella a substrato di zaffiro nano-texturizzato può essere considerata come un'estensione del micro PSS convenzionale. Sebbene nessun produttore ancora lo impieghi, diversi papers pubblicati mostrano risultati promettenti indicando che il NPSS può avere un'efficienza superiore del 10-20% rispetto al micro PSS. Dal punto di vista del processo di produzione, il NPSS può offrire ulteriori vantaggi al di là dell'aumento dell'efficienza: rispetto al micro PSS, presenta infatti strutture molto più piccole, per cui il tempo richiesto per l'incisione dello zaffiro può essere ridotto. Considerando la crescita epitassiale, l'NPSS richiede inoltre meno tempo per raggiungere gli epilayer planari.

### Tecnologia a cristallo fotonico (Photonic Crystal, PC)

La tecnologia a cristallo fotonico è stata a lungo oggetto di ricerca come tecnologia definitiva per l'estrazione della luce. L'idea del cristallo fotonico è di utilizzare una struttura periodica o quasi-periodica, con dimensioni confrontabili con la lunghezza d'onda della luce, come griglia di diffrazione per ottenere un aumento dell'output luminoso. Malgrado le molteplici ricerche universitarie e industriali riguardo la tecnologia PC, essa non è ampiamente accettata nell'industria LED per via dei risultati differenti raggiunti in funzione della conformazione del chip, di come è stato utilizzato il cristallo fotonico, del metodo di incapsulamento, e così via. Recentemente, la Philips Lumileds ha riportato su Nature Photonics che i PC hanno una efficienza di estrazione superiore rispetto ai layer sottili di GaN privi di capsula.

E' probabile che la tecnologia PC presenti vantaggi per i chip LED privi di fosfori e incapsulanti, ma per i LED bianchi, che invece li utilizzano, non ha grande utilità in quanto i fosfori all'interno dell'incapsulante randomizzano la direzione della luce: sembrerebbe quindi che i maggiori vantaggi di questa tecnologia siano destinati a quei LED in cui il chip è fatto in modo tale da emettere luce direttamente in aria. La Luminous Devices utilizza la tecnologia PC per i LED HB di grande superficie generalmente impiegati in proiettori e unità di retroilluminazione per TV.

### Sovracrescita epitassiale laterale (Epitaxial lateral overgrowth ELO)

La sovracrescita epitassiale laterale non è una nuova tecnologia, in quanto è già stata utilizzata per la produzione di diodi laser blu. L'idea alla base di tale tecnologia consiste nell'inserire dielettrici texturizzati ( $\text{SiO}_2$  o  $\text{SiN}_x$ ) all'interno del layer di GaN. Le dislocazioni di threading sono bloccate dai dielettrici inseriti, i quali impediscono loro di crescere al di sopra del layer dielettrico, mentre gli epilayers GaN possono crescere solo attraverso l'area aperta nel dielettrico e unirsi lateralmente. Il risultato è una riduzione considerevole nella densità delle dislocazioni di threading.

La tecnologia ELO non sembra essere adatta per la produzione di LED, perché molto costosa, anche se recentemente si sta riproponendo all'attenzione perché può costituire un metodo per risolvere molti problemi dei LED, come ad esempio la caduta di efficienza, il GaN apolare e la crescita sui substrati di silicene. La ricerca recente sui LED riguardo la tecnologia ELO ha studiato l'effetto dei dielettrici nanotexturizzati: un elemento di interesse è che tali materiali possono lavorare come un cristallo fotonico integrato, con la possibilità di una migliore estrazione luminosa rispetto ai dielettrici microtexturizzati.

### Surface plasmon (SP)

L'SP è un quanto di oscillazione elettronica collettiva sulla superficie del metallo; nel metallo nano-dimensionato o nano-texturizzato il suo effetto è molto maggiore. La tecnologia SP interagisce direttamente con le coppie elettrone-lacuna nei pozzi quantici (la regione che emette luce all'interno del chip LED) aumentando la velocità di ricombinazione radiativa.

L'SP è uno degli approcci più promettenti nel settore della nano fotonica. La tecnologia è già in uso per prodotti di bio-sensing e per attività di ricerca sui circuiti fotonici integrati. Diversi studi hanno inoltre mostrato che l'SP può aumentare l'efficienza delle celle solari. Uno dei problemi pratici è che lo strato di metallo deve avere uno spessore inferiore ai 100nm in tale regione: quando tale strato è posizionato sulla superficie superiore del LED, questa limitazione impone che il layer p-GaN sia molto sottile, con problemi nella diffusione della corrente.

### Litografia Nanoimprinting (Nanoimprinting lithography NIL)

Tale tecnologia offre vari vantaggi per i LED. La nanotexturizzazione dei substrati utilizzati per la produzione dei LED si è rivelata una vera sfida a causa delle imprecisioni nella realizzazione dei pattern. Il metodo della litografia ottica risente della perdita di fuoco dovuta a queste irregolarità, mentre la litografia e-beam risulta troppo lenta e costosa. La NIL convenzionale, che impiega stampi rigidi, presenta anch'essa gli svantaggi appena descritti. Il processo di stampa sviluppato da Obducat per la nano-texturizzazione dei LED è basato su un processo in due fasi: dapprima, lo stampo è replicato all'interno di un film morbido di polimero per formare uno stampo intermedio polimerico (*Intermediate Polymer Stamp, IPS*), il quale viene poi utilizzato nella seconda fase per replicare il pattern sul substrato utilizzando la tecnologia a processo simultaneo termico e UV (*Simultaneous Thermal and UV, STU*), originando una nano-litografia combinata termica e UV. Un'altra tecnologia sviluppata dalla stessa azienda è la Soft Press, dove la pressione è applicata allo stampo e al substrato utilizzando aria compressa, assicurando uniformità di pressione su tutta l'area di stampa: ciò consente allo stampo e al substrato di adeguarsi l'uno all'altro, eliminando gli effetti negativi delle variazioni di spessore, delle curvature, dell'ondulazione dello stampo o del substrato. Questa tecnologia consente di creare strati residui sottili e uniformi e di grandi dimensioni.

### **Classificazione dei chip LED in base al tipo di alimentazione**

Rispetto al tipo di alimentazione, i LED possono essere classificati in LED ad alto voltaggio (*High Voltage, HV*), e LED a basso voltaggio o convenzionali, e in LED alimentati a corrente continua (di tipo DC) e LED alimentati a corrente alternata (di tipo AC).

I LED ad alto voltaggio (HV) sono alimentati in corrente continua con un voltaggio di accensione maggiore di 20V, valore estremamente più elevato del voltaggio di 2-3V dei LED convenzionali. Un chip HV-LED è di solito costituito di molte cellule LED piccole elettricamente connesse in serie. Tale tipologia di diodi costituisce una soluzione ideale per il retrofitting perché non richiede un driver e quindi lo spazio in più può essere usato per la gestione termica. La Fig. 2.6a mostra un chip HV-LED blu con 15 celle connesse in serie: la corrente di funzionamento è 20mA e il voltaggio totale di accensione attraverso le 15 celle in serie pari a 48V, con un consumo di circa 1W mentre è in funzione. La Fig. 2.6b mostra invece un chip HV-LED rosso con 10 celle connesse in serie: la corrente di funzionamento è 20mA e il voltaggio totale di accensione è 20V, con una potenza

consumata pari a circa 0,4W. Uno dei vantaggi principali degli HV-LED rispetto ai LED convenzionali è la corrente di mandata, che negli HV-LED è tipicamente di un ordine di grandezza minore: una corrente bassa è preferibile nella progettazione di questo tipo di chip perché si ottiene un miglior effetto di diffusione della corrente.

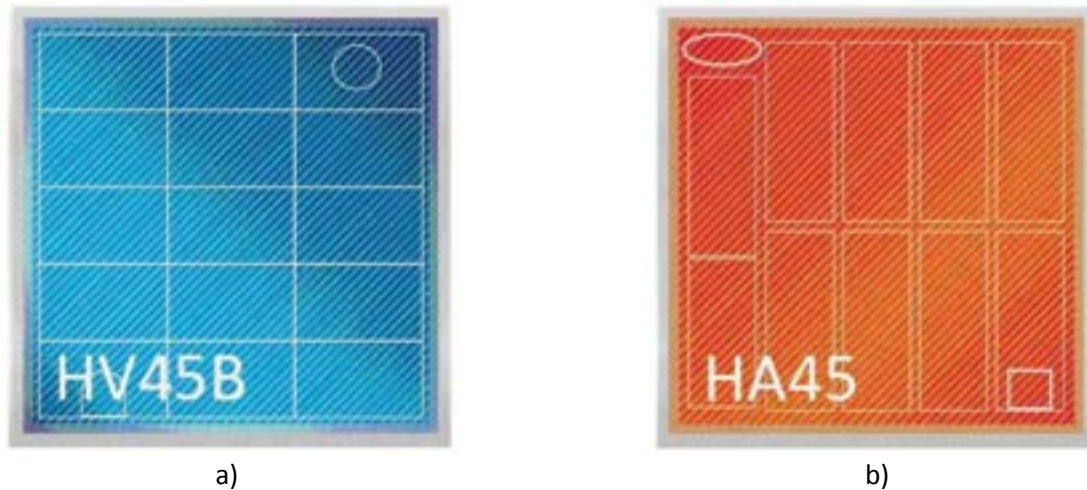


Figura 2.6. Chip LED ad alto voltaggio (HV-LED).  
a) Chip blu a 15 celle.  
b) Chip rosso a 10 celle.

Per un LED convenzionale il voltaggio di accensione è basso, tipicamente 2V per il rosso e 3V per il blu. Quando i LED sono utilizzati per l'illuminazione d'interni, il voltaggio di input è il voltaggio principale AC, cioè 120V o 230V. Come mostrato in fig.2.7, in aggiunta al rettificatore esterno (che converte da AC a DC), è necessario un convertitore di corrente per convertire il voltaggio principale in basso voltaggio. Il convertitore di corrente è costoso e voluminoso, e diminuisce l'efficienza globale del sistema a causa delle perdite di conversione.

Gli AC-LED sono progettati per essere connessi direttamente alla rete principale. Come mostrato in Fig. 2.7, uno dei modi per realizzare un LED AC consiste nel prendere un chip monolitico con ponte rettificatore integrato: quando un LED AC è messo in funzione, però, non tutte le celle LED rimangono accese in modo continuativo, per cui l'utilizzazione del LED è solo del 50-70%, fatto che inevitabilmente causa un sovracosto del chip.

In termini di alimentazione, un HV-LED è simile all'AC-LED, perché il voltaggio di accensione del LED è più vicino al valore di rete: l'HV-LED utilizza un voltaggio DC e non ha un rettificatore integrato, per cui è necessario un ponte a 3 diodi per la rettificazione, ma in compenso l'HV-LED utilizza il chip al 100%, esattamente come i LED a basso voltaggio. Tutti e tre i tipi di LED sono adatti per alcune applicazioni specifiche. La tab. 2.1 analizza i vantaggi e gli svantaggi dei tre dispositivi da diversi punti di vista.

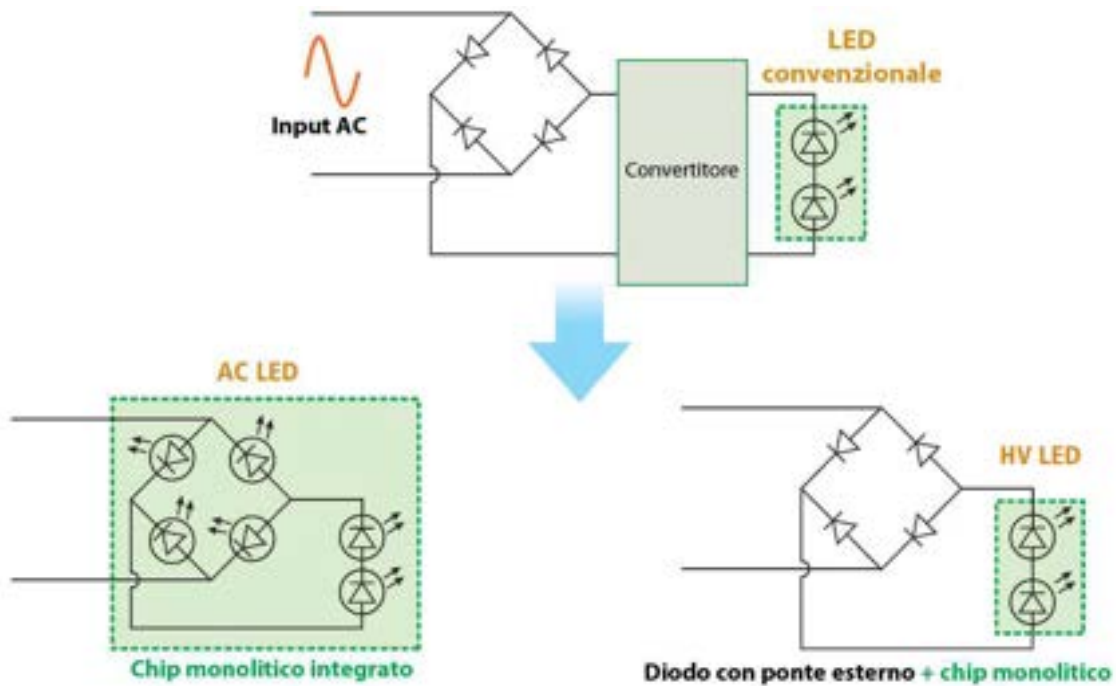


Figura 2.7. Confronto tra un LED convenzionale, un LED AC e un LED HV. Il LED AC presenta un rettificatore integrato dell'alimentazione AC, ma l'utilizzo del LED è solo il 50-70% poiché tutte le celle LED non emettono luce continuamente quando il LED è acceso. Il LED HV richiede un rettificatore esterno a ponte, ma tutte le celle LED sono sempre accese. Né il LED AC né quello HV richiedono un driver LED.

Tabella 2.1. Vantaggi e svantaggi di diodi LED convenzionali (<2W), LED AC (2-10W) e LED HV (>10W)

Lampada LED / tipo di apparecchio	<2W per illuminazione interna	2-10W per illuminazione interna	>10W per illuminazione esterna
Limitazione spaziale	Molto limitato	limitato	Non limitato
Costo del driver	Non si può permettere driver	Il driver deve costare poco	Il driver può costare di più
Fattore di potenza (PF)	Non richiesto	0,5-0,9	>0,9
Dimmerabilità	richiesta	richiesta	Non richiesta
Soluzione ottimale	AC-LED	HV-LED	LED convenzionali o HV-LED

## **Gestione termica, materiali innovativi e nuove tecnologie di involucro**

Gli avanzamenti della tecnologia stanno rendendo la gestione termica dei LED se possibile ancora più complessa, a causa del continuo aumento di potenza e corrente necessario per creare diodi con flusso luminoso sempre maggiore: basti pensare che un comune LED oggi consuma 1W, mentre fino a pochi anni fa consumava pochi milliwatt.

Per affrontare tale problema, le soluzioni sono orientate alla realizzazione di nuove configurazioni e geometrie che ottimizzino la dissipazione del calore, e all'utilizzazione di nuovi materiali che possano offrire performance superiori. Attualmente, molti dissipatori di calore per LED formati o stampati utilizzano conformazioni alettate, che aumentano la superficie di scambio termico e producono uno scambio convettivo più efficace. I materiali attualmente impiegati nella realizzazione dei dissipatori sono l'alluminio, che ha una buona conducibilità termica e un costo relativamente basso, e il rame, che ha conducibilità doppia, ma un costo molto più elevato.

Poiché i LED non emettono nell'infrarosso per irraggiamento, il calore prodotto deve essere rimosso per conduzione o convezione. Se la dissipazione del calore è insufficiente, il LED può essere soggetto a viraggio precoce del colore: nello specifico, il voltaggio di mandata comincia a decrescere, dando origine a un incremento del carico sui componenti del driver LED e causando un aumento della loro temperatura; con temperature ancora superiori, si può spostare la lunghezza d'onda di emissione, facendo assumere alle luci arancioni il colore rosso e alle luci bianche un colore azzurrato. Inoltre, un LED termicamente stressato perde efficienza, e il flusso luminoso diminuisce: se il calore non viene dissipato, la giunzione LED si può danneggiare, portando a rottura l'intero elemento; altre conseguenze possono includere delaminazione interna del punto di saldatura, danneggiamento alla resina epossidica e ingiallimento delle lenti.

In questo ambito, sono allo studio soluzioni innovative per limitare l'impiego dei metalli migliorando comunque la dissipazione di calore. Le principali attualmente al vaglio sono:

- combinare il rame con la polvere di diamante, ottimo conduttore di calore (cinque volte meglio del rame): legare la polvere di diamante al rame utilizzando il cromo dà origine a performance molto elevate, ma anche a costi troppo alti.
- aumentare l'efficienza di scambio termico e conseguentemente la dissipazione di calore attraverso il ricorso al raffreddamento a fluido, soluzione più efficiente nel sottrarre calore all'apparecchio e cederlo all'ambiente rispetto all'impiego dei soli metalli solidi. Questo approccio ottimizza il raffreddamento, rendendo il dissipatore più piccolo ed efficiente, trasferendo il problema alla complessità della progettazione.
- aggiungere fogli dissipatori di calore: è possibile posizionare dei fogli flessibili di composti di grafite che, conformati in varie forme e abbastanza economici da produrre, hanno caratteristiche termiche molto buone. In particolare, il composto conduce calore nella direzione di sviluppo in

modo molto più efficace rispetto ai materiali standard come il rame e l'alluminio, mentre nella direzione del suo spessore ha caratteristiche comparabili.

- sostituire il metallo con la ceramica: i materiali ceramici possono essere plasmati praticamente in qualsiasi forma e presentano una capacità di conduzione del calore quasi uguale a quella del rame. I dissipatori di calore ceramici sono inoltre economici da produrre e possono fornire funzionalità aggiuntive alla forma del componente su cui si montano, divenendo sia un alloggiamento che un dissipatore per i LED. I principali svantaggi di questa soluzione sono la necessità di operazioni secondarie (eliminazione delle sbavature) e la fragilità della ceramica, confrontata con gli altri materiali.

Vengono di seguito descritte brevemente le diverse soluzioni ad oggi proposte dal settore ricerca.

### Composti termoplastici

I nuovi composti termoplastici conduttivi, di colore bianco o leggermente colorati (Fig. 2.8), offrono grande flessibilità di progettazione e riduzione dei costi del sistema. Rispetto all'alluminio e agli altri metalli, oltre a un peso molto minore, tali composti presentano coefficienti di espansione termica inferiori, con conseguente riduzione degli stress dovuti alla differenza di dilatazione termica; inoltre, molti tipi di materiali termoplastici, inclusi i materiali amorfi e cristallini, possono essere usati per la costruzione dell'involucro delle sorgenti, seppur con l'aggiunta di un rinforzo in vetro per conferire stabilità dimensionale. La scelta di tali materiali offre una grandissima flessibilità di progettazione, con la possibilità di creare forme complesse e più efficienti attraverso processi di iniezione in sostituzione di quelli di stampaggio tradizionale, invece richiedono l'impiego di metalli e di ulteriori operazioni di finitura, generalmente costose.



Figura 2.8. Lampade LED per retrofitting della Leedarson Lighting Co. Ltd. con dissipatore di calore in composto termoplastico conduttivo bianco: lampada da 1,8W a forma di candela (a sinistra) e da 1,8W sferica (a destra).

## Composti termoplastici con riempimenti conduttivi

Un particolare tipo di composti termoplastici sono quelli con riempimenti conduttivi, che combinano la conduttività termica dei metalli con l'isolamento elettrico dovuto al tipo di riempimento (ceramiche come il nitrito di boro e il carbone di grafite). In confronto ai composti termoplastici privi di riempimento, che presentano una conducibilità termica di circa  $0,2\text{W/mK}$ , la maggior parte dei composti termoplastici conduttivi ha conducibilità 10-50 volte superiore ( $1-10\text{W/mK}$ ), che in alcuni casi può arrivare a  $100\text{W/mK}$ .

## Schiuma di grafite

La ricerca sui materiali da impiegare come dissipatori di calore non si è però limitata ai composti termoplastici conduttivi. Nei laboratori della Materials Science and Technology Division dell'ORNL (*Oak Ridge National Laboratory*), ente di ricerca statunitense, è stata realizzata una schiuma di grafite ad elevata resistenza termica (Fig. 2.9), utilizzabile nei sistemi di raffreddamento dei LED e in altre componenti degli apparecchi SSL. La schiuma ha una struttura cristallina che offre elevata conduttività termica e scarso peso. La struttura della schiuma è fondamentalmente una ragnatela di legami conduttivi e bolle d'aria: i legami conducono il calore lontano dai LED, mentre la bassa densità della schiuma dovrebbe aiutare a ridurre significativamente il peso, in confronto ad altri materiali come il rame o l'alluminio.

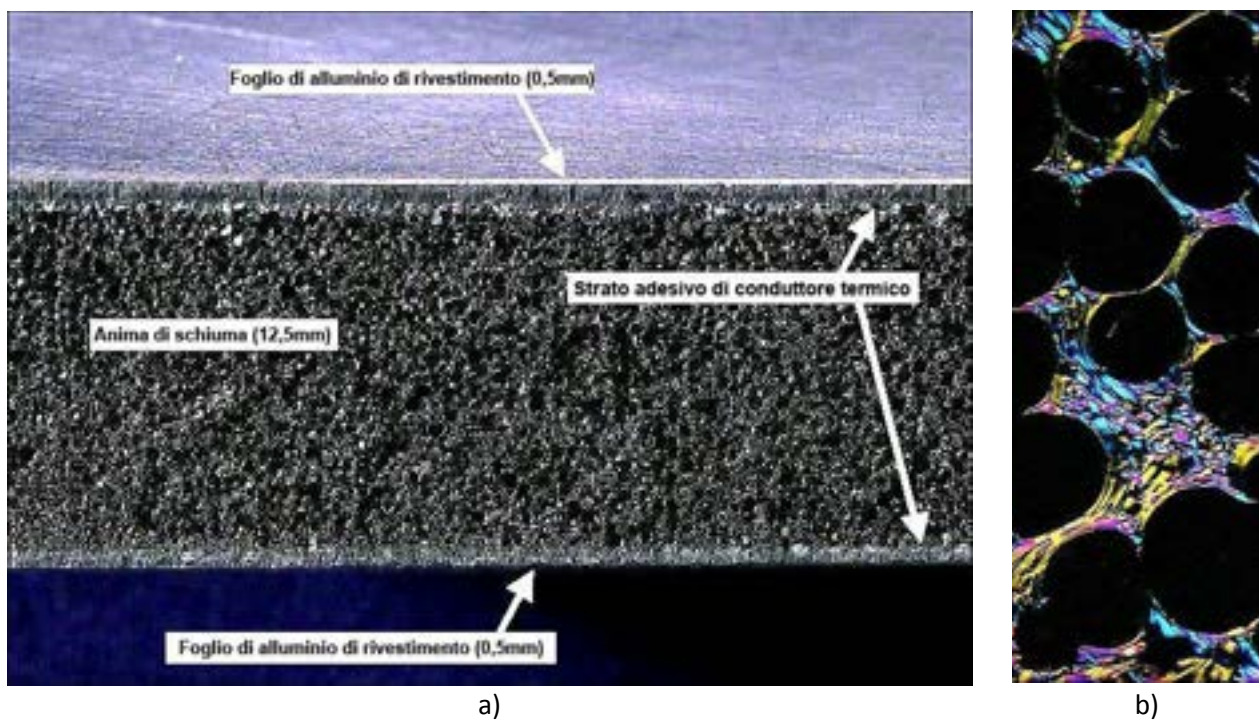


Figura 2.9. Schiuma di grafite per dissipatori di calore sviluppata dall'ORNL.

- a) Struttura del pannello in sezione.
- b) Dettaglio al microscopio della schiuma.



Sebbene ci sia una grande quantità di materiali pronti a sostituire i metalli tradizionali, i composti termoplastici sembrano offrire rispetto agli altri la migliore combinazione di performance, design, flessibilità, estetica ed efficienza produttiva per adattarsi alle esigenze delle nuove tecnologie.

### Sistemi di raffreddamento passivo e attivo

Quanto detto finora relativamente alla gestione termica rientra nel modello fisico del raffreddamento passivo, che avviene, cioè, in assenza di ausili meccanici: il calore è asportato dai chip per conduzione attraverso il materiale di cui è costituito il dissipatore. Esistono però altri sistemi che consentono di raggiungere lo stesso obiettivo: in particolare sono allo studio sistemi di raffreddamento passivo tramite liquido e sistemi di raffreddamento attivo, che invece impiegano un sistema meccanico per creare getti d'aria per massimizzare lo scambio termico.

Diverse case produttrici stanno realizzando linee di lampade a LED per retrofitting: uno degli esempi più particolari è la linea presentata dalla Switch Lighting, le cui lampade sono basate su un design unico, in cui i LED sono montati su delle placche metalliche rivolte verso l'esterno del bulbo e sono immersi in un liquido inerte che raffredda i componenti, permettendo l'uso di correnti superiori e quindi maggiore flusso luminoso emesso da un numero minore di diodi. La lampada per retrofitting da 75 W (Fig. 2.10) consuma 16W e usa solo 10 LED per produrre 1150lm, ed è caratterizzata da una temperatura di colore di 2750K e un CRI pari a 85; in Fig. 2.10c è mostrata la lampada che sarà messa in commercio, differente in quanto ha un bulbo in vetro smerigliato diffondente. Le placche metalliche su cui sono montati i LED, insieme al liquido, sono progettate per trasferire il calore al globo e da qui all'ambiente, facilitando il raffreddamento del sistema.

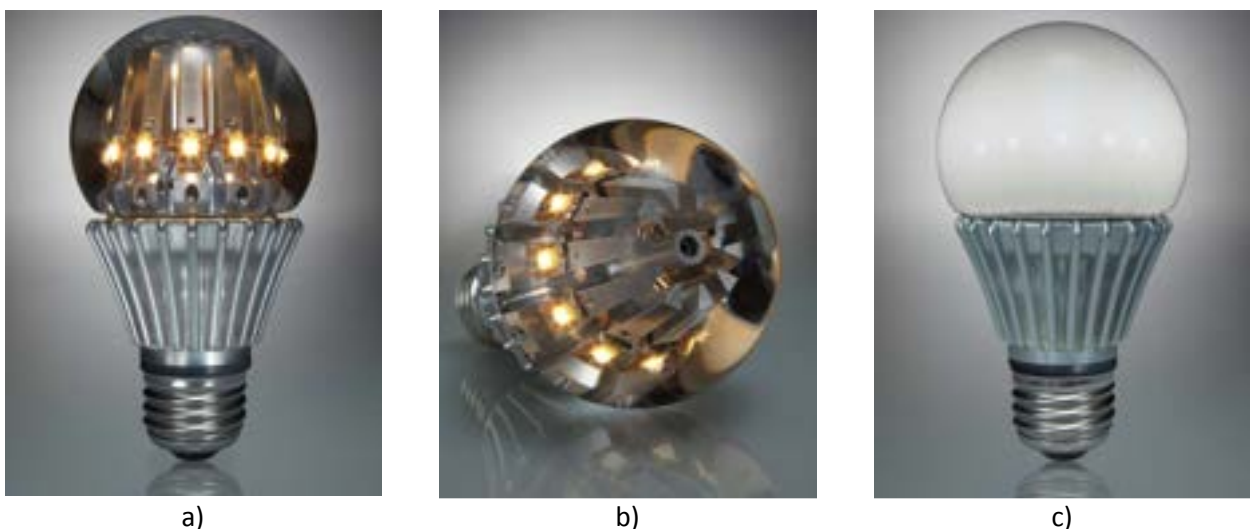


Figura 2.10. a) e b) Prototipo del bulbo LED per retrofitting da 75W presentato da Switch Lighting.  
c) Bulbo LED così come verrà commercializzato, con un globo in vetro smerigliato diffondente.

Il flusso luminoso è un fattore chiave nell'adozione dell'illuminazione LED: sebbene la tecnologia continui ad evolversi, le applicazioni che richiedono flussi molto elevati non possono ancora ad oggi essere messe in pratica solamente con sistemi di raffreddamento passivo perché i dissipatori di calore aumentano di dimensione assieme al carico termico da smaltire, e non riescono a rientrare nelle dimensioni degli alloggiamenti delle lampade tradizionali.

La tecnologia di raffreddamento attivo offre prestazioni termiche superiori rispetto ai più tradizionali dissipatori passivi di calore, e può far aumentare il flusso luminoso emesso ed allungare la vita dei LED.

I dissipatori di calore tradizionalmente impiegati sono in grado di risolvere i problemi di gestione termica delle sorgenti LED con flusso luminoso limitato. I produttori hanno difficoltà già nel produrre lampade da retrofitting per sorgenti a incandescenza a 40W. Ma quando il flusso luminoso aumenta ulteriormente, la questione del surriscaldamento diventa di fondamentale importanza e il dissipatore di calore passivo non riesce più da solo a smaltire tutto il calore: una lampada per retrofitting di lampade tradizionali da 75 o 100W non può essere raffreddata solo con un dissipatore di calore, ma poiché la domanda di tali sorgenti è elevata, è necessario trovare un altro sistema di smaltimento del calore. Tale sistema deve essere caratterizzato da consumi energetici bassissimi, una flessibilità tale da poter essere contenuto in un fattore di forma piccolo, e avere una durata di vita uguale o superiore a quella delle sorgenti luminose. Alcune soluzioni per il raffreddamento attivo, infatti, come ad esempio l'aggiunta di ventole, non presentano la stessa durata di vita del chip.

Il raffreddamento a getto d'aria artificiale (*synthetic jet cooling*) rappresenta un soluzione di raffreddamento attivo adottato da molte case produttrici. Tali moduli di raffreddamento sembrano poter consentire il superamento dei limiti attuali dello sviluppo della tecnologia LED, assicurando un'efficace dissipazione del calore, un fattore di forma ridotto e una grande affidabilità.

I getti d'aria sono un'alternativa alle più tradizionali ventole, e sono molto più adatti alle esigenze della gestione termica dei LED. Essi sono generati per suzione e iniezione periodica di aria attraverso un foro in seguito all'oscillazione di un diaframma, come mostrato in Fig. 2.11: in fig. 2.11a-c è mostrata la fase di espulsione dell'aria attraverso il foro, mentre in fig. 2.11d-e è visibile la fase di suzione.

Gli impulsi di aria turbolenta (tipicamente in numero variabile da 30 a 200 al secondo), rompono lo strato termico liminare e aumentano la quantità di calore asportato dalla sorgente (o più spesso dal dissipatore), consentendo l'ottimizzazione del processo di raffreddamento. La tecnologia di raffreddamento a getto d'aria offre diversi benefici:

- la possibilità di un'elevata asportazione di calore con getti di portata molto limitata e direzionati ad hoc;
- una notevole riduzione delle dimensioni dei dissipatori di calore, con un conseguente considerevole alleggerimento e una riduzione delle dimensioni del sistema di illuminazione, lasciando allo stesso tempo inalterate le caratteristiche fotometriche;

- una durata di vita molto elevata, perché i moduli che generano il getto contengono parti mobili prive di attrito che li rendono affidabili, resistenti alla polvere e alla contaminazione di particelle, oltre che totalmente silenziosi.

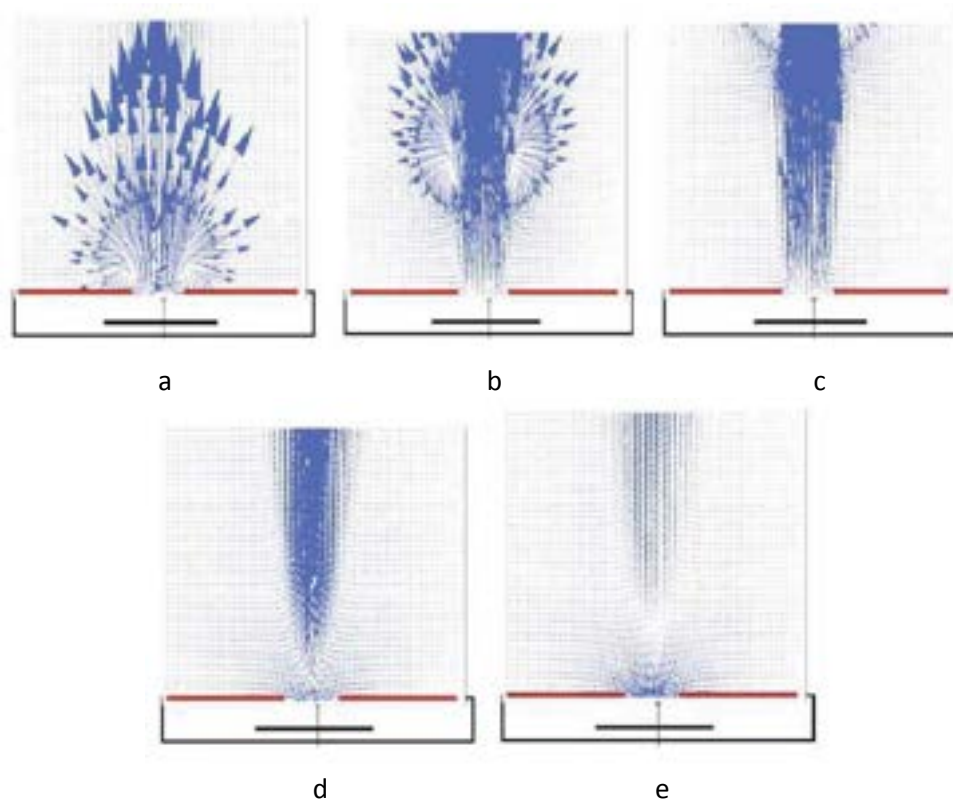


Figura 2.11. Vettori di velocità del flusso a getto artificiale non appena viene espulsa l'aria.

Si considerano qui di seguito due esempi di lampade LED per retrofitting che utilizzano la tecnologia a getto d'aria: il prototipo della Ledon per le lampade da 75W e 100W a incandescenza, e il prototipo Nuventix per sostituzione di lampade con fattore di forma PAR38.

Con il raffreddamento a getto artificiale inserito nella parte superiore del bulbo, la Ledon è riuscita ad ottenere flusso luminoso equivalente a quello delle sorgenti tradizionali a incandescenza che tale lampada per retrofitting mira a sostituire. Al di sopra del getto artificiale un diffusore conduce il calore dal LED al dissipatore, che forma degli ugelli distribuiti radialmente attraverso i quali il getto sintetico spinge l'aria e distribuisce il flusso alle alette di raffreddamento. Per raffreddare i driver elettronici, una camera del getto artificiale è connessa all'involucro del driver, mentre delle aperture di aerazione sul lato inferiore dell'involucro permettono lo scambio d'aria e consentono il raffrescamento dei dispositivi elettronici. La flessibilità del getto artificiale che indirizza l'aria in molteplici direzioni per raffreddare tutte le parti principali dei LED consente pertanto una buona flessibilità nel design.

La Nuventix ha invece creato un design di riferimento per la gestione termica di una lampada per retrofitting di tipo PAR38 (Fig. 2.12a). Lo schema progettuale di riferimento, quando utilizzato in

congiunzione con il Nuventix synJet (Fig. 2.12b) per la generazione del getto d'aria, fornisce ai progettisti illuminotecnici un sistema per realizzare strisce di LED con flusso luminoso maggiore di 2500lm di dimensioni sufficientemente contenute per rientrare nel fattore di forma PAR38. Ciò costituisce un notevole progresso, se si considera che solitamente le lampade a LED per retrofitting delle lampade PAR38 producono in media solo 1500lm. Il progetto comprende un driver elettronico della Texas Instruments (TI) che permette di avere un fattore di forma più ridotto, in quanto integra dei componenti singoli su un singolo circuito integrato (IC). Il SynJet consente fino a 40W di raffreddamento nel fattore di forma PAR38, con un consumo inferiore ai 500mW.

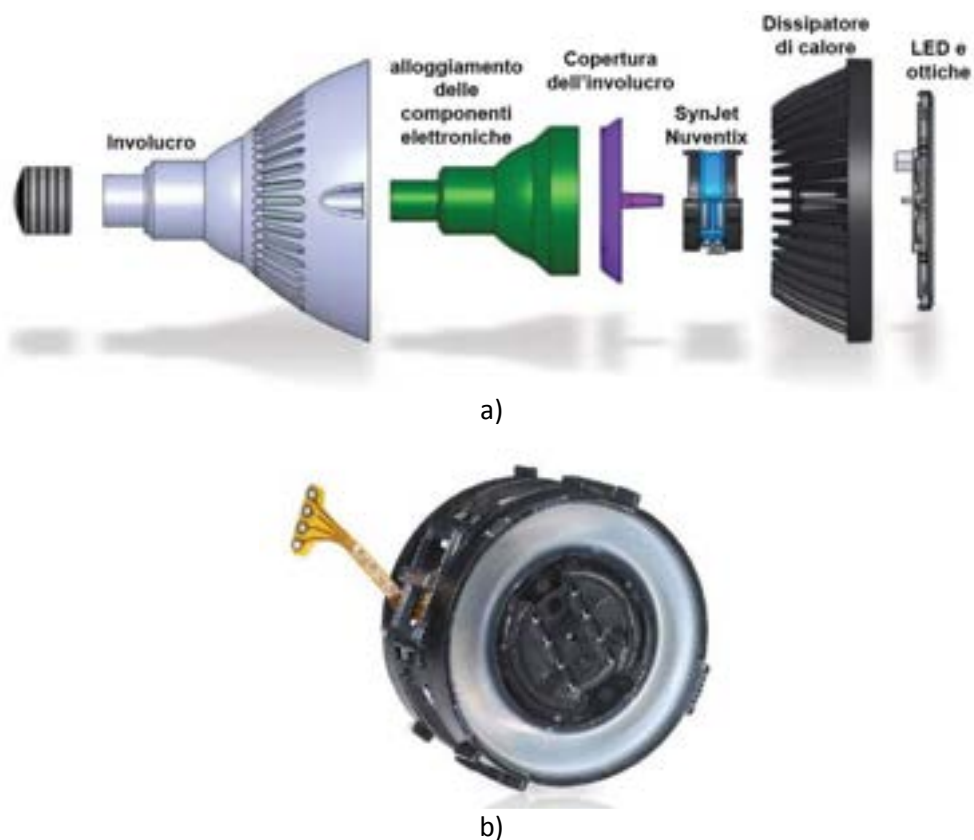


Figura 2.12. Raffreddamento attivo.

- a) modello di progettazione di riferimento per il retrofitting di lampade PAR38 con raffreddamento attivo tramite motore SynJect Nuventix.
- b) Il motore SynJect Nuventix, con diaframma oscillante che produce il getto d'aria artificiale.

### *Confronto tra sorgenti alogene e LED sulla gestione termica*

Malgrado una maggiore efficienza rispetto alle altre sorgenti luminose, i LED possono presentare problemi di affidabilità se una qualsiasi delle parti del sistema di illuminazione, incluso il driver, non sono protette in modo adeguato dal surriscaldamento.



a)



b)

Figura 2.13. Confronto di due apparecchi di tipo flood.

a) Apparecchio che utilizza un'alogeno.

b) Apparecchio che utilizza una sorgente LED.

Se si considerano due apparecchi di tipo flood, uno equipaggiato con una lampada alogena lineare e l'altro con una stringa LED, si intuiscono facilmente i problemi della gestione termica: entrambi gli apparecchi (Fig. 2.13) appaiono ugualmente luminosi all'occhio umano e hanno spettri "relativamente simili". La lampada alogena impiega però 150W di potenza elettrica, mentre il LED impiega solo 55W. La potenza assorbita viene trasformata in modo differente dalle due sorgenti:

alogeno: 125W irradiato come IR (83% della potenza totale);

20W come calore ceduto per conduzione all'involucro (14% della potenza totale);

5W come luce visibile (3% della potenza totale).

LED: 45W come calore ceduto per conduzione all'involucro (82% della potenza totale);

5W come luce visibile (9% della potenza totale);

5W perso come calore nel driver LED AC/DC (9% della potenza totale).

Sebbene quindi i LED siano tre volte più efficienti nel convertire energia elettrica in luce, essi generano più del doppio del calore di conduzione di una sorgente alogena equivalente: questo è il motivo per cui sono facilmente soggetti a surriscaldamento se il dissipatore di calore non è adeguato.

Ma i LED sono molto sensibili al riscaldamento anche perché sono dispositivi a semiconduttori con temperatura massima di funzionamento limitata:

alogeni: temperatura tipica della lampada: 200°C  
temperatura tipica dell'alloggiamento: 50°C

LED: temperatura massima di giunzione: 115°C  
temperatura tipica dell'alloggiamento: 65°C

È importante impedire che i LED si surriscaldino per varie ragioni: il primo effetto ampiamente riconosciuto è la riduzione indotta del flusso luminoso emesso, influenzata sia dalla temperatura ambiente che dall'adeguatezza della progettazione termica del raffreddamento dei LED.

In secondo luogo, i LED hanno un coefficiente di temperatura negativo. In altre parole, con l'aumentare della temperatura, il voltaggio di mandata del diodo si riduce. Il coefficiente è tipicamente tra -3mV/K e -6mV/K, per cui un LED tipico che ha una corrente di voltaggio di 3,3V a 25°C può avere un voltaggio di mandata di solo 3,0V a 75°C. Se il driver LED non riesce a gestire la riduzione nel voltaggio totale e a regolare correttamente la corrente nel diodo, il LED sarà "super alimentato" e si surriscalderà, riducendo ulteriormente il voltaggio e dando origine ad una deriva termica, fenomeno ricorrente nei LED economici, con una gestione della corrente non sufficientemente sofisticata. E anche se la progettazione della lampada LED è abbastanza buona da ridurre gli effetti a breve termine del surriscaldamento dei LED, come la diminuzione del flusso emesso e il rischio di deriva termica, gli effetti a lungo termine del funzionamento a temperature elevate possono comunque essere rovinosi.

### *Meccanismi di rottura*

Il trend di rottura dei LED aumenta gradualmente all'aumentare della temperatura. Esistono una serie di meccanismi che possono causare una drastica riduzione nella durata di vita all'aumentare della temperatura di funzionamento. Alcuni dei meccanismi identificati sono:

- il deterioramento chimico all'interno del LED che si verifica a temperature elevate (cioè l'invecchiamento precoce dovuto allo stress termico);
- l'ingresso di umidità e l'ossidazione che si verifica perché il sigillo della capsula non è più ermetico (ad esempio la degradazione delle resine epossidiche);

- gli effetti della corrosione da contatto o della delaminazione del contorno, e le rotture accelerate dei semiconduttori, dovute a meccanismi come l'aumentare delle crepe all'interno del silicone;
- l'elettromigrazione che provoca punti caldi nella giunzione;
- la diffusione del metallo all'interno dei contatti elettrici che provoca la rottura del contatto.

La causa di rottura più frequente rimane comunque lo stress meccanico: quando un LED si riscalda l'incapsulante si ammorbidisce. Questo consente alle connessioni elettriche e a tutti gli elementi di saldatura di spostarsi leggermente. Quando il LED si raffredda, la resina epossidica si indurisce di nuovo e questo impone uno stress meccanico sulle saldature che alla fine provoca una rottura della connessione. Sono oggi in commercio LED fabbricati senza saldature proprio per eliminare questa causa di rottura. Ciononostante, un processo simile si verifica nelle saldature tra il LED e il supporto PCB (Printed Circuit Board), dove cicli ripetuti di riscaldamento e raffreddamento creano delle fessure che si propagano per tutta la saldatura fino alla rottura della connessione.

Il tipo di rottura più comune per i LED è quindi la formazione di un circuito aperto. Il miglior modo di assicurare lunga vita ai diodi è mantenere la differenza di temperatura tra la stanza e la temperatura di funzionamento bassa, o addirittura non spengere mai l'apparecchio.

Sebbene i power LED siano più efficienti rispetto alle sorgenti di illuminazione tradizionali, il loro flusso è ancora limitato: per questo si assiste normalmente a tentativi di utilizzo al massimo delle potenzialità per ottenere il massimo dell'illuminazione. Questa strategia può però risultare pericolosa, in quanto può causare la rottura prematura dell'elemento, se non ci si assicura che i LED si raffreddino correttamente. Molti sono infatti gli esempi di alloggiamenti estremamente eleganti per LED in cui il dissipatore di calore non era sufficiente o il flusso d'aria troppo limitato.

Anche un alloggiamento ben progettato può però non funzionare bene, e questo perché i produttori raramente hanno il controllo su come e dove la lampada verrà installata: si possono verificare problemi infatti se il flusso d'aria è insufficiente (ad esempio se l'apparecchio è una lampada da incasso inserita all'interno di un soffitto sospeso che è stato riempito con lana di roccia) o se la temperatura ambiente è eccessiva (ad esempio alloggiamenti che sono disposti verticalmente su un muro di modo tale che l'apparecchio in alto risulti riscaldato da tutte le altre lampade sotto di essa).

Una soluzione a questo problema è rappresentata dall'aggiunta di una protezione termica al circuito del driver LED: se la temperatura del LED aumenta troppo, per qualsivoglia ragione, la corrente viene ridotta per limitare la dissipazione di corrente all'interno del diodo e mantenere la temperatura al di sotto di un massimo prefissato. Uno dei metodi più semplici di aggiungere una protezione termica è utilizzare un circuito di protezione a termistore con coefficiente di temperatura positivo (*positive temperature coefficient*, PTC).

Il funzionamento di un circuito di questo tipo è il seguente: non appena la temperatura si innalza al di sopra di una certa soglia, la resistenza del termistore PTC aumenta velocemente e causa una

riduzione della corrente in entrata al LED (Fig. 2.14). Scegliendo un termistore adatto e una rete di resistenze, il punto di deriva termica può essere scelto ad una temperatura qualsiasi. Il circuito, inoltre, può dimmerare gradualmente il LED non appena questo si avvicina alla temperatura massima di funzionamento, in modo tale che la riduzione del flusso luminoso non sia subito visibile. Questo tipo di soluzione è sicuramente preferibile rispetto a quelle in cui si determina una riduzione improvvisa di corrente e il diodo rimane spento finché non si è raffreddato.

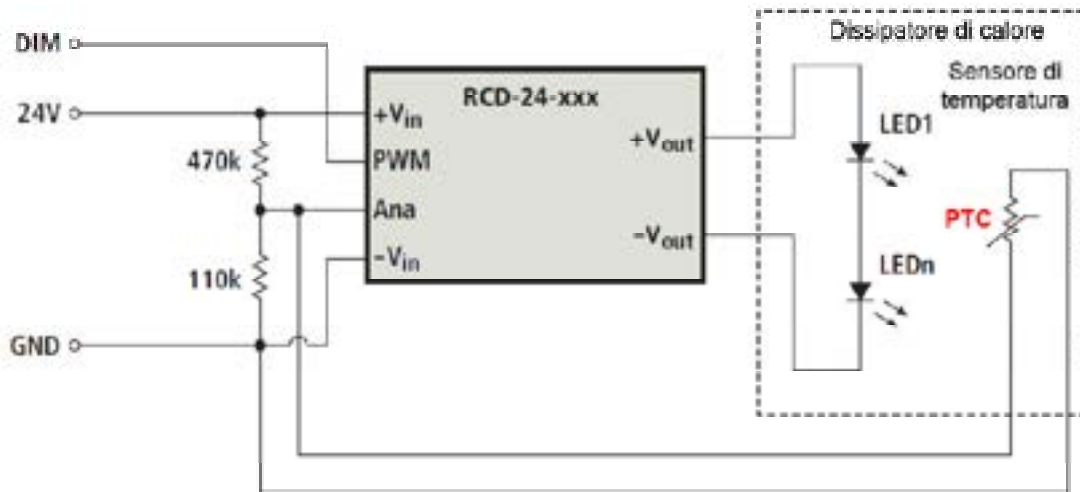


Figura 2.14. Esempio di protezione dal surriscaldamento tramite l'uso di un termistore PTC.

Per elevate temperature di funzionamento, l'affidabilità del driver risulta ridotta. In teoria, il driver dovrebbe essere montato a parte rispetto al modulo LED in modo che funzioni sempre alla temperatura ambiente. Molti progettisti LED preferiscono però una soluzione "all-in-one" per ragioni estetiche, arrivando a montare il driver direttamente sul dissipatore di calore o addirittura vicino ai LED sul circuito stampato.

Se per qualche motivo il driver e il LED devono essere montati vicini all'interno di una unità, il circuito di deriva termica mostrato in Fig. 2.15 è in grado di proteggere anche il driver, allungandone la durata di vita. La riduzione di corrente ad elevate temperature di funzionamento riduce infatti anche la dissipazione di calore interna e aiuta a raffreddare il driver. E' naturalmente possibile inserire un secondo termistore PTC in serie con il termistore del LED, in modo che entrambe le temperature (del LED e del driver) possano essere monitorate all'interno dello stesso circuito: in questo caso possono essere scelti due termistori diversi da far lavorare in corrispondenza delle temperature massime di funzionamento del driver e del LED.



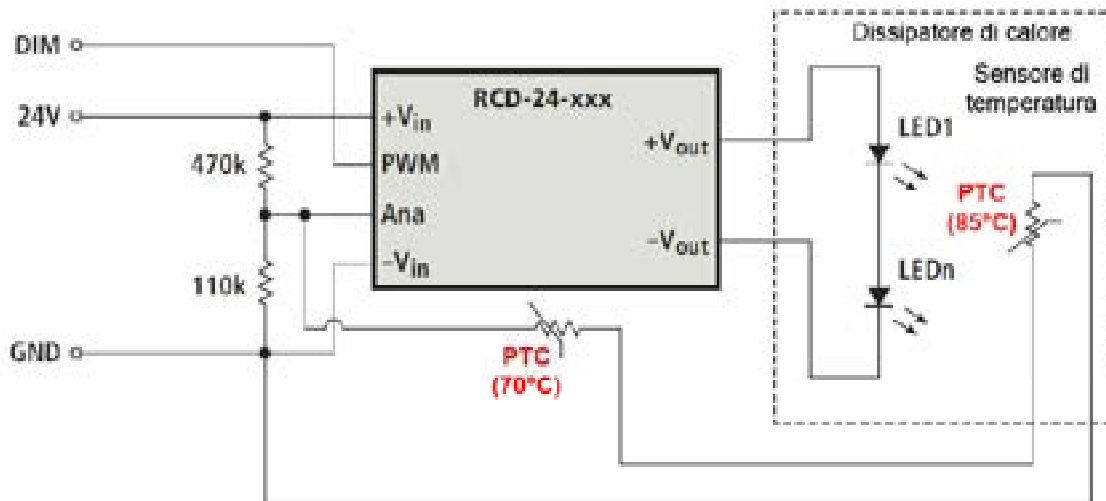


Figura 2.15. Utilizzando due termistori PTC si possono proteggere dal surriscaldamento sia il LED che il driver.

## Innovazioni tecnologiche finalizzate al miglioramento della resa cromatica

### LED UV

I LED UV, che possono essere realizzati con le stesse catene di montaggio dei chip blu utilizzati per la realizzazione di LED bianchi, hanno trovato una serie di nuove applicazioni nel campo industriale, delle scienze naturali, e in altri settori. La luce UV è molto utilizzata nell'incollaggio e nelle applicazioni mediche, è in grado di eliminare i solventi utilizzati in altri sistemi e può essere utilizzata per far crescere vegetali più sani, in quanto reintegra nello spettro fornito le lunghezze d'onda tagliate fuori dai vetri delle serre e che sono indispensabili per la produzione di antiossidanti benefici, i polifenoli. I LED UV potrebbero trovare posto anche nell'illuminazione generale: tali lunghezze d'onda aiutano la produzione naturale di vitamina D negli esseri umani, per cui aggiungerle allo spettro di emissione delle sorgenti potrebbe avere effetti diretti e benefici sulla salute, almeno finché la radiazione risulta controllata.

### LED viola

La Verbatim, una compagnia chimica Mitsubishi, ha introdotto lampade che combinano chip a luce rossa a 405nm con fosfori RGB. Il risultato, chiamato "Natural Vision LED" (fig. 2.16) consentirà alle lampade indici di resa cromatica vicini a quelli della luce naturale, con un CRI di 98. Un altro vantaggio dell'impiego del LED viola, utilizzato anche nei Vio LEDs della General Electrics, è che la cromaticità del LED bianco non dipende dalla lunghezza d'onda della luce emessa dal chip.

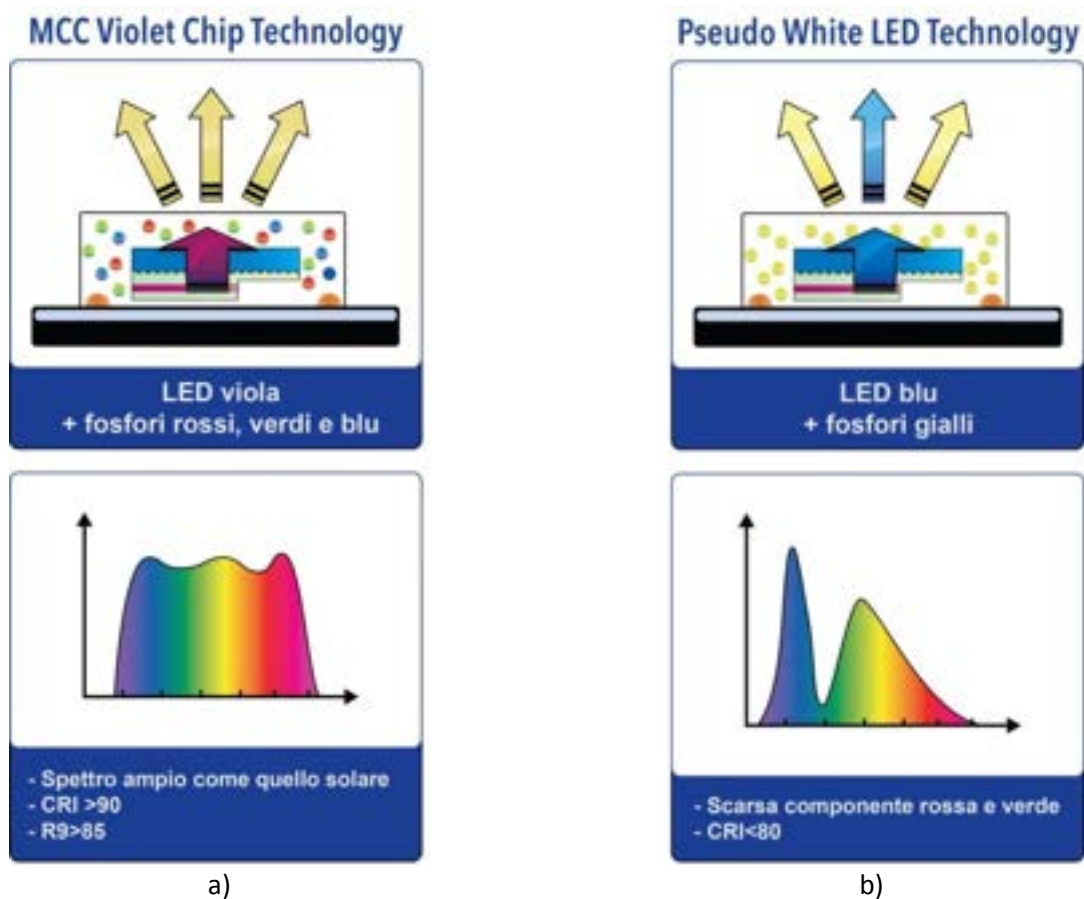


Figura 2.16. La Mitsubishi Chemical Corporation ha prodotto i LED “Natural Vision Lighting”, con chip viola e fosfori RGB. La distribuzione spettrale molto diversa dai comuni LED bianchi consente una resa cromatica molto alta e l’assenza di binning, perché il colore della luce dipende dai fosfori e non dal LED.

(Fonte: <http://www.verbatimlighting.com/article/violet-chip-technology/>)

### Generazione di luce bianca calda tramite LED rosso

Utilizzare un LED rosso invece di un fosforo rosso non solo migliora l’efficienza, ma aumenta anche il CRI e il valore di lm/€. Un approccio che combina LED rossi e blu è la soluzione ottimale per i LED a luce calda con un CRI che può arrivare fino a 90, come è mostrato in Tab. 2.2.

La Osram Opto Semiconductors ha proposto un mix LED chiamato “Brilliant Mix”, che combina LED bianchi e ambra per produrre luce bianca calda ad elevata efficienza (110lm/W). I LED impiegati sono gli Oslon SSL, diodi di 3x3mm che possono essere montati molto vicini, rendendo più facile il mix cromatico. Attraverso un sistema intelligente, il Brilliant-mix può coprire un vasto spettro di temperature di colore, compreso tra 2700 e 4000K. Il valore tipico dell’Ra è di 92, con una TCC di 2700K.

Tabella 2.2. Confronto tra tecnologie LED per la generazione di luce bianca

	<b>Bianco freddo: convenzionale</b>	<b>Bianco caldo: convenzionale</b>	<b>Bianco caldo: ibrido</b>
<b>Tecnologia</b>	Chip blu + fosforo giallo	Chip blu + fosforo rosso e giallo	Chip blu + chip rosso + fosforo giallo
<b>CCT</b>	5700K	2700K	2700K
<b>CRI</b>	70	82	90
<b>Efficienza relativa</b>	100%	65%	98%

### Qualità e stabilità del colore

La Luxeon ha inaugurato il programma “Freedom from Binning”, che ha come scopo primario quello di eliminare il binning e tutti i problemi ad esso collegati. Tale scopo viene perseguito attraverso un test dei LED alla loro temperatura tipica di funzionamento (85°C), in modo da poterli associare con fosfori adatti ad assicurare a tutti i LED di ricadere all’interno di un’ellisse di MacAdam a tre passi. Testare i LED alla loro temperatura di funzionamento reale è una grande innovazione se si considera che finora la fase di test è stata sempre eseguita a una temperatura di 25°C per ragioni di tempo e di costo, considerando trascurabile il viraggio di colore legato alla variazione della temperatura di funzionamento.

### **Ottiche di ultima generazione**

Il comportamento a lungo termine delle ottiche secondarie può influenzare in modo significativo la performance nel tempo dell’apparecchio LED. Le lenti di plastica sono le più comunemente impiegate e sono solitamente fatte in polimetilmetacrilato (PMMA) o policarbonato (PC): le caratteristiche di entrambi i materiali sono state ampiamente discusse in termini di trasparenza, resistenza termica e meccanica e costo, ma la performance di trasmissione della luce nel tempo non è stata ancora caratterizzata in dettaglio, tanto che l’unica informazione ad oggi acquisita è che il policarbonato tende ad ingiallirsi in seguito ad un’estesa esposizione alla radiazione UV, ragion per cui sarebbe opportuno impiegare delle barriere UV prima delle ottiche secondarie. L’ottica secondaria non dovrebbe essere trascurata nel calcolo della durata di vita di un sistema SSL, in particolare a causa della sua potenziale influenza sulle coordinate cromatiche della luce emessa.

La tecnologia delle ottiche si è evoluta per migliorare l’estrazione di luce dalle guide di luce all’interno delle applicazioni per display, e ora si sta adattando all’illuminazione architettonica. L’illuminazione sul compito, l’illuminazione per grandi aree e l’illuminazione washer sono campi d’applicazione adatti per le guide di luce, anche perché il washer LED è una delle sfide più difficili e

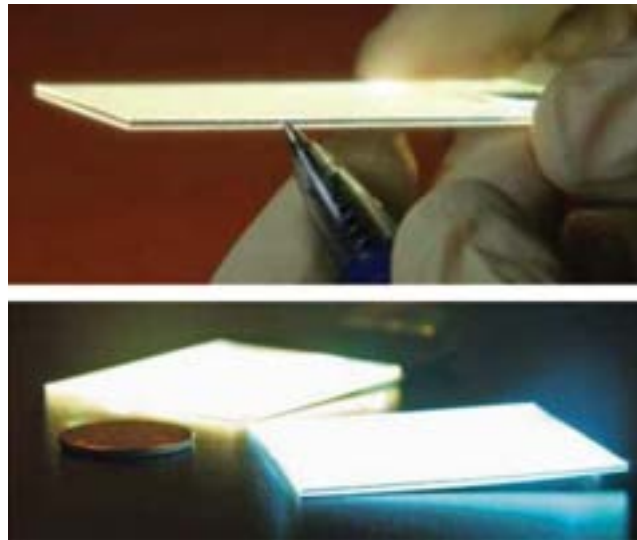
attuali della ricerca. In questo settore, le due principali evoluzioni identificate riguardano la creazione di LED pseudoplanari (costituiti da diodi puntiformi abbinati a una guida di luce diffondente) e l'introduzione di ottiche terziarie mobili per conferire flessibilità all'illuminazione d'interni.

### LED pseudoplanari

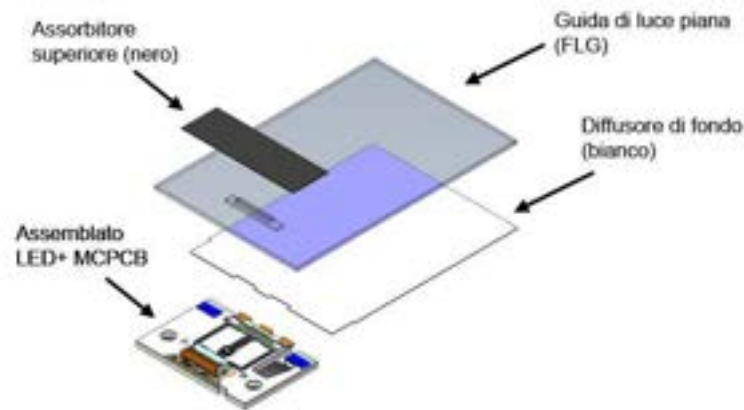
Negli ambienti interni, l'illuminazione planare rappresenta la soluzione ideale quando non è possibile ricavare fisicamente lo spazio per gli apparecchi illuminanti. Essendo i LED sorgenti luminose puntiformi, creare superfici ampie e uniformi ha sempre avuto infatti costi proibitivi e comportato una significativa perdita di efficienza, motivo per cui in questo settore sono attualmente predominanti gli OLED. Esempi di sorgenti luminose planari sono le insegne luminose, i display nelle vetrine e la segnaletica stradale luminosa; molti sono gli ambiti adatti a tale illuminazione presenti negli uffici, come gli apparecchi illuminanti a parete, l'illuminazione sotto i ripiani, l'illuminazione per il compito visivo e la retroilluminazione per schermi LCD. In tutte le situazioni appena citate e in molte altre, la transizione inevitabile dalle sorgenti tradizionali ai LED avviene per le stesse ragioni degli altri settori: ridurre i consumi elettrici, eliminare i materiali pericolosi, migliorare la qualità dell'illuminazione e la durata di vita delle sorgenti, ridurre lo spessore degli apparecchi e consentire un più efficace ed efficiente controllo. L'illuminazione planare LED è però soggetta ad un trade-off tra lo spessore del sistema, l'uniformità e l'efficienza, per cui, mentre è relativamente semplice realizzare un sistema luminoso in assenza di limitazioni sullo spessore, è molto più complesso (e costoso) realizzare sistemi con spessori molto contenuti, poiché occorre applicare ottiche secondarie e diffusori per eliminare l'effetto di sorgente puntiforme, ed estrarre la luce richiede una grande quantità di energia.

Grazie ai progressi nella nano-ottica, la Oree ha recentemente proposto un nuovo approccio all'illuminazione planare, che utilizza delle ottiche sviluppate appositamente per permettere ai chip LED di essere integrati all'interno di una guida di luce superficiale molto sottile, realizzando di fatto delle sorgenti "pseudoplanari" (Fig. 2.17): i diodi impiegati sono sorgenti puntiformi, ma la guida di luce e lo spessore ridotto conferiscono al prodotto caratteristiche simili a quelle dei diodi planari. Questo permette sia il *color mixing* (la generazione di luce di coordinate cromatiche a scelta dell'utente) sia l'emissione diffusa di luce attraverso tutta la superficie del pannello. Applicando la nuova tecnologia al controllo della luce, il risultato è il primo modulo di illuminazione planare dal costo contenuto, ultrasottile, a risparmio energetico. I benefici principali di questo sistema sono:

- il modulo di illuminazione contiene i chip LED in un'unica struttura che è progettata per consentire alla maggior parte della luce di essere utilizzata e direzionata, attraverso una serie di micro-ottiche all'interno di una guida di luce per minimizzare le perdite energetiche;
- l'elevata frazione di luce emessa (LOR light-output-ratio) dal sistema.



a)



b)

Figura 2.17. LightCell di Oree: superficie SSL sottile e piatta di misura 50x50mm.

- a) Immagini del dispositivo in funzione nella versione a luce calda e a luce fredda.
- b) Schema di funzionamento: i LED, situati su una PCB speciale, sono posti all'interno di foro praticato nella guida di luce (azzurra) che la diffonde, per poi emetterla attraverso un diffusore di fondo.

La tecnologia consente inoltre di unire più moduli come se fossero pannelli di controsoffitto e ottenere superfici molto più estese. Tale sorgente, chiamata LightCell, misura 50x50mm ed è adatta non solo alle applicazioni di illuminazione generale, decorativa e architettonica, ma anche alla retroilluminazione di monitor LCD. La versione RGB ha un output di 40lm e un CRI>85 nella versione a luce calda. Una seconda versione del prodotto, denominata TunableLightCell e contenente LED RGBA, dà la possibilità di variare intensità e colore della luce emessa.

## Lenti terziarie

I sistemi ottici per i prodotti di illuminazione LED sono molto diversi dagli apparecchi tradizionali. Poiché la trasmissione attraverso lenti è più efficiente rispetto alla riflessione con riflettori, gli apparecchi LED dotati di sistemi con ottiche appropriate possono presentare una maggiore efficienza luminosa.

La tecnologia Spherolit sviluppata dalla Erco, ad esempio, è basata sulla suddivisione di una grande lente piana in piccole facce tridimensionali che controllano, ridistribuendola, la luce attraverso il fenomeno della rifrazione: conformando ogni singola faccetta "sferolitica", le caratteristiche della lente possono essere controllate minuziosamente e, a seconda della curvatura imposta ad ogni faccetta, la luce incidente viene distribuita nelle varie direzioni in percentuali differenti. Il sistema è costituito da lenti diverse, ma con la stessa geometria di base, che producono angoli di apertura del fascio luminoso diversi e variabili, dallo spot stretto al flood ampio. Realizzate in un polimero ottico, le lenti sono componenti di estrema precisione realizzate con la tecnica dello stampaggio a iniezione. La combinazione delle ottiche primarie del LED, di un collimatore e delle lenti Spherolit può fornire una performance molto elevata ed un sistema flessibile per l'illuminazione architettonica (Fig. 2.18).

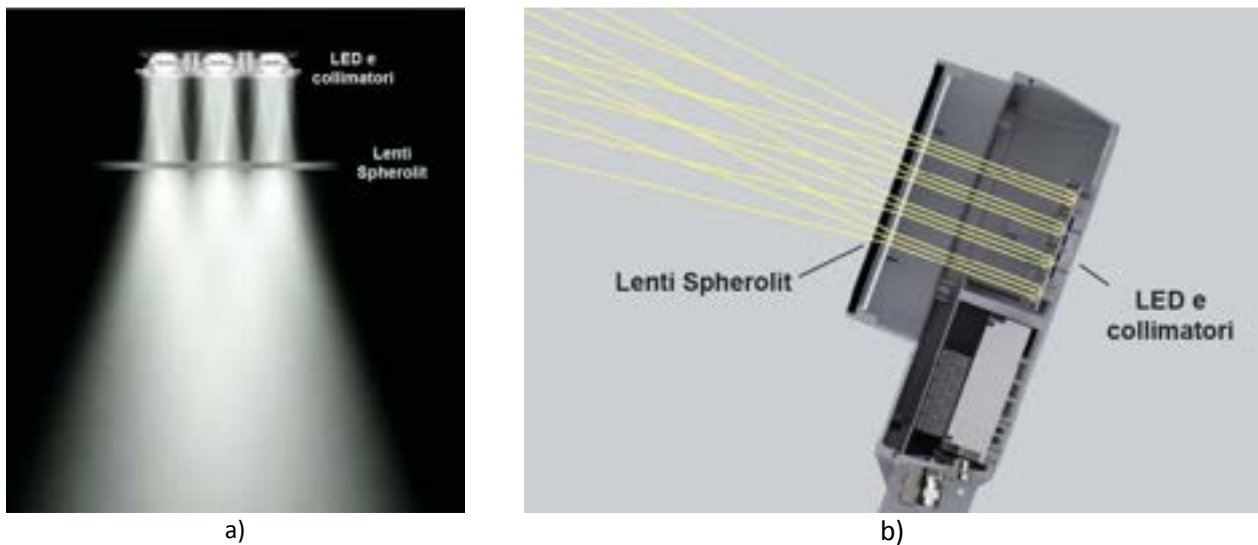


Figura 2.18.

- a) Sistema ERCO Spherolit: la luce è guidata da tre elementi (ottiche primarie, secondarie e terziarie) situati rispettivamente subito sopra il LED singolo, davanti a tutti i LED (collimatore) e davanti al collimatore (lenti Spherolit).  
b) conformazione del fascio luminoso: la luce uscente dai LED viene collimata, cioè trasformata in raggi paralleli dal collimatore e va a incidere sulle lenti Spherolit, che conformano il fascio nella maniera desiderata.

Il collimatore, realizzato in un polimero ottico e con funzione di ottica secondaria, forma il collegamento nella catena tra l'ottica primaria del LED inserito sul circuito stampato e le lenti intercambiabili Spherolit, che fungono da ottiche terziarie. Il collimatore allinea in un fascio parallelo i raggi luce del chip LED, con la sua distribuzione emisferica, di modo che la lente terziaria possa successivamente creare l'apertura del fascio luminoso desiderata. Questo approccio

fornisce una grande adattabilità, in grado di fornire un'illuminazione ottimale anche nelle situazioni in cui l'illuminazione è variabile nel tempo, come in spazi per esibizioni e showroom. Il vantaggio dei collimatori, che funzionano esclusivamente per riflessione interna totale, è la loro elevata efficienza.

Per quanto riguarda i problemi di realizzazione, il processo di stampaggio a iniezione pone il problema di assicurare che gli spessori del componente siano il più uniformi possibile, per evitare i "segni di stampaggio", che si verificano quando il componente si raffredda, e che possono compromettere la trasmissione dei raggi luminosi. A differenza dei collimatori comuni, le lenti intermedie sono rimpiazzate in questo caso da ottiche Fresnel di spessore ridotto per semplificare il processo di stampaggio (Fig. 2.19). Per consentire un processo di stampaggio a iniezione ordinario e conseguentemente uno spessore del componente relativamente uniforme anche per questo collimatore, è stata sviluppata una variante speciale che utilizza una doppia riflessione interna totale (Fig. 2.19). Questo principio permette inoltre una canalizzazione della luce più efficiente per angoli molto stretti, ottenibili con una combinazione di riflettori e lenti.

Ciononostante, la distribuzione a fascio molto stretto rappresenta comunque un problema notevole: secondo la legge di conservazione delle ottiche geometriche, è necessaria una superficie di emissione relativamente larga a fronte di una superficie luminosa molto piccola dei chip LED.

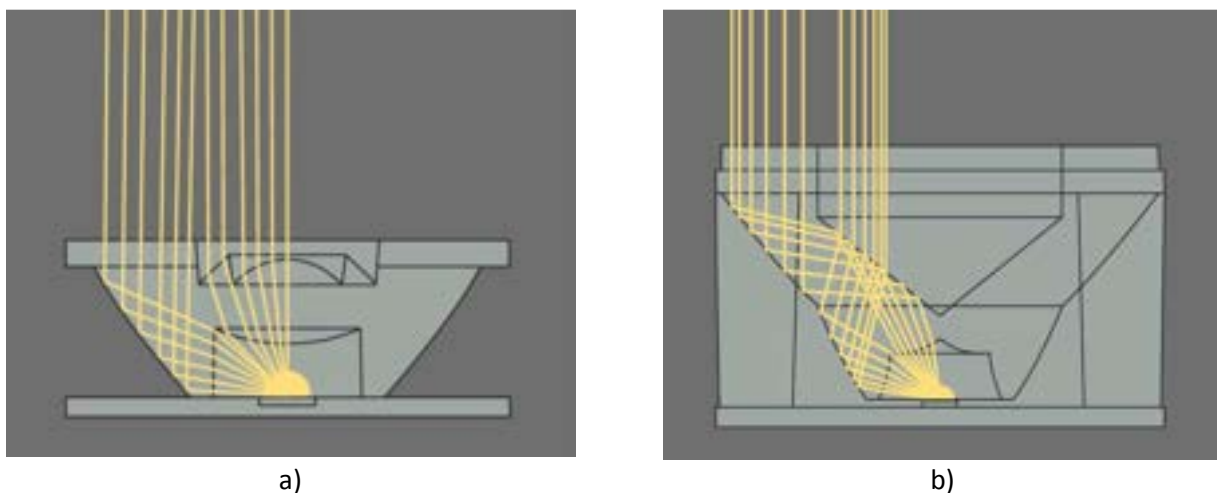


Figura 2.19.

- a) Per consentire un processo di stampaggio a iniezione per il collimatore, la lente nel mezzo è sostituita da una lente Fresnel sottile.
- b) L'effetto del collimatore per la produzione di un fascio stretto di raggi paralleli è basato sul principio ottico della riflessione interna totale e della doppia riflessione interna totale. Ciò contribuisce all'elevata efficienza del sistema fotometrico.

La distribuzione finale della luce in ambiente è determinata dalle lenti Spherolit (Fig. 2.20): le lenti terziarie con simmetria assiale possono produrre fasci ovali, consentendo a sculture allungate o a tavoli di essere illuminati solo con un apparecchio, mentre lenti asimmetriche possono essere

utilizzate con funzione di wall-washing. In entrambi i casi, i fasci luminosi generati sono particolarmente uniformi e hanno margini sfumati.

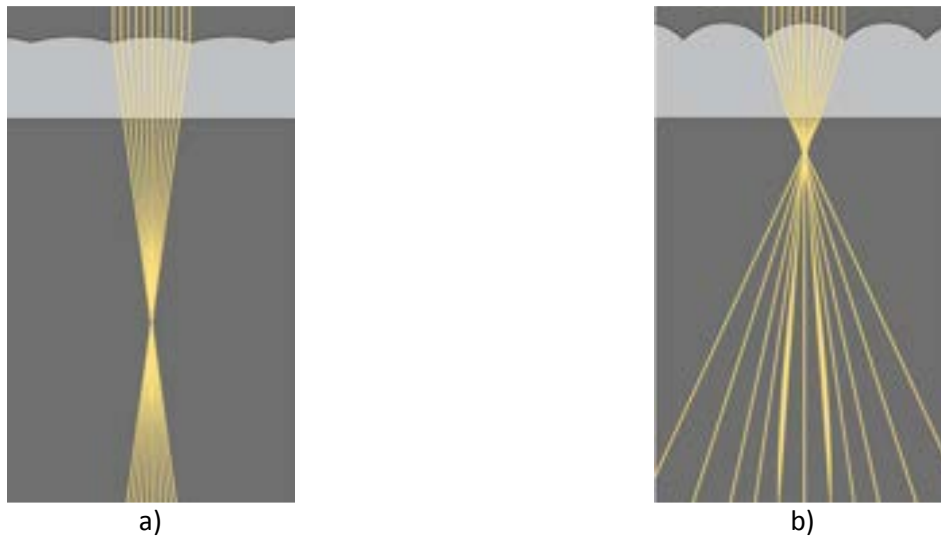


Figura 2.20.

- a) L'ottica Spherolit Spot ha degli sferoliti piatti e quindi produce poca dispersione di un fascio molto stretto.
- b) L'ottica Spherolit "wide flood" produce una dispersione molto maggiore perché gli sferoliti sono molto più accentuati.

Dal punto di vista dell'efficienza, mentre le lampade tradizionali (alogene a bassa tensione o a scarica ad alta pressione) hanno un angolo di emissione pari a  $360^\circ$ , i LED hanno un angolo minore di  $180^\circ$ , per cui le perdite dovute alla luce che non raggiunge il target nel secondo caso sono minimizzate. Inoltre, poiché la trasmissione tramite lenti è più efficiente rispetto alla riflessione attraverso riflettori, l'uso di queste ultime contribuisce ad avere una superiore efficienza luminosa dell'apparecchio. Quindi, i washer LED con lenti Spherolit hanno una light output ratio (LOR) di circa l'80%, pari al doppio di quella con lampade tradizionali e apparecchi con riflettori, mentre l'efficienza luminosa è di  $70\text{lm/W}$  rispetto ai  $50\text{lm/W}$  dei sistemi tradizionali con riflettore.

Sul sito della Erco sono stati messi a disposizione i dati fotometrici e le geometrie 3d relativi a tutte le combinazioni di lenti per questi apparecchi.



## Capitolo 3

### Driver LED, durata di vita e affidabilità

*La durata di vita di un apparecchio LED non è legata solamente ai diodi, ma anche ai circuiti di controllo, all'alimentazione e ai componenti ottici e meccanici.*

*Più in particolare, l'affidabilità di un sistema SSL è uguale all'affidabilità del suo componente più debole, per cui il progettista di apparecchi LED deve avere una visione ampia del problema, selezionando rigorosamente le componenti e applicando rigide regole di progettazione.*

## I driver LED

La grande promessa dell'illuminazione LED viene dalle tre E: Economia, cioè risparmio, Ergonomia, cioè migliore performance, ed Efficienza, cioè riduzione del consumo energetico.

*Economia.* Si suppone che l'illuminazione LED sia più economica delle tecnologie concorrenti. Questi risparmi provengono da differenti aree, prima tra tutte la durata dell'illuminazione. I LED hanno una durata di vita stimata tra 35000 e 50000 ore, o più. Ciò significa che possono passare anni prima che un apparecchio necessiti di essere sostituito. Storicamente, i driver sono stati sempre considerati l'anello debole nella catena dell'affidabilità dei LED, in quanto includono condensatori elettrolitici (E-caps) che a lungo andare si seccano. ciononostante, molti produttori assicurano che tali condensatori hanno la medesima durata dei diodi: per fare in modo che sia così, è necessario progettare il driver in modo tale che riesca a portare via il calore dal condensatore di modo che funzioni a temperature minori e quindi duri di più.

*Ergonomia.* L'illuminazione LED dovrebbe essere in grado di combinare performance, piacevolezza e comfort. I LED offrono la possibilità di essere regolati, consumando in proporzione meno energia e aumentando così la durata di vita. Questo elemento è in contrasto con le altre tecnologie come le lampade fluorescenti, che non sono comunemente dimmerabili. Possono inoltre essere realizzati in tutte le temperature di colore, ed è inoltre possibile mescolare i colori dei diversi diodi. Il grande potenziale dei LED in questo caso può essere capitalizzato solo con un driver atto allo scopo. I drivers devono essere progettati per rispondere a tutte queste richieste.

*Efficienza.* Probabilmente il motivo principale del clamore suscitato negli ultimi anni dai LED è legato alla riduzione decisamente significativa dei consumi energetici grazie alla capacità superiore, rispetto alle sorgenti tradizionali, di convertire in luce la potenza elettrica assorbita.

A mano a mano che il mercato dei LED diventa più solido e strutturato, la capacità e l'affidabilità dei sistemi illuminanti dipende sempre meno dai diodi e sempre più dai driver, che si stanno differenziando per affidabilità, durata, controllabilità e prestazioni, e sta acquisendo sempre maggiore importanza. Poiché il driver si trova tra i sistemi di controllo e i motori luminosi, esso costituisce l'intermediario fondamentale tra le aspettative degli utenti e la loro percezione del prodotto.

Il light engine (Fig. 3.1), cioè l'insieme dei diodi, del loro supporto e del loro circuito elettrico di collegamento fornisce la luce; i driver collegano l'immissione di luce in ambiente agli elementi di controllo (interruttori, dimmer, sensori e ponti elettrici) e rendono i LED in grado di rispondere alle aspettative degli utenti. Sono ormai diventati abbastanza affidabili e robusti da non rappresentare più l'elemento debole all'interno degli apparecchi LED. Guardando al futuro, soluzioni ottimizzate che incorporano driver LED in combinazione con moduli LED da un lato e con sistemi di controllo dell'illuminazione dall'altro, diventeranno sempre più i principali elementi su cui si focalizzerà l'attenzione dei produttori.

Gli alimentatori LED, anche detti drivers, sono una parte fondamentale dell'apparecchio LED. Nella maggior parte delle applicazioni, il driver è un alimentatore che converte la corrente alternata in

continua, una tecnologia molto conosciuta, utilizzata anche per televisori, caldaie, forni a microonde, apparecchi alogeni a basso voltaggio, il cui punto debole è costituito dai capacitori elettrolitici, od optocoppie. I driver più resistenti possono arrivare a fornire centinaia di migliaia di ore di funzionamento affidabile e continuo. I driver svolgono un ruolo fondamentale nel determinare la quantità di corrente che attraversa i diodi, se e come è possibile dimmerarli, se è possibile aggiungere sistemi di controllo e sensori, e per conoscere il grado di resistenza dell'apparecchio e dove può essere collocato. Infine, se affidabili e durevoli, i driver possono dare valore all'insieme delle componenti di un sistema LED.

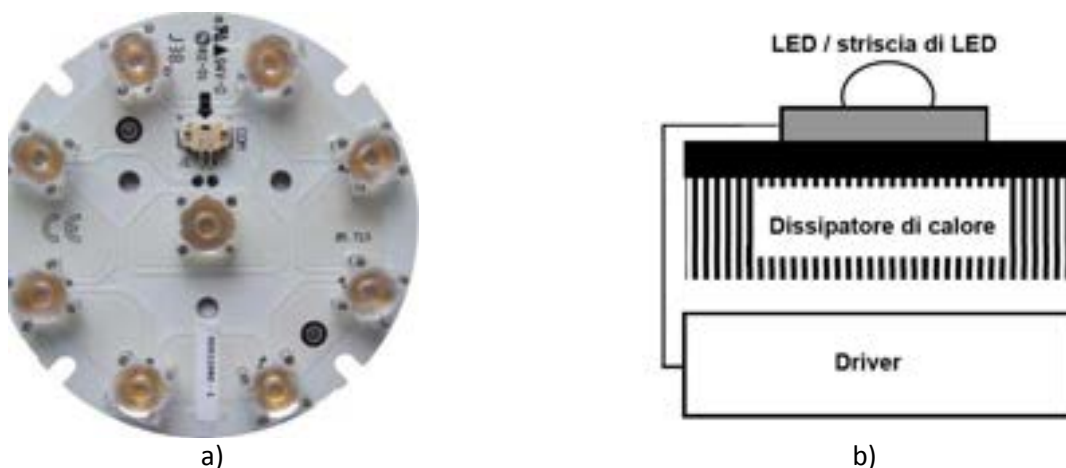


Figura 3.1.  
a) esempio di engine LED della Future Lighting Solutions.  
b) schema di un engine LED.

### Durata di vita e affidabilità di un apparecchio LED

La crescente preoccupazione per l'ambiente ha portato alla decisione di dismettere gradualmente le lampade a incandescenza a favore delle lampade fluorescenti compatte (CFL), il cui contenuto di mercurio ha suscitato motivate preoccupazioni, per cui più recentemente si è deciso di puntare su sorgenti che consentano un risparmio energetico maggiore (i LED consumano approssimativamente fino all'80% in meno delle lampade incandescenti) e non contengano materiali tossici. L'introduzione dell'elettronica all'interno dell'illuminazione generale, però, crea nuove cause e modalità di rottura che devono essere comprese e, dove possibile, prevenute: in particolare, la domanda principale è se tale componentistica elettronica sia o no all'altezza delle aspettative di vita dei diodi SSL. Realizzare un apparecchio SSL affidabile implica più di un'accurata selezione dei LED e progettazione del *light engine*: richiede la medesima attenzione alle altre componenti nel sistema.

La durata di vita e l'affidabilità di un prodotto, seppur espresse entrambe in ore, sono concetti molto diversi, anche se strettamente legati. La durata di vita si riferisce all'intervallo di tempo in cui l'utente si può aspettare che un singolo prodotto funzioni in modo adeguato prima che un meccanismo di rottura noto provochi la messa fuori uso dell'apparecchio. L'affidabilità è invece

legata al tasso di rottura per eventi casuali e non prevedibili di una popolazione di prodotti, e può essere espresso come tasso di rottura nel tempo (*Failures In Time*, FIT) o come l'inverso, cioè il tempo medio intercorso tra rotture (*Mean Time Between Failures*, MTBF).

L'affidabilità è quindi associata al tasso di rottura di una popolazione di prodotti operanti all'interno delle loro condizioni ottimali e della loro durata utile di vita. Quando si determina l'affidabilità di un prodotto, è necessario conoscere il tasso di rottura di ogni componente che può causare la rottura del prodotto, e calcolare i tassi di rottura combinata.

Il tempo medio tra rotture (*Mean Time Between Failures*, MTBF), che è legato all'affidabilità del prodotto, esprime invece il rapporto tra le ore globali di funzionamento di una certa popolazione di LED e il numero di rotture che avvengono in tale intervallo di tempo. L'equazione può essere scritta nel seguente modo:

$$MTBF = \frac{\text{tempo totale}}{\text{rotture}}$$

Ad esempio, una popolazione di 1000 prodotti che funzionano ininterrottamente avrà 24000 ore di funzionamento al giorno. Se questa popolazione di prodotti rimane in funzione per un mese e si verificano 4 rotture, allora

$$MTBF = 1000 \text{ unità} \times 24 \text{ ore} \times 30 \text{ giorni} / 4 \text{ rotture} = 180000 \text{ ore}$$

Quindi se un prodotto ha una MTBF di 300000 ore allora una popolazione di 1000 esemplari avrà una rottura in media ogni 300 ore, mentre una popolazione di 10000 prodotti ne avrà una ogni 30 ore. In sintesi, se un prodotto ha una MTBF di 300000 ore.

D'altra parte, e ancora come esempio, una durata di vita di 50000 ore significa dunque che ogni prodotto dura fino a 50000 ore prima di rompersi, mentre un MTBF di 50000 ore significa che per una popolazione di 1000 unità, ci si aspetta una rottura random ogni 50 ore. Entrambi i concetti sono di fondamentale importanza e necessari per una implementazione proficua dell'illuminazione a LED.

L'equazione con cui si è definita MTBF mostra che il tasso di rottura è semplicemente l'inverso dell'MTBF (come peraltro già precedentemente definito); poiché il risultato può essere piuttosto piccolo, si è soliti moltiplicarlo per  $10^6$ , ottenendo il numero di rotture nel tempo (*Failures In Time*, FIT):

$$FIT = \frac{1}{MTBF}$$

La stima della durata di vita di un qualsiasi prodotto si basa sull'identificazione di tutti i meccanismi di rottura noti e del componente dalla durata di vita minore all'interno dell'apparecchio che lo metterà fuori uso. Per la maggior parte degli alimentatori elettronici, inclusi i driver LED, tale componente è il condensatore elettrolitico. Gli elettroliti nel condensatore si consumano nel tempo in funzione della temperatura di funzionamento del condensatore. Tale temperatura è funzione della temperatura dell'involucro e del calore interno causato dalla corrente di ripple (che è un residuo di variazione periodica della corrente continua in uscita da un trasformatore alimentato a corrente alternata) all'interno del condensatore. L'equazione generalmente adottata per la stima di vita di un condensatore elettrolitico è la seguente:

$$L_x = k * L_0 * 2^{\frac{T_s - T_a}{10}}$$

dove

$L_x$  = durata di vita

$k$  = fattore determinato dalla corrente di ripple

$L_0$  = durata di vita stimata sulla base delle condizioni standard fornite nel datasheet

$T_s$  = temperatura stimata dell'involucro

$T_a$  = temperatura di funzionamento dell'involucro

Per ottenere una elevata durata di vita, l'aspetto più importante consiste quindi nel selezionare un condensatore di ottima qualità e lunga durata; successivamente, si dovrebbe ridurre la corrente di ripple del condensatore e il relativo voltaggio di funzionamento. D'altra parte, condensatori con caratteristiche particolarmente di qualità comportano sovradimensionamenti e sovracosti.

L'ultimo e più importante elemento di controllo consiste nel diminuire la temperatura di involucro del condensatore. La temperatura del condensatore è funzione della temperatura di funzionamento del driver, dell'abilità dello stesso di trasferire calore all'ambiente, e della quantità di corrente dissipata al suo interno. Il contributo primario alla temperatura sarà fornito dalla corrente dissipata nel driver, funzione dell'efficienza del driver stesso. Elevate efficienze e bassa resistenza termica possono migliorare sensibilmente la durata di vita di un driver (Fig. 3.2). L'efficienza ha un impatto molto importante: farla scendere dal 95% all'85% provoca un aumento del calore di 3,3 volte. Poiché le efficienze dei condensatori possono essere anche molto diverse, la temperatura all'interno dell'involucro può essere fortemente variabile. Come mostrato dall'equazione, una riduzione della temperatura di 10°C raddoppia la durata di vita del condensatore; senza una buona dissipazione del calore, però, anche una minima dissipazione di corrente può provocare temperature elevate, e quindi un aumento del rischio di rottura.

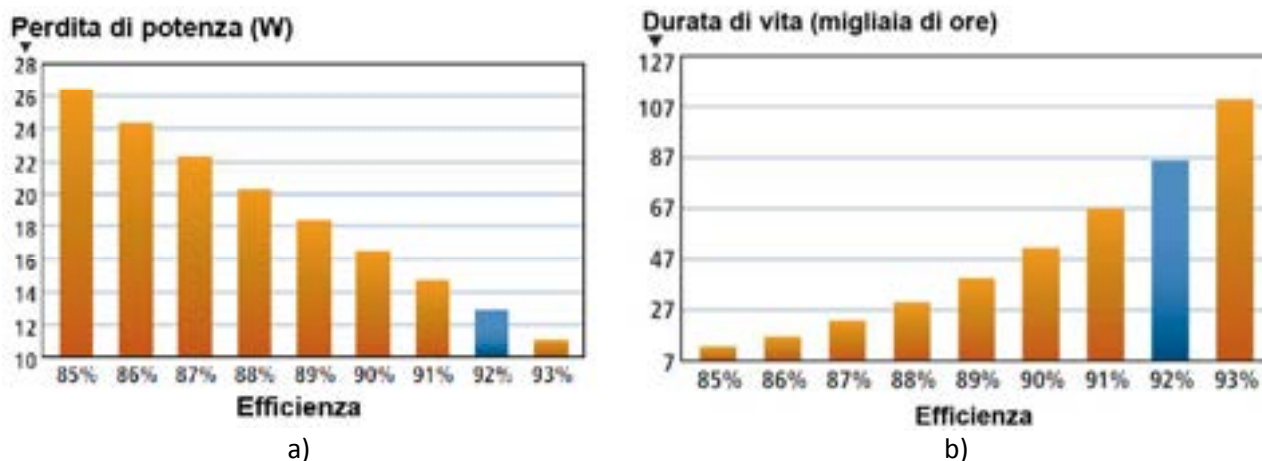


Figura 3.2. Driver LED.

- a) Rapporto tra perdita di potenza ed efficienza in un driver da 150W.
- b) Rapporto tra durata di vita ed efficienza in un driver da 150W.

Molto tempo è stato dedicato alla ricerca di un metodo per la valutazione dell'affidabilità della componentistica elettronica. I metodi più comuni in questo campo sono quelli del MIL-HDBK-217, una specifica militare considerata il metodo standard di affidabilità e previsione; un altro metodo sufficientemente diffuso è il Telecordia SR-332. Tipicamente il primo approccio è più conservativo e produce valori inferiori rispetto al metodo commerciale.

L'attuale sfida delle aziende produttrici in questo ambito consiste nel produrre il sistema più affidabile entro determinati limiti di dimensione e costo. L'affidabilità di un semiconduttore è solitamente dipendente dalla temperatura di giunzione. La Fig. 3.3 mostra l'andamento delle rotture nel tempo. La maggior parte dei prodotti elettronici mostra un tasso di rottura iniziale molto elevato, a cui ci si riferisce col nome di "mortalità infantile"; il prodotto entra poi nella sua vita utile, la parte piatta della curva, fino al periodo conclusivo, in cui il tasso di rottura aumenta nuovamente.

L'obiettivo dei produttori è quello di assicurare che i prodotti destinati alla rottura prematura non vengano messi in commercio.

In sintesi, comprendere le variabili da cui dipendono la durata di vita e l'affidabilità è aspetto fondamentale per progettare un prodotto affidabile il cui comportamento sia prevedibile. Questo è vero in particolare per i LED, dove il payback period è misurato in anni, dove le garanzie di lunga durata sono una necessità del business, e dove una riduzione dei costi di manutenzione costituisce una porzione significativa del ritorno dell'investimento.

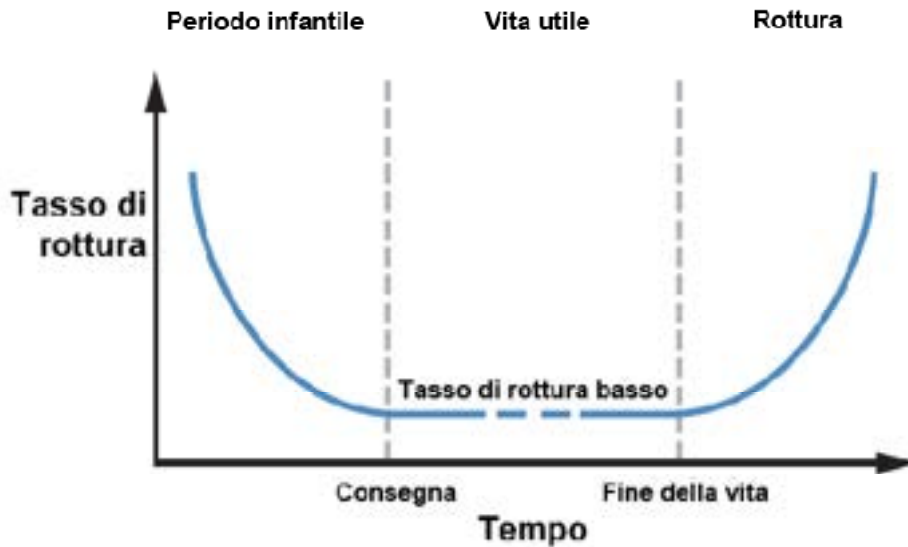


Figura 3.3. Curva che rappresenta il tasso di rottura dei LED nel tempo.

### Valutazione del decadimento del flusso luminoso nel tempo

All'inizio dell'evoluzione dei LED, la durata di vita stimata era di 100000 ore, ma nessuno era in grado di spiegare cosa ci fosse realmente dietro questo valore. Philips Lumides, con i LED Luxeon, è stato il primo produttore LED a introdurre una valutazione sul decadimento del flusso luminoso. I primi Luxeon avevano una vita stimata "L70" di 50000 ore, ad una corrente di 350mA e una temperatura di giunzione di 90°C: questa dicitura significa che, in queste condizioni operative, per 50000 ore di funzionamento è garantito un flusso luminoso maggiore del 70% del flusso luminoso nominale. Nel 2003 la Lumileds ha pubblicato il primo documento (Datasheet di affidabilità RD25) approfondito sull'argomento, evidenziando i fattori chiave che influenzano la performance dei LED sul lungo periodo, come ad esempio la temperatura di giunzione e la corrente in ingresso, e stabilendo valori realistici per i propri dispositivi. A seguire, altri produttori di LED si sono orientati verso stime di durata di vita approssimativamente intorno alle 50000 ore di funzionamento, anche se pochi hanno associato a queste previsioni le specifiche sulle relative condizioni standard di funzionamento in prova.

Nel 2007, la Lumileds ha proposto un nuovo set grafico di dati, conosciuto come grafico "Bxx, Ly" (Fig. 3.4), in cui xx rappresenta la percentuale di una popolazione di LED soggetta a decadimento, o per riduzione del flusso al di sotto di una percentuale rappresentata da yy oppure per completa rottura. Ad esempio, un valore di "50000 ore B50 L70" significa che statisticamente il 50% di una popolazione di LED raggiungerà un punto in cui si conserva meno del 70% del flusso luminoso iniziale dopo 50000 ore di funzionamento. Future Lighting Solutions ha poi introdotto il "LED Reliability tool" ([www.futurelightingsolutions.com/lrt](http://www.futurelightingsolutions.com/lrt)), che produce grafici Bxx, L70 per tutti i tipi di Lumileds e per tutte le condizioni di funzionamento.

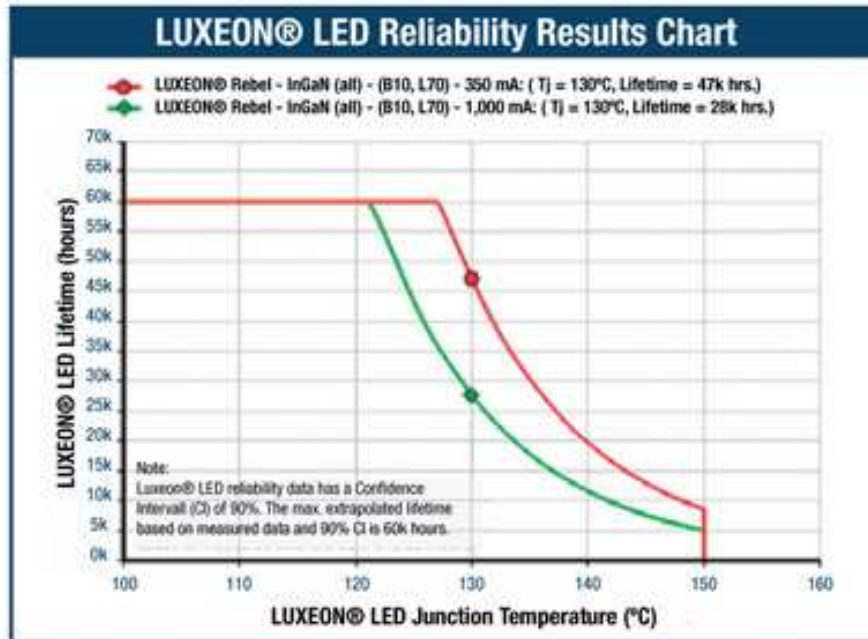


Figura 3.4. Diagramma BXX LYY per un LED Luxeon Rebel.

Spesso, si valuta l'affidabilità dei LED esclusivamente in relazione al decadimento del flusso luminoso. In realtà, i LED hanno altre modalità di "non funzionamento": la rottura improvvisa e il viraggio del colore nel tempo sono due dei fenomeni osservati nelle popolazioni di LED; ma il LED è solo uno dei molti componenti del sistema di illuminazione, e ognuno di questi componenti può causare malfunzionamento o rottura dell'intero sistema.

I grafici "Bxx,Lyy" della Philips Lumileds tengono conto di tutti i tipi di rottura dei LED, ma non permettono all'utente di distinguere il tasso di rottura improvvisa dal tasso di decadimento del flusso.

Poiché i LED si basano su un principio di funzionamento diverso dalle lampade a incandescenza, è in effetti un luogo comune considerare i LED non soggetti a rottura improvvisa: in realtà ciò succede, anche se raramente. E tale aspetto dovrebbe essere previsto in fase progettuale come calcolo del tasso di rottura improvvisa dei LED, a seconda delle condizioni di progetto e l'impiego di tecniche FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), per stabilire l'impatto di tale rottura sulla performance globale dell'intero sistema.

Se l'apparecchio utilizza un singolo LED come sorgente, l'analisi è semplice: una rottura completa del LED significa una rottura di tutto il sistema. Diverso è il caso più comune, cioè quello in cui ci sono più diodi all'interno di uno stesso apparecchio, e la rottura del singolo LED causa una diminuzione del flusso luminoso emesso di una quantità fissa.

I sistemi d'illuminazione dovrebbero essere equipaggiati in modo da compensare rotture improvvise. Innanzitutto, il sistema di ottiche dovrebbe risultare ridondante, in modo che se un LED si dovesse rompere, la conformazione del solido fotometrico non risulti molto modificata, e il



solo impatto sia una piccola perdita percentuale del flusso luminoso emesso. In secondo luogo, la rottura di un singolo LED non deve causare una rottura completa di tutto il sistema, per cui è fondamentale conoscere le modalità di rottura dei LED (circuito aperto o corto circuito) per selezionare la tipologia di collegamento più appropriata: in alcuni casi possono essere necessari circuiti aperti aggiuntivi che bypassano i componenti (Fig. 3.5). Infine, combinare i dati sui tassi di decadimento del flusso e di rottura improvvisa permette di prevedere l'impatto dell'affidabilità dei LED sulla vita economica dell'apparecchio.

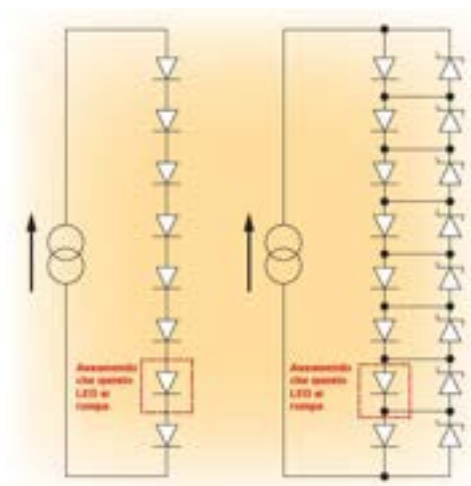


Figura 3.5. In una striscia di LED connessi in serie (sinistra), quando un singolo diodo va in corto circuito, il resto dei LED rimangono accesi e la corrente rimane stabile. Tuttavia, se un LED va in circuito aperto, tutti i LED si spengono, a meno che la striscia non sia protetta da componenti aggiuntivi. Tale protezione, ottenuta ad esempio utilizzando un diodo zener in parallelo con ogni LED (destra), aggiunge costo e complessità.

Un'altra potenziale modalità di rottura dei power LED è lo spostamento delle coordinate cromatiche nel tempo, anche se questo fenomeno è considerato critico solo per alcune applicazioni. Per i LED bianchi, la deviazione assoluta ( $\Delta u'v'$ ) nel tempo rispetto all'illuminante di riferimento dovrebbe essere idealmente caratterizzata per varie correnti e temperature di funzionamento. Lo standard LM80 (report ENEA 2010), mostra la deviazione cromatica relativa, cioè quanto il colore di un singolo diodo si sposta nel tempo dal suo colore originario.

Anche fattori esterni, come gli stress chimici, elettrici o meccanici, o come la contaminazione chimica, possono causare rotture premature.

La temperatura di funzionamento e la corrente di ingresso alla giunzione sono fattori di accelerazione nella degradazione di un LED: è di fondamentale importanza dunque la scelta valori della corrente in ingresso e di meccanismi di smaltimento del calore in modo da ottimizzare il sistema in termini di costi, dimensioni e performance.

Lo stress termico si verifica quando l'involucro dei LED o la temperatura di giunzione superano i valori massimi riportati nelle specifiche tecniche del produttore. Generalmente la causa risiede in

una cattiva progettazione dal punto di vista termico, un cattivo assemblaggio del prodotto o un mancato controllo delle condizioni di funzionamento.

Lo stress elettrico si verifica quando la corrente e/o il voltaggio applicati ai LED sono al di là dei valori massimi. Insufficiente protezione elettrica, errata topologia del circuito o errori nei collegamenti sono le cause più comuni.

Lo stress meccanico può verificarsi a causa della differenza tra la dilatazione termica tra la PCB (*Printed Circuit Board*) e i componenti dell'involucro, e può provocare la rottura delle saldature in cicli termici ripetitivi come quelli dell'illuminazione di esterni.

La compatibilità chimica rimane un vasto campo, ancora oggi tutto da esplorare. La maggior parte degli involucri LED utilizza incapsulanti siliconici, permeabili al gas. Le sostanze organiche volatili contenute negli adesivi, nei gas di saldatura, ecc, possono permeare la struttura e ossidarla, limitando la trasparenza del sistema ottico; la reazione può essere catalizzata poi dal calore o dalla luce. L'alterazione è solitamente reversibile, se l'esposizione a tali sostanze è eliminata.

### **Alimentatori LED: funzioni, requisiti e progettazione**

I LED ad elevata luminosità (*high brightness*, HB) offrono una durata di vita estremamente lunga se confrontata con altre forme di illuminazione: ciò rende questo tipo di LED molto appetibili per applicazioni dove la manutenzione è difficile e costosa, come nell'illuminazione stradale, di tunnel, di zone ad altezze elevate (*high-bay*) e per segnaletica in ambienti aperti. Una differenza fondamentale tra l'illuminazione LED e la maggior parte delle tecnologie precedenti è la necessità di alimentare gli HB-LED con un alimentatore a corrente continua ben controllato e a basso voltaggio. Per sfruttare al meglio il potenziale dei LED, l'alimentatore deve essere progettato per avere un'alta affidabilità e una lunga durata di vita, idealmente più lunga di quella dei LED stessi.

L'alimentatore LED è un assemblato estremamente complesso. Contiene tra i 200 ed i 300 componenti realizzati con tecnologie diverse e provenienti da diversi fornitori. Un alimentatore tipicamente serve 50 LED, il che significa che l'80-85% dei componenti elettronici all'interno di un apparecchio di illuminazione si trovano all'interno dell'alimentatore; molte rotture di apparecchi illuminanti sono causate da rotture dell'alimentatore.

Oltre alla complessità, l'assemblaggio dell'alimentatore implica una gran quantità di processi di produzione: alcuni di questi passaggi richiedono procedure manuali intrinsecamente più soggette ad errore e con maggiore variabilità rispetto ai processi automatizzati.

Al contrario, la produzione LED è completamente automatizzata e molto rigidamente controllata e l'assemblaggio dei LED su un *light engine* è anch'esso un processo molto controllato. Tutti i LED all'interno di un apparecchio provengono solitamente dal medesimo produttore di modo che il loro comportamento sia molto prevedibile, e sono alimentati con una corrente DC attentamente regolata.

Praticamente ogni scheda tecnica di alimentatore include un valore sull'affidabilità, l'MTBF, espresso in ore, che però ha delle limitazioni: innanzitutto il valore di tale parametro può essere confrontabile per diversi sistemi solo quando calcolato nello stesso modo e con la stessa temperatura ambiente; in secondo luogo, l'MTBF calcolato non prende in considerazione molti dei fattori che determinano l'affidabilità dell'alimentatore in condizioni reali, come il materiale PCB e il layout, i punti deboli della progettazione e della verifica, la qualità del processo di produzione. La previsione MTBF può fornire al massimo una sommaria indicazione sul tasso di rottura atteso, mentre l'affidabilità reale è in larga parte determinata dall'accuratezza della progettazione e della realizzazione.

Realizzare un prodotto che abbia un'elevata affidabilità coinvolge tutti gli aspetti della progettazione, dalla specifica iniziale e i calcoli di progetto, fino all'assemblaggio finale e alle procedure di verifica sperimentale.

Per assicurare un funzionamento affidabile e una lunga durata di vita, i livelli di stress reali devono essere al di sotto dei valori massimi forniti dal produttore, procedura nota come "derating", letteralmente "declassamento", termine che indica la riduzione del voltaggio di funzionamento reale rispetto a quello teorico. Durante la progettazione gli stress attesi sui componenti sono determinati sulla base di calcoli e simulazioni. I livelli di stress devono inoltre essere misurati allo stadio di prototipo per confermare i calcoli in tutte le condizioni, comprese le condizioni estreme di funzionamento previste nella scheda tecnica.

L'applicazione del *derating* al componente è uno degli aspetti più importanti per il raggiungimento di un'elevata affidabilità: non è sufficiente applicarlo al carico dell'intero alimentatore, in quanto declassare il carico al 75% o al 50% riduce l'aumento di temperatura interna, ma non ha effetto sullo stress relativo al voltaggio applicato ai singoli componenti interni. Esiste naturalmente un costo aggiuntivo associato all'applicazione del derating, giustificato per la progettazione delle sorgenti LED: esso è dovuto sia all'allungamento dei tempi dedicati alla progettazione sia alla necessità di impiegare componenti di qualità superiore.

Ai fini dell'affidabilità, la conformazione del PCB (*Printed Circuit Board*) va analizzata attentamente, perché è uno dei componenti più importanti nell'alimentatore. Normalmente realizzato in fibra di vetro stratificato (FR4), esso può essere utilizzabile da un solo lato oppure da entrambi. Un PCB utilizzabile da un lato solo può portare a rotture delle giunzioni con componenti TH (*through-hole*) specialmente in caso di shock o vibrazioni, perché non c'è un rivestimento di rame all'interno dei fori. Ciò è particolarmente vero per componenti grandi e pesanti, come i trasformatori e i capacitori elettrolitici. Per gli alimentatori LED con elevata affidabilità, dovrebbe essere considerato l'impiego di PCB utilizzabili da entrambi i lati (FR4PCB).

L'organizzazione del PCB è un altro elemento critico per la determinazione dell'affidabilità del driver. La precisione delle tracce di supporto è essenziale per realizzare saldature affidabili dei componenti LED di tipo SMT (*Surface Mounted Device*): se lo spazio tra le tracce non è sufficiente, infatti, c'è la possibilità di un cortocircuito, specialmente se il PCB presenta incisioni, contaminazioni, o eccessive saldature durante l'assemblaggio. La dimensione complessiva

dell'alimentatore stringendo i componenti all'interno non può essere ridotta eccessivamente, in quanto spesso porta a una rottura prematura del componente.

La temperatura di tutti i componenti deve essere al di sotto dei valori forniti dal produttore per le condizioni peggiori. Software di analisi termica possono essere utilizzati durante le fasi preliminari della progettazione per prevedere aumenti di temperatura prima ancora di costruire prototipi.

Una volta pronti i primi prototipi, devono essere controllate le temperature di tutti i componenti per una serie di voltaggi di input e di carichi utilizzando termocoppie sui componenti fondamentali. Molti alimentatori LED utilizzano terre rare che influiscono significativamente sulla performance termica. Da un lato, la maggior parte dei componenti con terre rare ha una buona conducibilità termica e riduce le temperature interne di picco. Dall'altro, la temperatura dei componenti passivi come i condensatori può risultare aumentata perché il calore si diffonde più uniformemente all'interno dell'alimentatore.

L'input AC di un alimentatore è esposto al mondo esterno, e ogni picco di voltaggio sulla linea è replicato esattamente nei componenti di input. Il filtro EMI fornisce una certa protezione, ma è necessaria una protezione ulteriore per picchi di energia e sbalzi più alti. Nelle applicazioni più delicate, è necessaria una progettazione che preveda protezioni in più fasi: un dispositivo di protezione primaria assorbe la maggior parte dell'energia, e dei dispositivi di protezione secondaria riducono l'energia residua ad un livello di sicurezza. Per l'illuminazione LED d'esterni, un approccio efficace può essere quello di montare il dispositivo di protezione primaria all'interno dell'apparecchio nei pressi dell'ingresso AC e i componenti di protezione secondaria all'interno dell'alimentatore.

I condensatori elettrolitici (E-cap) sono utilizzati praticamente in tutti gli alimentatori con due funzioni principali. Un E-cap è utilizzato nel circuito di correzione del fattore di potenza (*power-factor correction*, PFC) per accumulare energia durante la porzione bassa del ciclo AC di alimentazione. Un secondo E-cap è utilizzato nel filtro di output del PSU (*power supply unit*) (Fig. 3.6). Entrambi questi condensatori sono critici per il funzionamento del PSU e una rottura di uno dei due porta a una rottura del PSU.

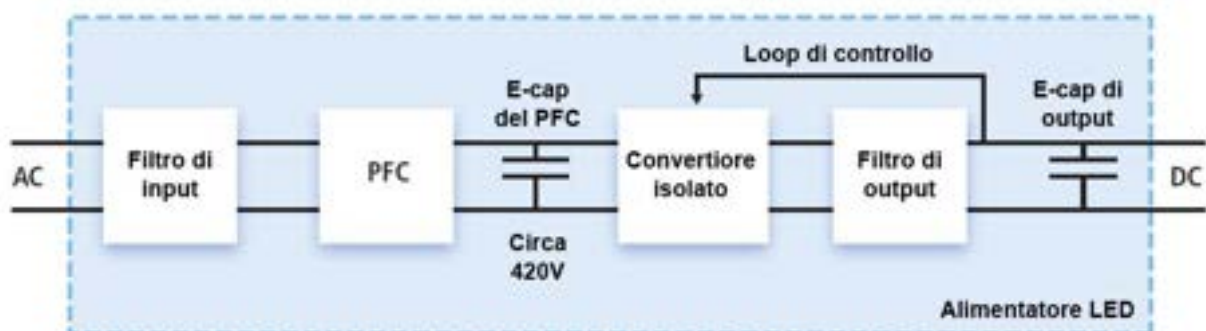


Figura 3.6. I condensatori elettrolitici (E-caps) sono utilizzati quasi in tutti gli alimentatori con input AC, dove svolgono due funzioni principali, cioè all'interno del circuito PFC e nel filtro di output.

I condensatori elettrolitici sono disponibili in moltissimi modelli con differenti durate di vita e temperature di funzionamento. Esistono condensatori di buona qualità progettati per una durata di vita elevata e una buona gestione di calore. I condensatori elettrolitici di bassa qualità sono invece più economici, ma non rispondono alle esigenze di durata di vita dell'illuminazione a LED. La temperatura di funzionamento degli E-cap dipende da molti fattori, inclusa la potenza del PSU e l'efficienza, la corrente di ripple, la disposizione interna degli elementi e l'involucro entro cui sono contenuti. Considerando una temperatura di circa 70°C nel condensatore (35°C in più rispetto all'ambiente), ci si può aspettare una durata di vita di circa 13 anni (fig. 3.7a) per un componente di alta qualità costruito per durare 10000 ore a 105°C; un condensatore di qualità inferiore di durata 5000 ore a 85°C sarà caratterizzato da una durata di vita di meno di due anni.

La soluzione definitiva al problema del progressivo asciugamento del condensatore elettrolitico consiste nell'evitare di utilizzarlo. La AEG ha sviluppato un alimentatore (Fig. 3.8) che ha le stesse funzionalità di quello di Fig. 3.6, e in cui i condensatori elettrolitici sono sostituiti da condensatori a film di polipropilene, che non hanno meccanismi noti di rottura a breve termine. Come mostrato in Fig. 3.7b, la vita stimata di tali condensatori a film al 70% del voltaggio massimo è di circa 160 anni a 70°C: una durata di vita in pratica illimitata.

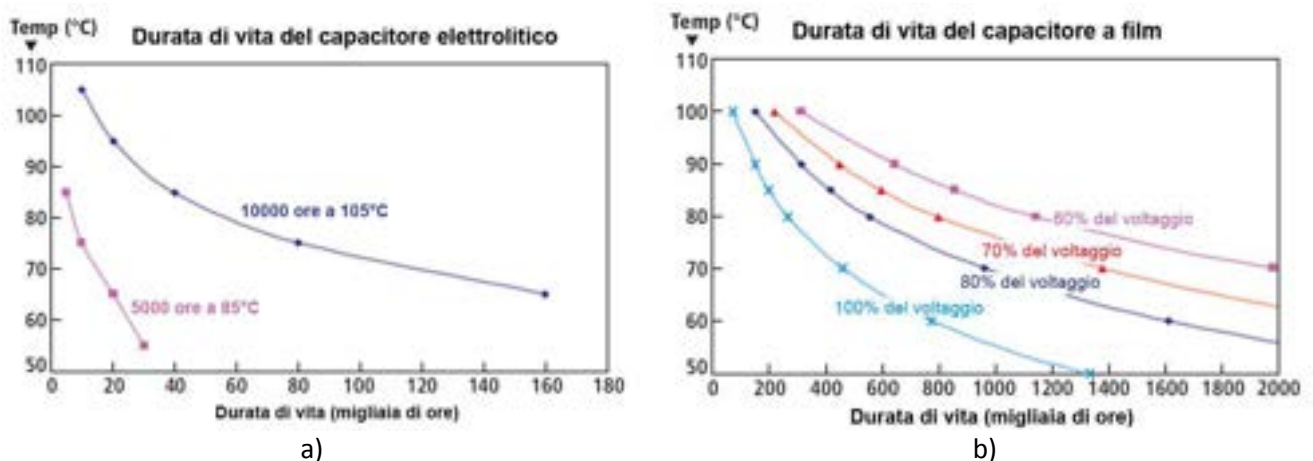


Figura 3.7.

a) durata di vita del condensatore elettrolitico (E-cap) in rapporto alla temperatura. Gli E-cap di qualità superiore valutati per 10000 ore di funzionamento a 105°C hanno una durata di vita di circa 13 anni a 70°C, mentre gli E-cap di qualità minore avranno una durata di vita minore di 2 anni a 70°C.

b) durata di vita del film in polipropilene in rapporto alla temperatura.

In questi driver privi di condensatori elettrolitici vengono utilizzate tre tecniche di protezione: *conformal coating*, involucro a tenuta stagna e *potting*, ognuno dei quali offre vantaggi e svantaggi, per cui è importante scegliere la soluzione migliore per una data applicazione.

Il *conformal coating* è una colata di colla che ricopre tutto il circuito: esso fornisce una protezione eccellente contro l'umidità e la polvere ed è una soluzione a basso costo per le applicazioni in esterni, dove l'apparecchio ha bisogno di una buona protezione dall'acqua. Non comporta un

aumento significativo nel peso, ma non è adeguato a proteggere da ambienti umidi o posizioni a contatto diretto con l'acqua.

In questi casi è necessario l'uso di un involucro stagno che, per gli alimentatori LED, è solitamente un estruso in alluminio in forma di tubo a sezione rettangolare con le estremità chiuse con guarnizioni e sigilli. Un tipo simile di chiusura è spesso utilizzato insieme al *potting* senza bisogno di sigilli.

Il *potting* è un processo complesso che può influenzare direttamente l'affidabilità. Alcuni materiali per *potting* sono duri e possono causare danni meccanici ai componenti, come la rottura dei condensatori ceramici e dei trasformatori, o la rottura dei punti di saldatura. La dilatazione termica può causare danni simili durante il funzionamento sul lungo periodo, specialmente nelle applicazioni di esterni dove ci può essere un'escursione termica giornaliera molto elevata. Ci può inoltre essere interazione chimica con materiali utilizzati per l'involucro e che può condurre a rottura prematura. Ogni contaminazione residua sul PCB è intrappolata dal materiale di potting e può provocare corrosione e rottura prematura, e vuoti all'interno del materiale di potting possono causare problemi con rottura dell'isolamento. A causa di questi potenziali problemi è importante selezionare il materiale adatto per l'applicazione e controllare attentamente il processo di produzione.



Figura 3.8. L'alimentatore stagno AEG LP 200 che utilizza condensatori a film di polipropilene al posto di quelli elettrolitici.

I test di verifica sono molto importanti nel processo di progettazione, e devono essere eseguiti da un tecnico che non sia il progettista per poter fornire risultati oggettivi. Il test di vita accelerata (*highly accelerated life test*, HALT) utilizza una combinazione di stress elettrico, termico, e meccanico, per evidenziare ogni possibile punto debole della progettazione. I cicli di variazione della temperatura e di vibrazione tendono a mostrare i problemi meccanici o di assemblaggio, la qualità scadente delle saldature o il montaggio inadeguato di componenti pesanti sul PCB. Le variazioni nel voltaggio di alimentazione, i cicli rapidi di accensione e spegnimento e i cicli di carico mostrano invece i punti deboli della progettazione elettrica. Questo tipo di test può rivelare rapidamente i problemi potenziali della progettazione e consentire miglioramenti già a livello di prototipo.

In sintesi, considerando che l'alimentatore può avere 200 o più componenti per alimentare 50 (o meno) HB-LED, non deve sorprendere che le rotture dell'alimentatore possono facilmente diventare dominanti. Progettare alimentatori con lunga vita e elevata affidabilità richiede una grande attenzione al dettaglio per tutto il processo di progettazione; l'impiego di componenti di qualità e un appropriato derating seguono il controllo accurato di tutte le fasi di produzione.

## Capitolo 4

### Gestione elettrica e sistemi di controllo

*Altro ambito di ricerca attualmente molto attivo è quello relativo ai sistemi di controllo dell'illuminazione, fondamentali per ottimizzare i risparmi energetici offerti dai LED: considerando che oggi l'illuminazione rappresenta circa il 23% del consumo elettrico, molti stakeholders mirano allo sviluppo e all'utilizzo di dispositivi di illuminazione elettronici che garantiscano elevati livelli di efficienza. L'aspetto chiave per raggiungere tali livelli è la minimizzazione dell'uso dell'energia: un apparecchio LED che utilizza un terzo della corrente rispetto alla sua alternativa tradizionale, gestito da un sistema di controllo intelligente e dotato di sensori integrati, può portare il risparmio fino al 90%, e ciò può essere particolarmente vantaggioso sulla grande scala, quella del retrofitting per i sistemi di illuminazione industriali e commerciali.*

*Per comprendere le dinamiche relative ai sistemi di controllo, è necessario partire dai concetti di base legati alla gestione elettrica degli apparecchi per illuminazione a LED: saranno quindi fornite di seguito alcune informazioni chiave sulle modalità tecniche con cui è fisicamente possibile regolare il flusso luminoso dei diodi e sulla compatibilità di tali sistemi elettrici tra di loro e con la rete elettrica esistente.*

*Successivamente, saranno discusse le principali interfacce cablate e wireless per la creazione di sistemi di illuminazione intelligenti: tali sistemi consentono il controllo del flusso luminoso e di altri parametri sulla base di algoritmi previsionali complessi, o più comunemente sulla base dei dati di input ricevuti da una serie di sensori di vario tipo dislocati a monitoraggio degli spazi da illuminare. Per la comunicazione all'interno di tali sistemi, sono stati ideati degli schemi elettrici che consentono di utilizzare le stesse strategie di dimming ideate per le lampade tradizionali, anche con i LED attraverso i loro driver (cosa ritenuta fino a pochi mesi fa praticamente impossibile). Si sono inoltre sviluppate tecnologie in grado di gestire impianti per illuminazione su larga scala, ed eventualmente altri sistemi di acquisizione e trasmissione dati, attraverso connessioni cablate oppure wireless, inserendo dei nodi intelligenti all'interno degli apparecchi illuminanti.*



## Tecnologie di controllo e regolazione (dimming)

Nei sistemi di illuminazione regolabili, il driver, cioè il dispositivo elettronico di alimentazione dei diodi LED, è in grado di ricevere il comando dal regolatore e di diminuire il flusso dei LED in modo appropriato. Tale operazione, apparentemente banale, in realtà risulta piuttosto complessa e composta da una serie di passaggi che consentono al driver di ricevere il segnale dal dimmer. In molte tecnologie di dimming, lo svolgimento di tale operazione richiede necessariamente un cavo separato di collegamento tra il dimmer e il driver. In un sistema di dimming con tecnologia TRIAC (*triode alternate current*), il segnale di dimming è invece spedito attraverso linea elettrica: in questo caso, quindi, non c'è bisogno di alcun cavo aggiuntivo, e ciò costituisce un enorme vantaggio in termini di retrofitting (adeguamento tecnologico), poiché l'infrastruttura esistente può essere utilizzata, senza apportare modifiche, per fornire una soluzione LED dimmerabile. A questo proposito, è fondamentale la compatibilità del driver LED con il maggior numero possibile di tipologie di dimming, oltre alla capacità di regolare il flusso senza provocare sfarfallamenti visibili, e di gestire più apparecchi contemporaneamente.

La relazione tra la riduzione reale del flusso luminoso e la corrispondente variazione percepita dall'occhio umano è di tipo logaritmico, per cui un intervallo di dimming ampio migliora sensibilmente l'esperienza percettiva da parte dell'utente, mentre un intervallo molto ristretto può risultare quasi impercettibile: per avere un'idea degli ordini di grandezza, basti pensare che ridurre il flusso luminoso al 20% di quello originario comporta una riduzione percepita solamente del 50%.

Esistono diverse tecnologie per la regolazione del flusso luminoso dei LED: il dimming analogico, la regolazione tramite modulazione dell'ampiezza dell'impulso (*pulse-width-modulation*, PWM), la regolazione a taglio di fase (diretta e inversa). Relativamente alle modalità con cui l'informazione viene trasmessa dal dimmer al driver dell'apparecchio, essa può avvenire attraverso un cavo di alimentazione AC, un input analogico dedicato, un input digitale dedicato, oppure un'interfaccia o un network wireless: indipendentemente dalle modalità fisiche di comunicazione, i formati di codifica dei dati sono sempre gli stessi, per cui almeno da questo punto di vista, non sussiste alcun problema di compatibilità.

### Dimming analogico (0-10V)

La regolazione analogica, spesso chiamata dimming 0-10V, è definita dallo standard IEC 60929, Annexe E, ed utilizza un cavo di controllo separato dal cavo elettrico di input per fornire il segnale di dimming. Il sistema di controllo, che può essere un dimmer dedicato a muro di tipo 0-10V oppure un circuito all'interno di un sistema di controllo, agisce come un accumulatore di corrente, permettendo ad un singolo segnale di controllare diversi apparecchi o ballast in parallelo. Quando l'input del dimming è 10V l'output è il 100% del flusso luminoso, con una riduzione lineare a zero, come mostrato in Fig. 4.1. Se l'input della regolazione all'interno di un apparecchio non è, per qualche ragione, applicato o applicabile, si può semplicemente lasciare il circuito aperto a 10V.

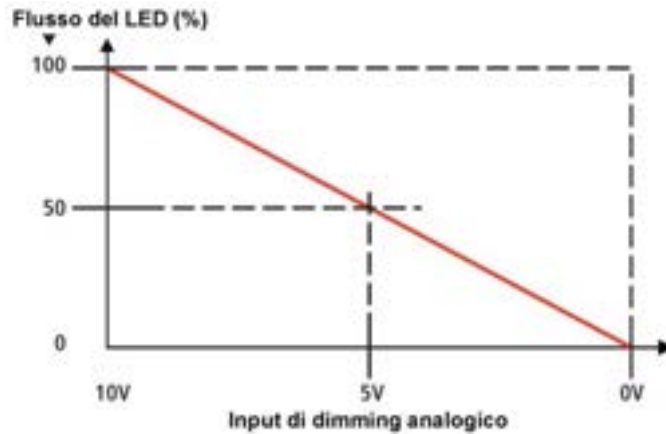


Figura 4.1.

All'interno di un'interfaccia di dimming analogica 0-10V, un input di 10V equivale al 100% del flusso luminoso, mentre un input di 0V corrisponde allo spegnimento dell'apparecchio o al funzionamento al minimo livello possibile.

La Fig. 4.2 illustra con un diagramma a blocchi il funzionamento di un alimentatore di un driver con un dimming di output lineare: il segnale 0-10V controlla la corrente del driver LED e non il voltaggio di mandata dell'alimentatore, che rimane costante (in questo esempio a 24V).

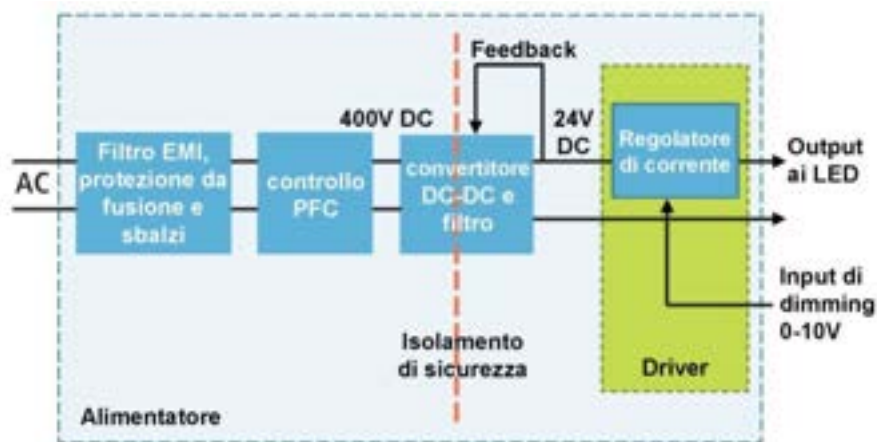


Figura 4.2.

Lo scenario di controllo analogico è facilmente applicabile utilizzando una tecnologia di dimming lineare, che fornisce una corrente costante continua al livello prestabilito.

### Dimming PWM

In questo caso il driver varia la frequenza dell'impulso per controllare il flusso luminoso: tale tecnologia è basata sulla capacità dell'occhio umano di integrare la quantità media di luce fornita da una serie di pulsazioni di frequenza sufficientemente elevata (di solito 200Hz) da non percepire sfarfallamento. Questo tipo di regolazione richiede, in aggiunta al controller PWM, un transistor MOSFET (*Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*) posto all'interno del driver elettronico, e più precisamente sull'output della corrente DC. Il dimming PWM è generalmente più

complesso da implementare rispetto a quello analogico, ma mantiene un'efficienza elevata e assicura che la luce emessa sia costante in relazione alle coordinate cromatiche. La Fig. 4.3 mostra il diagramma a blocchi di un alimentatore con un controllo analogico che si basa su un output di tipo PWM per la regolazione. In questo caso, il segnale di input 0-10V costituisce a sua volta l'input del controller PWM all'interno dell'alimentatore, che fornisce un output a voltaggio costante e ad ampiezza di pulsazione variabile attraverso un interruttore MOSFET. Un driver LED (non rappresentato in figura) converte poi gli impulsi, che gli vengono forniti in corrente alternata, in corrente continua per alimentare i LED. In generale, una frequenza di PWM di 200Hz è sufficiente per evitare ogni sfarfallio visibile della luce emessa dai diodi.

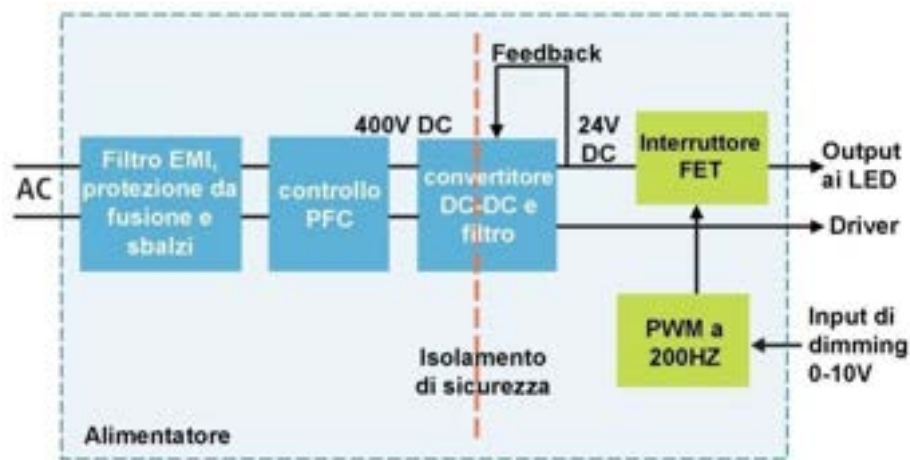


Figura 4.3. Il dimming PWM è inoltre applicabile a scenari di controllo di tipo 0-10V, ma richiede un controller PWM che comandi l'interruttore di output MOSFET di un alimentatore che in risposta alimenta in corrente continua un driver LED.

### Dimmer a taglio di fase

Originariamente sviluppati per l'illuminazione a incandescenza, dove l'emissione della lampada è direttamente proporzionale alla corrente media di input AC, il loro principio di funzionamento si basa sul fatto che, tagliando una porzione dell'onda, la corrente di alimentazione risulta ridotta, e la lampada dimmerata. Tuttavia, questo non vale per i LED, perché questi ultimi contengono un driver di alimentazione la cui funzione primaria è di fornire corrente costante senza tener conto della corrente alternata di input.

Se si connette quindi un alimentatore a corrente e voltaggio costanti all'output di un dimmer a controllo di fase, l'alimentatore cerca di compensare le parti mancanti della forma d'onda AC. All'aumentare della porzione di sinusoide tagliata, l'alimentatore mantiene il voltaggio di output creando una corrente di input maggiore, e i LED rimangono della luminosità normale; quando però si arriva a sollecitazioni eccessive, l'alimentatore non riesce più a compensare e si rompe.

Affinché un apparecchio LED risponda correttamente a un dimmer a controllo di fase, è necessario aggiungere diversi blocchi funzionali all'interno del driver, mostrati in giallo nella Fig.4.4: un

seniore monitora la forma d'onda della corrente AC di input prima della fase di correzione del fattore di potenza (*power-factor-correction*, PFC), e genera un segnale di output proporzionale all'entità del taglio di fase. Lo schema in Fig. 4.4 prevede il passaggio del segnale di output attraverso un circuito di sicurezza isolato e l'invio al lato secondario dell'alimentatore, utilizzandolo come input per il controller PWM. Il controller PWM regola il collegamento dell'interruttore MOSFET all'output del convertitore DC-DC. Il MOSFET produce impulsi a voltaggio costante che sono convertiti in impulsi a corrente costante dal driver LED. Quando non si rileva alcun taglio della fase AC, l'output è fornito al 100% per produrre il massimo flusso luminoso.

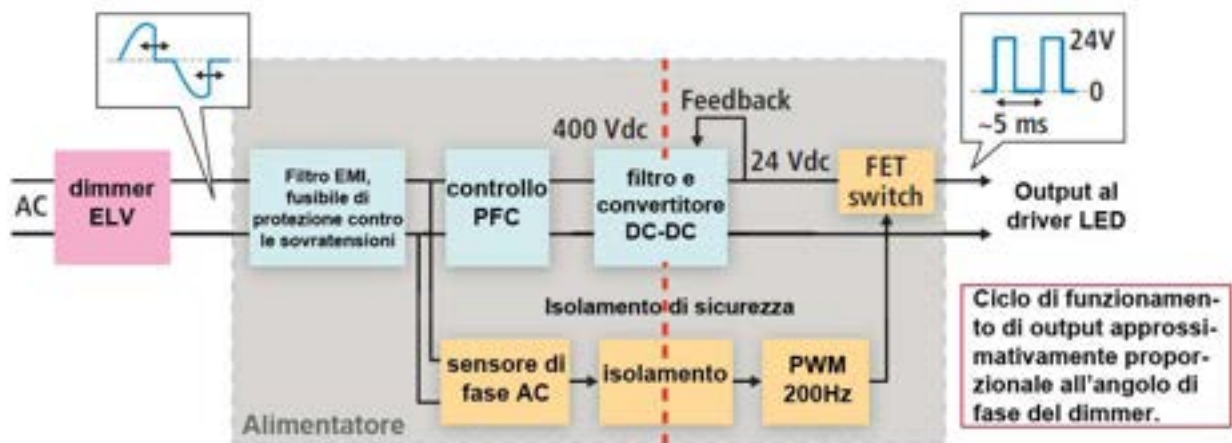


Figura 4.4. Diagramma a blocchi di un alimentatore per il dimming a taglio di fase. Per supportare tale regolazione, un driver LED ha bisogno di componenti aggiuntivi, incluso un sensore di fase AC, un controller PWM e un interruttore MOSFET

#### *Dimming a taglio di fase diretto (TRIAC).*

Una forma di controllo del flusso luminoso ampiamente utilizzata è un comune dimmer TRIAC: tale tipo di dimmer opera come in una normale regolazione a taglio di fase, tagliando una parte dell'onda AC. Il tipo più comune taglia fuori una porzione della parte d'onda crescente, come mostrato in Fig. 4.5a. Il dimmer percepisce ogni attraversamento dello zero dell'input AC e aspetta per un periodo di tempo variabile prima di accendere l'interruttore TRIAC e lasciar attraversare il carico dalla corrente.

#### *Dimming a taglio di fase inverso (ELV).*

Un secondo tipo simile di dimmer opera al contrario, tagliando una porzione dell'onda nella sua fase decrescente, come mostrato in fig. 4.5b. Questo tipo di dimmer è a volte chiamato "controllo di fase inverso" (*electronic low-voltage*, ELV) ed è progettato per essere utilizzato nelle applicazioni elettroniche a basso voltaggio.

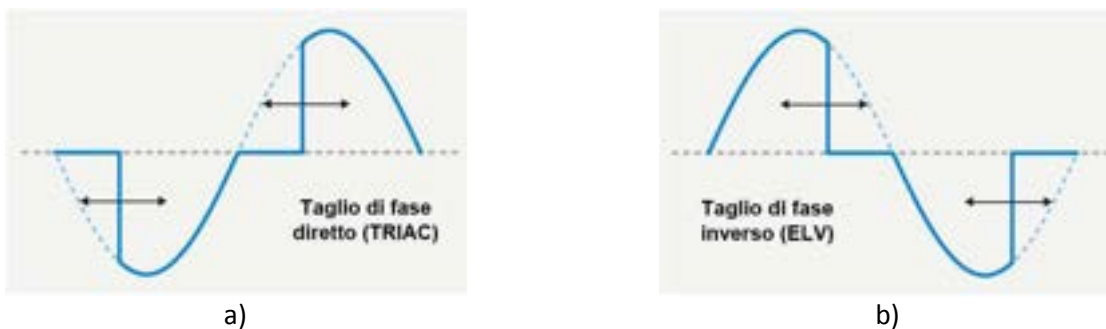


Figura 4.5. I dimmer a taglio di fase riducono la luminosità della lampada tagliando parte della forma d'onda AC.  
 a) Il dimmer TRIAC taglia fuori una porzione della forma d'onda AC nel tratto crescente dell'onda sinusoidale.  
 b) Il dimmer ELV taglia fuori una porzione della forma d'onda AC nel tratto decrescente dell'onda sinusoidale.

### Dimming a controllo del voltaggio di input AC

Un altro approccio che può essere utilizzato per dimmerare la maggior parte delle tecnologie di illuminazione, incluse le lampade incandescenti e ai vapori di sodio ad alta pressione, consiste semplicemente nel ridurre il voltaggio di input AC. Questa soluzione è particolarmente adatta per l'illuminazione stradale, perché consente di ridurre il consumo energetico durante le ore di minore utilizzo: a titolo di esempio, il voltaggio AC può essere ridotto del 10% a tarda sera, del 20% dopo mezzanotte e poi riportato ai valori normali al mattino. La tecnica è maggiormente efficiente quando un singolo controller del voltaggio controlla l'output di diverse sorgenti. Tale tecnologia non è completamente compatibile con l'illuminazione LED standard: come nel caso del dimming a taglio di fase, l'alimentatore LED compensa la riduzione del voltaggio e mantiene costante la corrente di output ai LED, per cui è necessaria l'aggiunta di un sensore di voltaggio AC per controllare il ciclo di output. E' da notare che, se per le sorgenti a incandescenza, che sono carichi puramente resistivi, un calo del voltaggio di input del 10% provoca una diminuzione della corrente di circa il 20%, per i LED, essendo carichi elettrici di tipo diverso, la relazione è diversa: i sensori di voltaggio AC sono però progettati per simulare lo stesso comportamento delle lampade tradizionali.

Lo schema di un sistema di questo tipo è sostanzialmente identico all'esempio del controllo di fase presentato precedentemente in Fig. 4.4, con la sostituzione del blocco del sensore di fase con un blocco sensore di voltaggio.

### **Compatibilità di sistema**

La compatibilità di sistema è un concetto nuovo per l'illuminazione elettronica. Essa è definita come l'abilità di un dispositivo, attrezzatura o sistema (generalmente un carico elettrico) di funzionare in modo soddisfacente rispetto all'ambiente elettrico che gli fornisce l'alimentazione, senza introdurre disturbi elettrici in alcun elemento dell'ambiente stesso.

L'introduzione di tale definizione si è resa necessaria a causa dell'evoluzione nella tipologia dei carichi elettrici, che ha comportato una serie di alterazioni al funzionamento delle reti elettriche.

Per comprendere appieno l'importanza di tale concetto è però necessario fornire una serie di nozioni preliminari relative all'evoluzione delle tipologie di carichi elettrici e alle reazioni che le tecnologie di alimentazione dei LED possono causare da parte degli ambienti elettrici in cui sono inserite.

### Premessa

La rete elettrica distribuisce energia ai singoli utenti (Fig. 4.5): gli ambienti elettrici del gestore e degli utenti possono essere soggetti a disturbi di vario genere dovuti a fenomeni naturali quali temporali, errori di progettazione, malfunzionamenti imputabili alla natura e all'impiego dei dispositivi elettrici stessi, tra cui i LED. I disturbi all'interno delle linee elettriche possono comportare variazioni dei tre parametri fondamentali di voltaggio e corrente, e cioè la forma d'onda, l'ampiezza d'onda e la frequenza: se tali variazioni rientrano all'interno di un range di sicurezza piuttosto ristretto, non si verificano conseguenze di rilievo; se invece sono di entità rilevante, possono provocare a loro volta disturbi al funzionamento degli apparecchi, influenzando negativamente sulla performance di quelli elettronicamente avanzati, come gli apparecchi a LED e, nei casi più gravi, portando a danni permanenti.

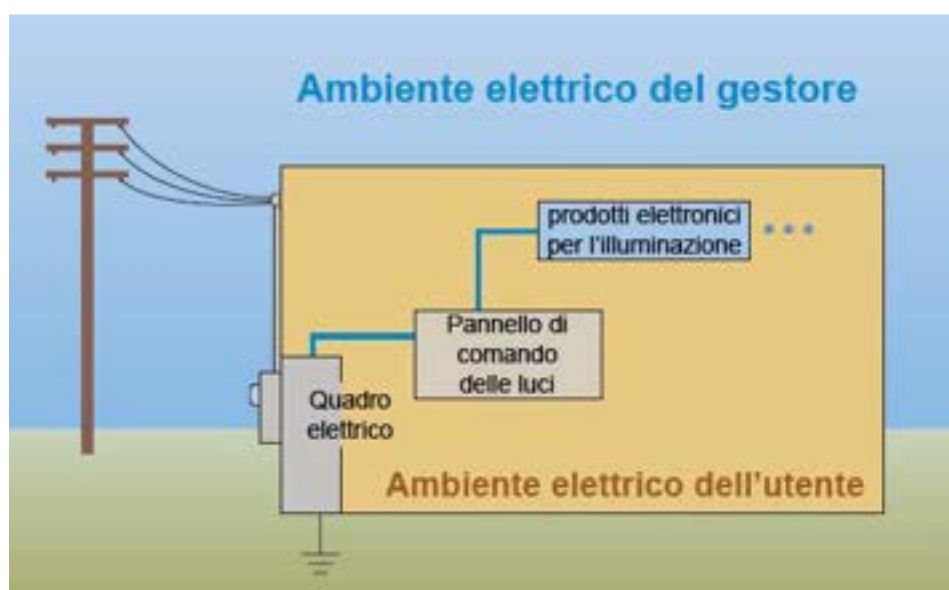


Figura 4.5. Schema dell'ambiente elettrico totale all'interno del quale operano i prodotti elettronici per l'illuminazione.

All'inizio dello sviluppo delle reti elettriche, i carichi elettrici finali erano principalmente di tipo resistivo o induttivo, con rari carichi capacitivi. Senza scendere nel dettaglio della caratterizzazione analitica del comportamento di ciascuno di essi, basti sapere che i carichi resistivi erano costituiti da lampade a incandescenza e stufe elettriche, mentre i carichi induttivi erano rappresentati da motori di varie dimensioni per uso residenziale, commerciale e industriale. I trasformatori dei

motori abbassavano il voltaggio di linea da 120V DC a un voltaggio AC più basso, ad esempio 36V, prima che questo venisse applicato a un rettificatore. Una volta rettificato, il voltaggio era poi mantenuto più o meno costante da un regolatore, che neutralizzava le fluttuazioni dovute alla variazione dei carichi inseriti nel circuito. A questo stadio di evoluzione tecnologica, la natura dei carichi era tale che l'onda sinusoidale di corrente trasferita dalla rete di distribuzione a quella del singolo utente era restituita in uscita con la stessa forma e fase dell'onda del voltaggio, per cui fu coniato il termine di "carico lineare", a indicare una corrispondenza lineare tra le due grandezze. In altre parole, la maggior parte dei carichi elettrici erano lineari, cioè non causavano problemi armonici né all'interno degli impianti elettrici dell'utente, né alla rete elettrica.

Dopo l'avvento di diodi e transistor, i carichi finali hanno iniziato lentamente ad essere progettati in maniera diversa, a partire dalla massiccia eliminazione dei trasformatori precedentemente impiegati per abbassare il voltaggio. A differenza dei carichi lineari, che prevedevano in uscita alla rete un'onda di corrente sinusoidale, i nuovi alimentatori cominciarono a modificarne la forma, trasmettendola solo in corrispondenza del picco d'onda. La Fig. 4.6 illustra la differenza nella corrente trasmessa da carichi lineari e non lineari.

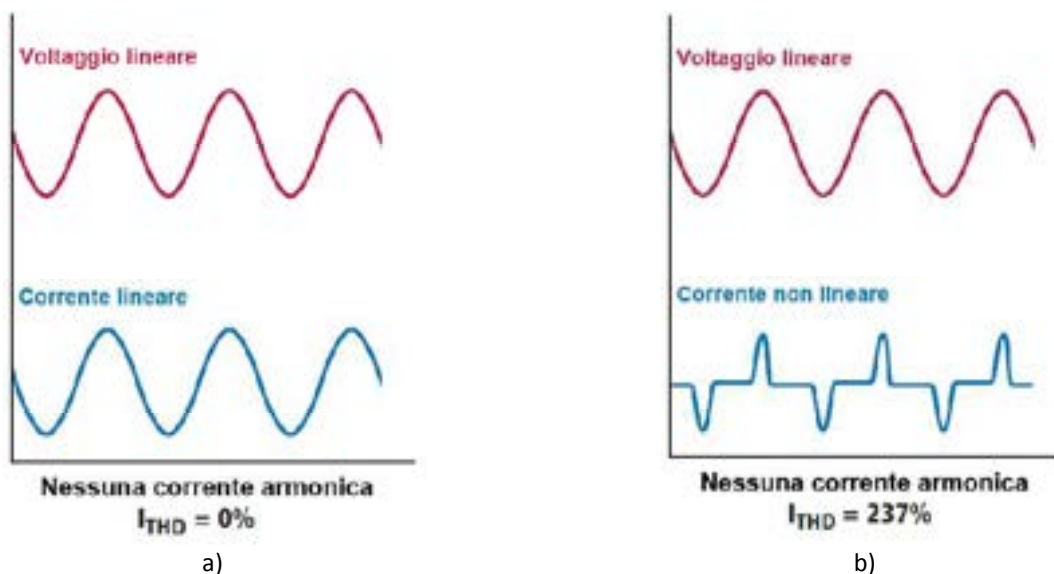


Figura 4.6. Carichi elettrici lineari e non lineari.

$I_{THD}$  : distorsione armonica totale della corrente (*Intensity Total Harmonic Distorsion*, THD).

- a) Forma d'onda di voltaggio e corrente per carichi lineari.
- b) Forma d'onda di voltaggio e corrente per carichi non lineari.

Con l'avanzamento tecnologico nell'elettronica e nella microelettronica, gli alimentatori si sono trasformati da analogici a SMPS (*Switch-Mode Power Supply*), caratterizzati da maggiori efficienze e minori peso e ingombro sul circuito stampato. La rete elettrica non è, però, progettata per supportare un massiccio impiego di carichi non lineari, e le elevate correnti armoniche che vengono da essi generate possono causare il surriscaldamento dei trasformatori sia a livello di rete, sia all'interno dei sistemi elettrici degli utenti, influenzando negativamente la qualità del

servizio. Per risolvere almeno in parte il problema, gli impianti elettrici degli utenti includono ormai solitamente un trasformatore di tipo *dry-type* allo scopo di ridurre il voltaggio di rete a un voltaggio adatto per l'illuminazione. Il problema è particolarmente importante nel caso di alimentazione trifase, perché le correnti armoniche su ciascuna fase creano forti correnti aggiunte sui conduttori neutri, molti dei quali non sono progettati per sopportarle.

I moderni SMPS utilizzano un circuito aggiuntivo con input di rete, chiamato circuito APFC (*Active Power-Factor Correction*), il cui ruolo è quello di rimuovere la non linearità della corrente di input dovuta al carico finale "aggiungendo" le parti mancanti dell'onda sinusoidale e rimuovendo così la distorsione armonica. La rimozione della distorsione aumenta il fattore di potenza (*power-factor*, PF) ad essa associato, definito come coseno dell'angolo di sfasamento tra corrente e tensione all'interno di un circuito AC. Il circuito APFC inoltre rifasa corrente e voltaggio, fornendo così un fattore di potenza vicino all'unità, chiamato fattore di corrente di rifasamento (*power-factor correction*, PFC). La combinazione dei due fattori di potenza appena citati rappresenta il fattore di potenza reale. Molti dei prodotti di illuminazione elettronica attualmente in commercio utilizzano circuiti APFC all'interno di ballast e driver per rimuovere la distorsione della corrente armonica e correggere il fattore di potenza, anche se correggere correnti armoniche elevate richiede dissipazione di energia all'interno del ballast o del driver, con una conseguente diminuzione dell'efficienza complessiva del dispositivo.

Interferenze elettriche distruttive come sovraccarichi e variazioni transitorie del voltaggio, eventi comuni in un ambiente elettrico, generalmente non causano danni agli alimentatori analogici, a meno che tali fluttuazioni non siano molto elevate; al contrario, i medesimi sbalzi possono causare danni permanenti ai circuiti SMPS, e ancor più a quelli APFC. Questi ultimi vengono impiegati sia in tutti i ballast per l'alimentazione delle fluorescenti tubulari, sia per l'alimentazione della maggior parte degli apparecchi a LED perché, come detto, non solo sono in grado di ridurre le correnti armoniche e migliorare il fattore di potenza, ma anche di fornire un'ampia gamma di voltaggi e garantirne la costanza bilanciando sia le variazioni sulla linea sia i carichi finali. I driver LED che non utilizzano circuiti APFC sono meno soggetti a rottura per sbalzi di tensione e di rete, ma di contro sono soggetti ad elevate distorsioni dovute alle correnti armoniche, ed hanno uno scarso fattore di potenza.

I circuiti APFC contengono almeno un circuito integrato per la misura della corrente non-lineare introdotta dal ballast o dal driver e per la determinazione dell'entità della correzione da apportare per riconformare la forma d'onda. Essi includono inoltre un dispositivo a transistor che funge da interruttore per attivare il circuito di correzione: tale elemento, insieme ad altri dispositivi semiconduttori, come i diodi, conforma il segnale elettrico e rettifica le elevate correnti associate al funzionamento degli APDC. La presenza di questi componenti aumenta la suscettibilità del prodotto agli sbalzi di tensione e corrente, che possono mandare l'intero circuito APFC in corto circuito: per questo motivo, i sistemi a LED che includono tale tecnologia devono essere forniti di uno o più dispositivi di protezione dagli sbalzi (*Surge Protection Devices*, SPD).



### Applicabilità del concetto di compatibilità di sistema

La definizione di compatibilità di sistema precedentemente enunciata si applica allo stesso modo sia al sistema di alimentazione, sia all'ambiente elettrico all'interno dell'impianto del consumatore, ed in entrambe le direzioni: da un lato, il prodotto per l'illuminazione elettronica non deve avere scarse performance o rompersi prematuramente quando sottoposto ai comuni disturbi elettrici che si verificano all'interno dell'impianto elettrico dell'utente, sia che il disturbo provenga dalla rete elettrica, sia che il disturbo venga generato al suo interno; allo stesso modo, il prodotto non deve causare interferire né con l'ambiente elettrico del consumatore, né con la rete.

L'approccio biunivoco sintetizzato in Fig. 4.7 ha lo scopo di assicurare la compatibilità e la coesistenza senza problemi dei prodotti SSL nello stesso ambiente elettrico dove si trovano altri dispositivi elettronici: tutti i dispositivi installati in una struttura non devono infatti generare correnti armoniche né distorsioni del voltaggio, perché tali fenomeni possono provocare surriscaldamento dei trasformatori o dei fili elettrici. Inoltre, le correnti armoniche generate dai prodotti di illuminazione non devono combinarsi in modo negativo le une con le altre, per non rischiare di oltrepassare il PCC (*Point of Common Coupling*), cioè quel punto in cui l'impianto elettrico dell'utente si allaccia in uscita al sistema di alimentazione di rete.

Altro aspetto da sottolineare, oltre al pericolo di generazione di correnti armoniche e sovraccarichi, è la potenziale interferenza elettromagnetica (*ElectroMagnetic Interference, EMI*) che i driver LED possono provocare nel caso in cui emettano ad alte frequenze durante il funzionamento: tale fenomeno può provocare malfunzionamenti sia nell'impianto elettrico dell'utente che in quelli fisicamente situati entro il raggio d'azione delle frequenze emesse. Elemento attualmente preso in scarsa considerazione, sarà necessario in futuro provvedere su larga scala al controllo, in tale senso, dei driver LED: l'EPRI sta già provvedendo, negli Stati Uniti, a testare tali dispositivi elettronici per certificarne la compatibilità di sistema.

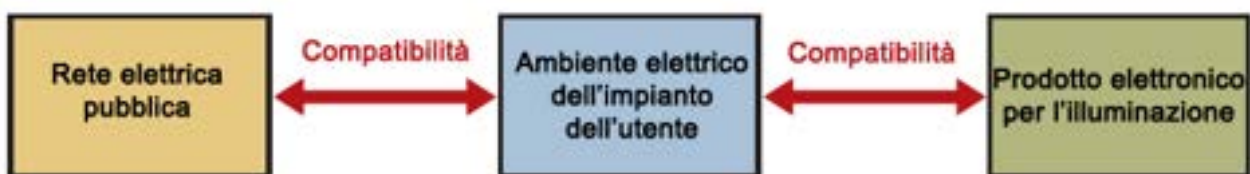


Figura 4.7. L'approccio biunivoco della compatibilità di sistema.

### Responsabilità per incompatibilità di sistema

La Fig. 4.8 mostra la relazione tra la posizione e la frequenza dei disturbi, le persone coinvolte e le rispettive aree di responsabilità: i gestori della rete elettrica sono ritenuti responsabili per i disturbi che coinvolgono un grande numero di utenti e che si verificano all'interno delle linee elettriche di trasmissione e distribuzione; gli utenti finali sono ritenuti responsabili per i disturbi

che si verificano nei sistemi elettrici di attacco alla rete pubblica e quelli all'interno dei propri edifici; i produttori e i progettisti di apparecchiature per illuminazione LED sono infine ritenuti responsabili per la performance dei dispositivi e i disturbi che avvengono all'interno degli impianti elettrici dei singoli utenti.

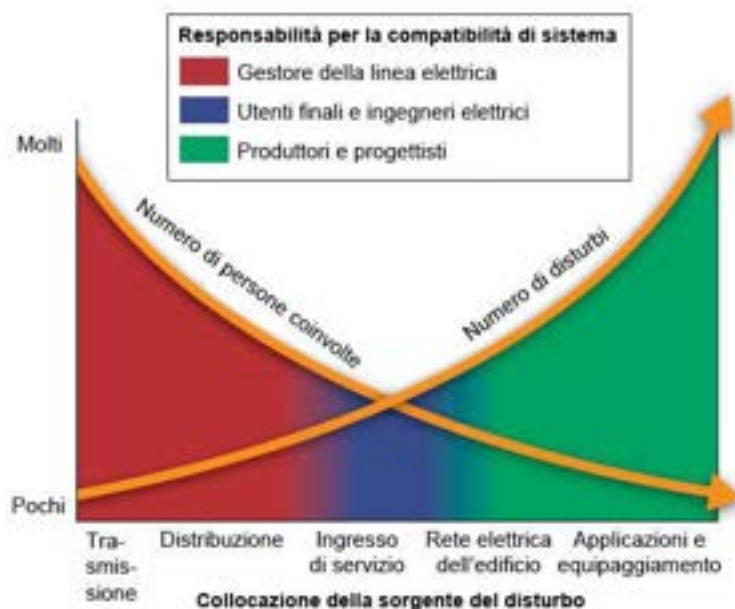


Figura 4.8. La responsabilità per la compatibilità di sistema è condivisa tra gestori della rete elettrica, utenti finali e produttori di apparecchi illuminanti.

### Compatibilità tra elementi all'interno di un sistema intelligente

Alcuni argomenti molto importanti ancora da sviluppare in questo settore sono stati elencati dall'EPRI, attualmente l'unico ente in grado di certificare la compatibilità degli apparecchi LED con le reti elettriche:

- 1) Compatibilità di sistema tra dispositivi e sistemi di illuminazione LED.
- 2) Test di compatibilità di sistema
- 3) Uso del test di compatibilità in combinazione con gli standard di performance dei LED
- 4) Esempi di miglioramenti progettuali in seguito a test di compatibilità
- 5) Test di compatibilità ed emissioni
- 6) Immunità e disturbi elettrici
- 7) Applicazione del concetto di compatibilità ai sistemi di controllo e ai sistemi di gestione della risposta
- 8) Utilizzazione dei risultati del test di compatibilità nella modellazione dell'affidabilità.

## Sistemi di controllo intelligenti

Particolarmente importanti all'interno della visione globale delle *smart grids*, cioè delle reti intelligenti per la produzione e la distribuzione locale di energia, punto nevralgico delle *smart cities* del futuro, i sistemi di controllo intelligenti per l'illuminazione sono quei sistemi in grado di ottimizzare i consumi energetici tramite l'impiego di sensori remoti, controlli e nodi di raccolta dati tra gli apparecchi illuminanti e il centro di comando. Tali sistemi esistono da tempo, ma non sono ampiamente diffusi: si stima infatti che solo il 2-4% dei sistemi di illuminazione attualmente in funzione sia di questo tipo.

I sistemi di illuminazione intelligenti formano la spina dorsale di molti "edifici intelligenti": le apparecchiature con funzione di sensori raccolgono dati sotto forma di tracciati d'uso, mentre API (*Application Programming Interface*) aperte consentono la compatibilità trasversale e sono progettate per l'integrazione semplice con altri sistemi di automazione all'interno dell'edificio. Queste capacità vanno molto oltre ciò che la maggior parte delle persone pensa quando considera l'illuminazione, e sono parte di una trasformazione che consentirà il passaggio da un'illuminazione semplice e poco efficiente, a un sistema dotato di un grande valore aggiunto.

## Efficienza energetica

Un'analisi recentemente condotta dal DOE (*US Department of Energy*) quantifica i potenziali risparmi energetici conseguenti alla transizione alle sorgenti LED dal 2010 al 2030 in 190TWh, stimando inoltre un valore doppio nel caso in cui la maggior parte degli apparecchi installati fossero integrati all'interno di sistemi intelligenti: con un potenziale così grande per il risparmio energetico, appare chiaro che il controllo integrato è una parte fondamentale del futuro dell'illuminazione.

Tra le varie sorgenti luminose, i LED sono quelle che si prestano meglio all'integrazione con le tecnologie di controllo: il loro funzionamento a basso voltaggio facilita infatti l'interfaccia con i sistemi di controllo basati su microcontroller e circuiti di network e sensori, mentre la loro risposta pressoché istantanea di accensione e spegnimento e la loro dimmerabilità ne fanno la sorgente comandabile con maggiore precisione in tempo reale. Va inoltre sottolineato come il funzionamento a flusso luminoso ridotto comporti sia un allungamento della durata di vita che un aumento dell'efficienza energetica dei diodi, come conseguenza dei ben noti effetti termici: al contrario, le tradizionali lampade a scarica ad alta intensità e fluorescenti, se dimmerate, sono soggette a flicker e ad una diminuzione della durata di vita. Dal punto di vista energetico, la sorgente ottimale è caratterizzata sia da un'elevata efficienza luminosa che dalla capacità di essere dimmerata o spenta quando non è necessario il flusso luminoso da essa prodotto: per questo motivo il sistema di controllo deve poter individuare con precisione quando ogni sorgente all'interno di un edificio dovrebbe essere spenta, e quale livello di dimmeraggio è appropriato per ognuna di esse quando è in funzione.

Rispetto al concetto tradizionale di illuminazione, basato sul funzionamento di singoli apparecchi, i sistemi di illuminazione intelligente forniscono funzionalità completamente nuove, funzionando secondo un set di norme comportamentali definite dall'utente e rispondendo attraverso un'intelligenza integrata e basata sul software. Inoltre, poiché i dispositivi all'interno del sistema condividono un network di comunicazione, essi possono comunicare con un controller centralizzato per fornire dati sull'utilizzo e le presenze nelle varie aree: tali informazioni possono risultare utili per prendere decisioni relative all'efficienza energetica, come ad esempio la creazione di profili d'uso sulla base dei quali comunicare istruzioni aggiornate ai singoli dispositivi o a gruppi di essi. Nessuna di queste funzionalità è possibile all'interno di un approccio di tipo sistemico tradizionale.

### Componenti principali

Sebbene un semplice sensore di presenza all'interno di un apparecchio possa già offrire risparmi energetici, è in realtà opportuno avere a disposizione un network completamente sviluppato per implementare i controlli per l'illuminazione, perché ciò consente grandi risparmi attraverso scenari di controllo più complessi, misurazione remota del consumo elettrico e risposta adattiva alla variazione delle condizioni. Inoltre, il controllo a network consente al funzionamento ottimale degli apparecchi LED di estendere la durata di vita del prodotto e l'implementazione delle procedure di manutenzione preventiva, ed entrambi questi aspetti possono ridurre i costi di esercizio. I sistemi di illuminazione intelligente si basano pertanto su un'ampia gamma di componenti integrati, di cui i principali sono gli apparecchi dimmerabili, i sensori, il network, i sistemi di controllo centralizzato e il software di gestione.

#### *Apparecchi dimmerabili*

Come detto, a differenza delle sorgenti tradizionali a scarica, i LED hanno un grande potenziale per quanto riguarda la risposta a input di regolazione del flusso emesso, e sono sicuramente le sorgenti luminose più adatte per i sistemi di illuminazione intelligenti.

#### *Sensori*

Per fornire la giusta quantità di luce per una specifica applicazione, il sistema di illuminazione ha bisogno di sapere cosa succede in quell'ambiente. A questo scopo vengono impiegati sensori di diverso tipo, da quelli di presenza a rilevazione di movimento, a quelli a infrarossi, a quelli di illuminamento, fino a quelli più specifici, come i sensori di temperatura o di rilevazione della presenza di veicoli.

## Network

All'interno di un sistema di illuminazione intelligente, gli apparecchi illuminanti hanno bisogno di un modo per comunicare tra loro e con il centro di controllo: questa comunicazione può avvenire attraverso diverse piattaforme di networking, le più comuni delle quali sono wireless, sebbene le tecnologie che agiscono lungo le linee di corrente siano in crescita. Indipendentemente dalle modalità di comunicazione, avere in loco un network per l'illuminazione che sia standardizzato e di uso comune offre l'opportunità di integrazione futura all'interno di un sistema intelligente.

### *Sistemi di controllo centralizzato e software*

Per lavorare come sistema, gli impianti per l'illuminazione intelligente necessitano non solo di una serie di sorgenti luminose singole, ma anche di un dispositivo di controllo centralizzato e di un'interfaccia software, che insieme al network completano la piattaforma per la configurazione, il controllo e la gestione unitaria.

### Sistemi di controllo adattivi

I sistemi di controllo adattivi, uno degli elementi chiave per l'ottimizzazione dei sistemi intelligenti, sono dispositivi complessi in grado di modificare autonomamente i propri parametri mentre sono in funzione. Tali sistemi possono essere classificati a seconda del tipo di azione di controllo che svolgono in controlli di feedforward e controlli in feedback: nel primo caso si utilizza un modello matematico del sistema, modificato in tempo reale sulla base dei valori di input ricevuti dai sensori; nel secondo caso si valuta il discostamento del valore misurato di uno specifico parametro rispetto a quello di default teorico ottimale. Tutti i controlli adattivi per l'illuminazione funzionano in feedback, perché solo con questo sistema è possibile apportare delle modifiche in tempo reale e mantenere lo stato di comfort anche in condizioni ambientali in rapido mutamento.

I controlli adattivi si suddividono anche in controlli adattivi a modello di riferimento (*Model Reference Adaptive Control*, MRAC) (Fig. 4.9a), in cui i parametri da controllare sono adattati in modo da garantire un comportamento del sistema simile al modello di riferimento, e controlli adattivi basati su un modello identificato (*Matrix Industrial Automotive Controller*, MIAC) (Fig. 4.9b), in cui i parametri vengono adattati a parametri di sistema identificati. Questo secondo tipo di controller può poi essere di tipo implicito (o indiretto), se esegue l'identificazione del sistema e ne adatta i parametri basandosi sulle informazioni raccolte, oppure esplicito, se effettua un'unica operazione di identificazione e calcolo dei nuovi parametri.

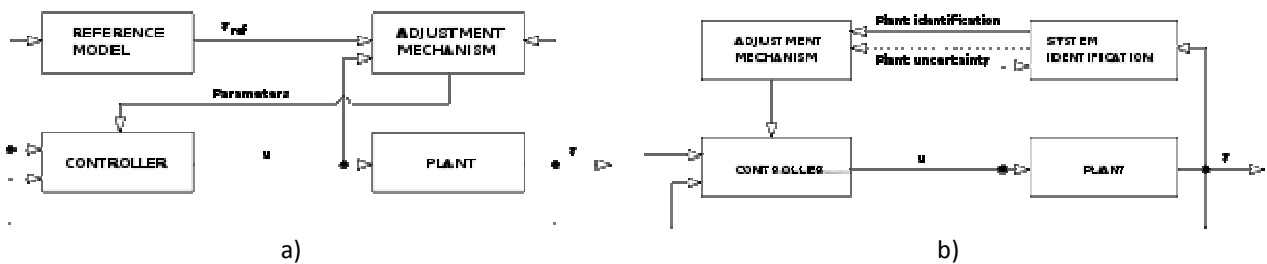


Figura 4.9. Sistemi di controllo adattivo a confronto.  
 a) MRAC (Model Reference Adaptive Control).  
 b) MIAC (Matrix Industrial Automotive Controller).

### Costo totale di proprietà (TCO)

I gestori dell'energia elettrica registrano variazioni stagionali della domanda energetica dovute al diverso orario di lavoro (invernale o estivo): i sistemi di illuminazione intelligenti permettono al comportamento dell'illuminazione di cambiare in accordo con orari predefiniti e rendono semplice reimpostare lo schema di illuminazione a seconda delle esigenze. Il grafico in Fig. 4.10 mostra un esempio di consumo medio di un apparecchio tradizionale ai vapori di sodio ad alta pressione (HPS), di un apparecchio fluorescente ad alta intensità di tipo dual ballast (HIF) e di un apparecchio LED all'interno di un sistema di illuminazione intelligente nell'arco delle 24 ore: come si vede il consumo medio del LED è di circa 1,2kWh/giorno, contro gli 11,16kWh/giorno delle lampade ai vapori di sodio e i 6,98kWh/giorno delle lampade fluorescenti.

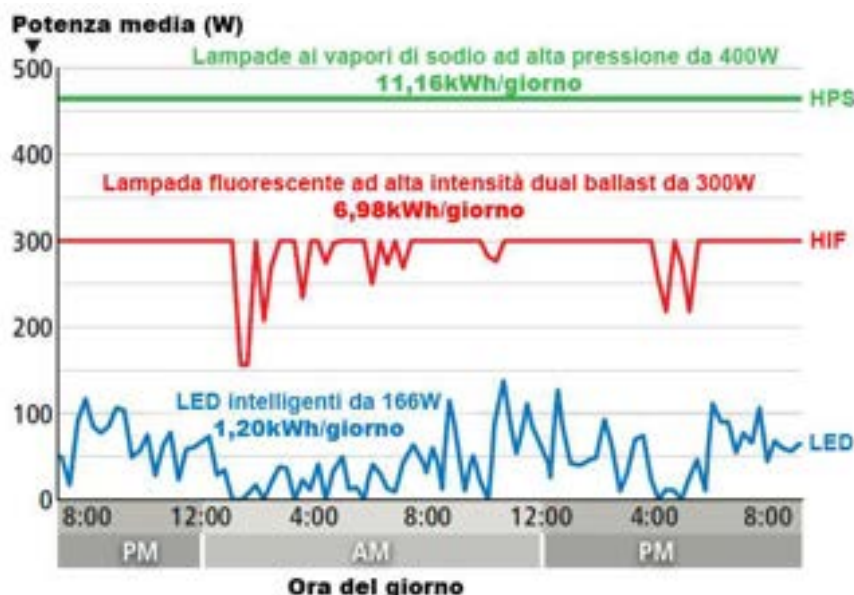


Figura 4.10. Consumo medio di un apparecchio tradizionale ai vapori di sodio ad alta pressione, di un apparecchio fluorescente ad alta intensità di tipo dual ballast e di un apparecchio LED all'interno di un sistema di illuminazione intelligente.

I sistemi di illuminazione intelligenti, con la loro capacità intrinseca di monitoraggio dei consumi in KWh, possono fornire misura e verifica dei dati ai proprietari, ai gestori e a terzi interessati. Per la prima volta nella storia il valore economico dell'intelligenza integrata può essere misurato, analizzato e gestito, ed in relazione a tali dati è possibile valutare il costo totale di proprietà (*total cost of ownership*, TCO) del sistema di illuminazione: il calcolo di tale parametro comprende, oltre al costo per l'acquisto di tutti i dispositivi, il costo di installazione, di manutenzione e sostituzione programmata, e ogni altro costo necessario al funzionamento corretto. In Fig. 4.11 è rappresentato il TCO medio nel tempo per un apparecchio tradizionale ai vapori di sodio ad alta pressione (HPS), di un apparecchio fluorescente ad alta intensità di tipo dual ballast (HIF) e di un apparecchio LED all'interno di un sistema di illuminazione intelligente: come si può vedere, a fronte di un maggiore costo iniziale per l'acquisto dei dispositivi, grazie alla scarsa necessità di manutenzione e ai consumi molto ridotti, i sistemi intelligenti LED risultano di gran lunga i migliori.

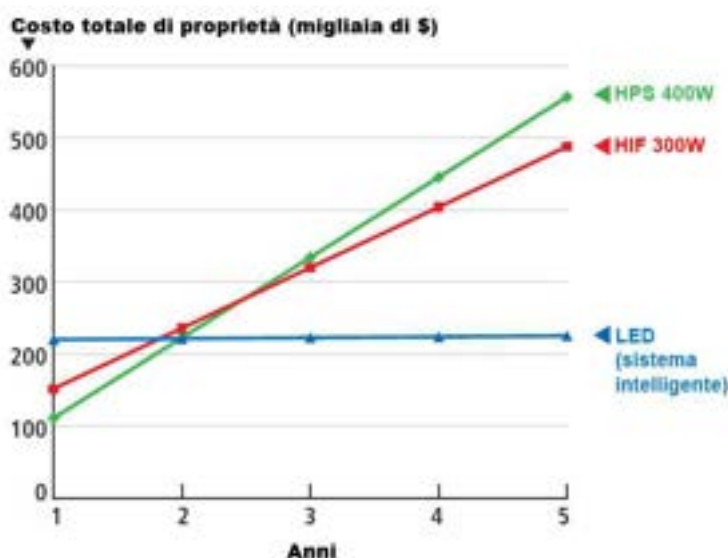


Figura 4.11. I LED all'interno di un sistema di illuminazione intelligente permettono un vantaggio consistente per quanto riguarda il costo totale di proprietà, specialmente se considerato nel tempo.

### Livelli di network e principali interfacce per sistemi di controllo

Le opzioni per la creazione di sistemi di controllo intelligenti tramite interfaccia cablata includono il dimming analogico (0-10V), il DALI, il DMX, o le comunicazioni che impiegano l'infrastruttura elettrica preesistente. I network wireless di tipo PAN (*Personal Area Network*), cioè quei network costruiti per permettere ad un singolo utente di comunicare tramite pc con una serie di dispositivi posti entro una distanza ridotta (solitamente meno di 10m) includono invece le piattaforme ZigBee, Z-Wave, 6LoWPAN, e la nuova piattaforma Android di Google, il cui scopo dichiarato è quello di arrivare a controllare tutti i dispositivi elettronici domestici tramite smartphone.

## Il modello di network OSI

I network e i sistemi per il controllo dell'illuminazione sono simili ai computer network: sono cioè tutti basati su un modello a sette livelli chiamato OSI (*Open System Interconnection*) (Tab. 4.1), che è stato schematizzato dalla Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (*International Organization for Standardization*, ISO).

Tabella 4.1. I sette livelli del network codificati dalla ISO

<b>Livello</b>	<b>Nome</b>
7	Applicazione
6	Presentazione
5	Sessione
4	Trasporto
3	Network
2	Collegamento dati
1	Fisico

Il livello “fisico” descrive il tipo di connessione a cavo o wireless, e come i dati digitali sono modulati su tale canale. Il livello “collegamento dati” descrive come nodi multipli condividono in modo affidabile il canale di comunicazione. Il livello “network” definisce come i nodi di un network sono indirizzati: la maggior parte degli utenti di PC conosce la dicitura IP (*Internal Protocol*) che di solito si riferisce all'indirizzo che all'interno di un PC identifica il sistema in un network. Il network e i livelli di trasporto, insieme, consentono comunicazioni affidabili tra due sistemi qualsiasi.

I tre livelli superiori consentono ad un sistema operativo come Windows e ad un applicazione, come ad esempio Microsoft Word, di condividere dati nel network: il sistema operativo si occupa dei livelli di “presentazione” e “sessione”, che formattano il dato e gestiscono i protocolli che assicurano a due diversi nodi del network di interpretare il segnale ricevuto nello stesso modo.

La conoscenza dei livelli del network è importante per capire le varie tecnologie per il controllo dell'illuminazione, perché alcune di esse ne ricoprono più d'uno: l'ethernet ed il wi-fi, ad esempio, coprono i due livelli più bassi (fisico e collegamento dati), mentre alcuni network di controllo possono coprirne di più.



## Opzioni di network di controllo

Un network di controllo dell'illuminazione richiede sia le tecnologie dei livelli inferiori per collegare i sistemi, sia i sensori (di illuminamento, di presenza e altri), che gli attuatori (interruttori e dimmers) e gli apparecchi. Esso necessita inoltre dei livelli superiori per l'indicizzazione dei singoli nodi, e la formattazione dei dati tramite un linguaggio di protocollo: purtroppo i protocolli attualmente in uso sono diversi e incompatibili tra loro, seppur idealmente una auspicabile standardizzazione consentirebbe ai prodotti di qualsiasi marchio di funzionare insieme.

*ZigBee e PLC.* Due opzioni comuni per le tecnologie del livello inferiore sono lo ZigBee e il PLC (*Power-Line Communications*). In linea generale, lo ZigBee è un network wireless che è stato progettato essenzialmente per applicazioni di controllo su breve raggio, sebbene dia la possibilità, tramite speciali tecniche, di estendere il raggio d'azione.

PLC è invece un termine generico per designare una tecnologia che trasmette dati lungo linee elettriche AC esistenti. Alcuni elementi del PLC potrebbero essere utilizzati nei network per il controllo dell'illuminazione, specialmente visto che la rete AC già connette interruttori e apparecchi.

Le specifiche ZigBee sono diffuse dalla ZigBee Alliance, e comprendono elementi che posso spaziare tra tutti i livelli del modello OSI, escluso il livello applicazione. Ai livelli inferiori, la specifica ZigBee si basa sullo standard IEEE 802.15.4 per i network wireless a bassa velocità. Lo standard definisce il funzionamento nelle bande di frequenza ISM (Industriale, Scientifico e Medico), assegnate nel mondo per il funzionamento wireless senza licenza. La banda a 2,4 MHz è quella disponibile nella maggior parte dei Paesi ed è quindi quella maggiormente utilizzata.

Il termine ZigBee può essere utilizzato in molti modi: i produttori di circuiti integrati (IC) e di moduli realizzano prodotti chiamati "radio ZigBee", che possono essere usati all'interno delle applicazioni ZigBee. Ma la specifica ZigBee va molto oltre la radio, che spesso si indirizza solo su uno dei livelli del modello OSI. In realtà la specifica ZigBee definisce il modo in cui i nodi sono indicizzati e comunicano: definisce una topologia mesh in cui i nodi possono inoltrare o ritrasmettere messaggi al contrario del sistema di funzionamento del Wi-Fi, che richiede che ogni nodo è nell'ambito della stazione base. La ZigBee Alliance è andata al di là, e ha aggiunto livelli protocollo, essenzialmente analoghi ai livelli presentazione e sessione del modello OSI. Per esempio, ha sviluppato i protocolli ZigBee Smart Energy per applicazioni nelle cosiddette smart-grids, inclusi misuratori intelligenti per residenze, il tutto all'interno di un protocollo a sei livelli. La ZigBee Alliance sta inoltre lavorando allo standard *ZigBee Building Automation*, che sostanzialmente definirà un linguaggio di comando per l'illuminazione, il riscaldamento, la sicurezza e gli altri sistemi all'interno dell'edificio. L'idea, di nuovo, è che la standardizzazione consentirà alle applicazioni di automazione di controllare tutti i prodotti compatibili, e i sistemi a livello dell'edificio possono combinare i sensori e gli apparecchi illuminanti di tutti i produttori che abbiano prodotti compatibili. E' inoltre possibile che i protocolli ZigBee Building Automation possano funzionare su altri network. La ZigBee Alliance e la Home-Plug Powerline Alliance si sono accordate per utilizzare i protocolli ZigBee Smart Energy sui network wireless e PLC, e lo stesso

potrebbe accadere con la Building Automation: potrebbe essere un risultato positivo se i network di controllo dell'illuminazione potessero mixare le opzioni di livelli fisici inferiori all'interno del network di un edificio.

L'impegno per la standardizzazione dei dispositivi da impiegare all'interno di sistemi intelligenti, cioè sensori, interruttori e driver LED, ha portato anche alcuni produttori ad accordarsi sulla scelta di una specifica interfaccia per mettere in commercio prodotti tra loro compatibili, in grado di comunicare senza problemi. E' questo il caso della Daintree Networks, che ha lanciato il *Control Scope Connected Partner Program*, basato sullo ZigBee, a cui hanno aderito altri cinque produttori.

Come già detto, esistono poi diversi altri metodi, di cui si fornisce sintesi con interfaccia, vantaggi e svantaggi in Tab. 4.2, per l'implementazione dell'input di regolazione attraverso interfacce analogiche, digitali o wireless dedicate, ognuno dei quali è compatibile con una determinata tecnologia di dimming.

#### Interfaccia digitale DALI

Passando alla descrizione delle interfacce digitali, lo standard DALI (*Digital Addressable Lighting Interface*) è anch'esso definito all'interno dell'Annexe E dello IEC 60929. L'applicazione principale per il DALI è il controllo di molteplici apparecchi in applicazioni commerciali come in sale conferenze, uffici ed edifici pubblici. Un'interfaccia DALI può controllare fino a 64 dispositivi, tutti controllati da un dispositivo di controllo elettronico (*electronic control device, ECD*) che include inoltre un'interfaccia Ethernet che permette al network di essere gestito da PC.

Il DALI fornisce capacità di regolazione a livello globale, basate sulla memorizzazione di diverse configurazioni complesse di dimming dei vari apparecchi, chiamate scene. Il protocollo DALI permette inoltre il controllo del flusso luminoso e della velocità di regolazione per ogni apparecchio, per coordinare tutti i dispositivi attraverso il network e assicurare che tutti rispondano simultaneamente. Il controller del DALI è in grado di ricevere, su richiesta, informazioni da ognuno dei dispositivi collegati, inclusi i settaggi del flusso luminoso, le informazioni sull'alimentazione, le informazioni su eventuali mal funzionamenti, ecc.

Per l'illuminazione LED all'interno dei network DALI, la regolazione può essere effettuata attraverso un normale controllo PWM della corrente di alimentazione dei diodi. Lo stesso micro controller che fornisce le funzionalità dell'interfaccia DALI può fornire il segnale PWM al driver LED.

Tabella 4.2. Vantaggi e svantaggi delle interfacce di comunicazione per i sistemi di illuminazione intelligenti.

<b>Interfaccia di dimming</b>	<b>Vantaggi</b>	<b>Svantaggi</b>
<i>Collegamento tramite rete elettrica (taglio di fase)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non SONO richiesti cavi di collegamento.</li> <li>- Può usare dimmer a taglio di fase preesistenti.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non è in grado di dimmerare gradualmente fino a zero.</li> <li>- Alcuni dimmer hanno bisogno di un carico minimo.</li> <li>- Può causare flicker.</li> <li>- È difficile coprire una gamma ampia di voltaggi AC.</li> </ul>
<i>Collegamento tramite rete elettrica (voltaggio)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non richiede cavi di collegamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- È adatto solo ad applicazioni specifiche.</li> </ul>
<i>Analogico (0-10V)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Può utilizzare controlli preesistenti di tipo 0-10V.</li> <li>- È in grado di dimmerare gradualmente fino a zero.</li> <li>- Implementazione semplice del driver.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costi aggiuntivi per i cavi di collegamento.</li> <li>- Necessità di un controller.</li> </ul>
<i>Digitale (DALI)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Standard per il controllo multiplo di apparecchi illuminanti</li> <li>- Possibilità di monitoraggio il funzionamento degli apparecchi.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costi aggiuntivi per i cavi di collegamento.</li> <li>- Necessità di un controller.</li> </ul>
<i>Digitale (DMX)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Standard per l'illuminazione di teatri e palchi.</li> <li>- Può offrire un controllo globale, con effetti di movimento, cromatici e grafici.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costi aggiuntivi per i cavi di collegamento.</li> <li>- Necessità di un controller.</li> <li>- Impossibilità di monitorare il funzionamento degli apparecchi.</li> </ul>
<i>Wireless (ZigBee)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non richiede cavi di collegamento</li> <li>- Possibilità di includere svariate funzioni all'interno del sistema.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Il driver e il controller sono più complessi.</li> <li>- I segnali wireless hanno un raggio d'azione limitato.</li> </ul>

### Interfaccia digitale DMX512

Lo standard DMX512 (digital multiplex) è definito dalla ANSI E1.11-2004. Il suo impiego principale è controllare l'illuminazione sui palchi dei teatri, e può supportare funzioni multiple come effetti di movimento, cromatici e grafici, il tutto in aggiunta al dimming. Su una singola linea DMX512 si

possono collegare fino a 32 dispositivi. Il flusso di dati DMX è unidirezionale, e non include nessuna possibilità di ricevere report sul funzionamento degli apparecchi.

Il dimming all'interno di questi sistemi è solitamente implementato in due modi. Il primo metodo utilizza un'unità specifica di dimming DMX (chiamata *dimmer pack*) che fornisce diversi output AC agli apparecchi illuminanti collegati. Ognuno degli output forniti ha un dimmer interno a taglio di fase, controllato attraverso i segnali DMX.

Il secondo metodo impiega un convertitore DMX-analogico multicanale che fornisce output analogici 0-10V per ogni canale al posto degli output in corrente alternata. Questi output analogici sono utilizzati per controllare quegli apparecchi illuminanti che sono in grado di reagire a un dimming di input del tipo 0-10V.

Il controllo dell'illuminazione LED attraverso l'interfaccia DMX può utilizzare indifferentemente uno dei due metodi, ma il metodo analogico 0-10V è il più semplice e consente un controllo più completo.

#### Network Roam per il controllo dell'illuminazione urbana

In aggiunta all'elenco di interfacce, si cita questo sistema sviluppato dalla Acuity Brands e studiato per il controllo a raggio medio-ampio dell'illuminazione stradale.

Basato su un network wireless a maglia per la connessione dei singoli apparecchi per illuminazione stradale, il Roam non richiede che l'ingresso o la stazione-base sia direttamente connesso ad ogni apparecchio o nodo del network, in quanto il nodo presente in ogni apparecchio può ritrasmettere i dati che riceve, aumentando di fatto il campo della stazione di base, seppur rallentando i tempi di risposta degli apparecchi.

Il sistema Roam fa affidamento sulla specifica IEEE 802.15.4 come base per i livelli fisico e di controllo dell'accesso mediatico del network. L'IEEE 802.15.4 è la stessa specifica utilizzata nei network ZigBee, sebbene lo Zigbee sia stato in realtà progettato per applicazioni a raggio più limitato: il Roam ha sviluppato un network che può arrivare a coprire interspazi tra nodi fino a 300m. Il network Roam utilizza inoltre la stessa frequenza libera a 2,4GHz utilizzata dallo ZigBee, ed entrambi trasmettono dati a 250kb/s: si tratta di una velocità piuttosto bassa se confrontata con la velocità delle connessioni Internet ad alta velocità, ma comunque veloce abbastanza per mandare i comandi di controllo e ricevere i dati sullo stato degli apparecchi.

Il dispositivo che funziona come stazione di base è chiamato gateway, e si connette a un network di apparecchi illuminanti, controllandoli. La Roam ha dimostrato che è possibile inserire fino a 2000 nodi in un network, che però non corrispondono al numero degli apparecchi illuminanti. Il Roam ha aggiunto molto alla specifica 802.15.4: capacità di creare una maglia, di auto-aggiustamento e di auto-formazione. L'auto-formazione implica in particolare che, quando un nodo si accende automaticamente, cerca di comunicare con altri nodi e stabilire un collegamento

con il gateway, mentre con il termine auto-aggiustamento si intende che il network continua a funzionare anche se un nodo si rompe.

Le installazioni dei network Roam possono contare su connessioni Ethernet o cellulari per la trasmissione dei dati dagli apparecchi al nodo di sistema o al centro di controllo. L'Ethernet lavora bene in molti network di dimensioni ridotte. Il cellulare è chiaramente l'unica scelta in installazioni come Los Angeles, che sono invece disperse su un'aria molto vasta. Il carico di dati è molto piccolo in confronto a quello internet: il network tipicamente ha bisogno di 3-5 secondi dal momento in cui è inviato il segnale di comando al momento in cui è ricevuto dal nodo all'interno dell'apparecchio stradale.

Le funzionalità appena discusse vengono facilmente inserite a livello dell'apparecchio stradale. La maggior parte degli apparecchi stradali ha infatti un connettore NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) integrato sulla sommità dell'apparecchio, di modo che sia possibile aggiungere agli apparecchi sensori di rilevamento luminoso, che possono accendere automaticamente i lampioni al tramonto e spegnerli all'alba.

I nodi del network Roam (Fig. 4.12) sono implementati in moduli simili a fotocellule e che si combinano con il connettore NEMA: tali elementi effettivamente includono un fotosensore, ma in aggiunta sono dotati di un nodo di network che è in grado di accendere e spegnere l'apparecchio e un circuito di monitoraggio che può comunicare dati sullo stato di funzionamento dell'apparecchio e sul suo consumo energetico.



Figura 4.12. Elementi principali del network Roam della Acuity Brands.

a) un nodo del network Roam montato sulla cima di un apparecchio per illuminazione stradale.

b) un ingresso Roam wireless collega l'apparecchio per illuminazione stradale via Ethernet o carico di ritorno cellulare.

Il sistema Roam gestisce il dimming separatamente, sotto forma di modulo di controllo del dimmeraggio (*Dimming Control Module, DCM*) da integrare all'interno dell'apparecchio. Il DCM fornisce un output di tipo 0-10V e si connette al driver o ballast standard, anch'esso di tipo 0-10V. Il DCM costituisce un nodo ulteriore del network wireless che prende i comandi dal nodo montato sul NEMA: è per questo che un network di 2000 nodi può non gestire 2000 apparecchi, ma un numero minore.

L'interfaccia NEMA è piuttosto semplice e rende possibile l'aggiunta di elementi di monitoraggio e controllo di accensione e spegnimento a qualsiasi apparecchio collegato, con un tempo di risposta compreso tra i 3 e i 5 minuti. Se utilizzata per interventi di illuminazione ex novo, la scelta migliore è quella di integrare controlli on-off, dimmer e funzioni di monitoraggio direttamente nel driver, e utilizzare un singolo nodo per ogni apparecchio, con un microcontroller per gestire le funzionalità del network e eseguire gli algoritmi di dimmer e controllo: sfortunatamente questo approccio richiede uno standard industriale che è ancora in fase di studio, il 6LoWPAN. Il gruppo di lavoro che sta scrivendo la bozza per tale documento ha definito i meccanismi invio e ricezione dei pacchetti IPv6 all'interno dei network conformi alla IEEE 802.15.4.

L'ultima componente del sistema Roam è il centro di controllo del network, la cui funzione è di supervisionare le operazioni di monitoraggio e controllo: l'accesso a tale sistema può avvenire attraverso una connessione web protetta al portale omonimo, che per il suo funzionamento si basa sulle mappe di deCarta, le stesse utilizzate da Google Maps. Il personale addetto al controllo può visualizzare in questo modo ogni apparecchio stradale all'interno della mappa dell'impianto gestito e accedere facilmente alle funzioni di monitoraggio e controllo.

In alternativa, i dati del Roam possono essere inseriti all'interno di sistemi di Information Technology esistenti: ad esempio, Los Angeles ha già una vasta mappa basata impiegata per il monitoraggio, il controllo e l'organizzazione del funzionamento degli apparecchi stradali (Fig. 4.13).



Figura 4.13. Accesso Roam tramite portale web basato sulle mappe ed accessibile tramite PC.

## Sistemi di controllo intelligenti: valutazione dell'efficienza

Dal punto di vista del sistema, l'efficienza dell'illuminazione dipende da diversi elementi, tutti di primaria importanza, alcuni dei quali sono elencati in Tab. 4.3: dalla tabella, risulta evidente come l'efficienza della sorgente da sola non basta, ma deve essere accompagnata da elementi elettronici efficienti, apparecchi che direzionano la luce senza sprechi, e sistemi di controllo che riducano al minimo l'uso dell'illuminazione.

Tabella 4.3. Elementi per la valutazione dell'efficienza dei sistemi di illuminazione intelligenti.

Elemento	Descrizione	Unità di misura
<i>Efficienza della sorgente</i>	Rapporto tra la potenza assorbita e il flusso luminoso emesso. Per una valutazione accurata di tale parametro, è opportuno calcolare il flusso luminoso nelle tre condizioni di visione dell'occhio umano (fotopica, mesopica e scotopica).	lm /W
<i>Efficienza dell'alimentatore</i>	Rapporto tra la potenza assorbita e la potenza che effettivamente alimenta i LED.	%
<i>Efficienza dell'apparecchio</i>	Rapporto tra il flusso che raggiunge il piano di lavoro (o il target) e la potenza assorbita dall'apparecchio.	lm/W
<i>Efficienza della distribuzione della luce sul piano di lavoro</i>	Rapporto tra gli illuminamenti minimo e massimo sul piano di lavoro e rapporto tra questi e l'illuminamento medio richiesto.	%
<i>Fattore di utilizzazione rapporto tra alimentazione e necessità</i>	Rapporto tra l'energia effettivamente utilizzata per l'illuminazione (legata alla presenza o meno di sensori e di sistemi per il controllo da parte dell'utente) e quella strettamente necessaria.	%

### Efficienza e sensibilità dell'occhio umano

La normativa vigente relativa all'efficienza delle sorgenti luminose non prende in considerazione le differenze tra visione fotopica (diurna), mesopica (crepuscolare) e scotopica (notturna) dell'occhio umano. Per la medesima sorgente, la differenza di efficienza luminosa nelle tre condizioni può essere anche molto elevata: come mostrato in Fig. 4.14, una sorgente con una CCT elevata (in questo caso è portata ad esempio una lampada a ioduri metallici) ha efficienze diverse da una con una CCT più bassa (in questo caso una lampada ai vapori di sodio ad alta pressione). Questo spiega perché apparecchi LED per illuminazione stradale con un flusso luminoso inferiore rispetto a

quello delle lampade che normalmente sostituiscono, danno la percezione di un illuminamento maggiore sul piano stradale rispetto alle lampade ai vapori di sodio ad alta pressione. La sorgente in sé può apparire più luminosa, ma questo fatto è invece legato a problemi di abbagliamento.

Sia la CCT che il CRI sono importanti perché il flusso luminoso necessario varia sulla base di questi fattori.

### Fattore di utilizzazione

I primi quattro elementi riportati in Tab. 4.3 sono stabili, o comunque lentamente variabili. Il quinto elemento riguarda la differenza tra la luce fornita in relazione a quella effettivamente necessaria. Il fattore di utilizzazione è una combinazione della percentuale di tempo in cui le sorgenti sono in funzione e, quando lo sono, dell'intensità della luce in confronto a quella richiesta. Una regolazione dell'illuminazione ottimizzata è essenziale per migliorare il fattore di utilizzazione quindi ridurre i consumi energetici.

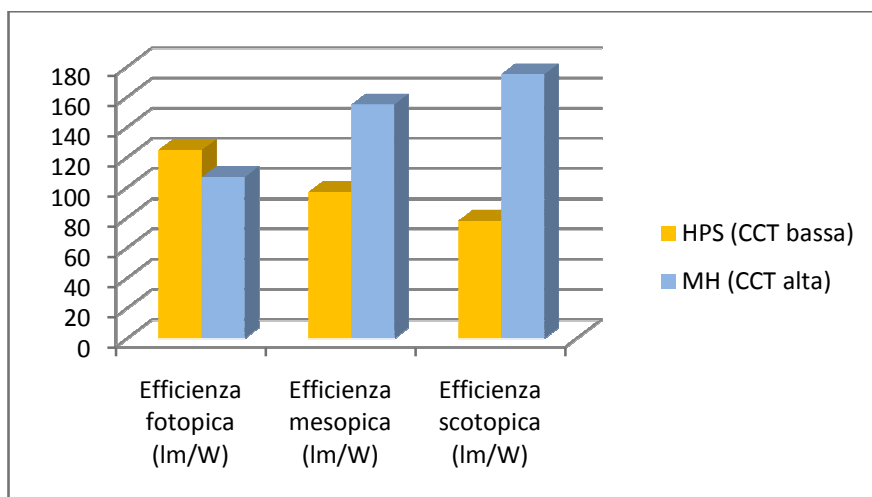


Figura 4.14. Confronto tra le efficienze luminose fotopica, mesopica e scotopica di una sorgente luminosa con CCT elevata (a ioduri metallici, MH) e una con CCT bassa (ai vapori di sodio ad alta pressione, HPS).

I sistemi di controllo possono essere equipaggiati con sensori di presenza realizzati secondo varie tecnologie, inclusi i sensori di presenza infrarossi (*Passive InfraRed*, PIR), i sensori di presenza a ultrasuoni, capacitivi o microfoni MEMS-based, e videocamere digitali in grado di elaborare le immagini. I sensori di movimento sono relativamente poco costosi e sono quelli più spesso utilizzati sebbene una combinazione di un sensore di movimento con un altro metodo di rilevamento di presenza possa fornire una risposta più efficiente, in quanto sensori che utilizzano tecnologie diverse diminuiscono le probabilità di comportamenti erronei, massimizzando la precisione e diminuendo il consumo energetico. Attualmente sono disponibili sensori dual-loop in



grado di distinguere la luce naturale da quella artificiale di modo tale che l'apparecchio possa mantenere un livello di illuminamento costante su un certo piano di lavoro.

### Compensazione del decadimento del flusso luminoso

La regolazione del flusso luminoso degli apparecchi LED è molto importante per via della loro elevata durata di vita: come detto, il flusso luminoso degli apparecchi LED diminuisce progressivamente nel tempo per cui i produttori, per garantire un L70 tra 35000 e 100000 ore, offrono un flusso iniziale circa del 30% superiore a quello richiesto, causando un consumo di energia (Fig. 4.15).

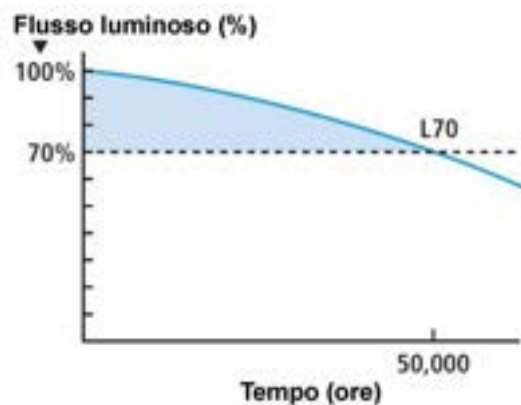


Figura 4.15. Molti apparecchi LED sprecano energia (area evidenziata in azzurro) perché inizialmente hanno un flusso superiore a quello richiesto per bilanciare il decadimento del flusso ed assicurare una L70 sufficientemente lunga.

Gli apparecchi intelligenti possono regolare il flusso luminoso abbassando il livello iniziale e aumentandolo nell'arco di vita dell'apparecchio (Fig. 4.16): i benefici secondari di questa possibilità includono una migliore stabilità del colore, risparmi energetici e minori carichi termici, che sono legati ad un allungamento ulteriore della vita dell'apparecchio. A fronte di questi vantaggi, la regolazione del flusso luminoso costituisce una sfida tecnologica non indifferente: è possibile utilizzare un algoritmo predittivo che stimi l'efficienza o il flusso luminoso emesso dal LED sulla base delle ore di funzionamento e della temperatura rilevata, ma il comportamento del LED nel tempo non è ancora prevedibile in maniera attendibile. In alternativa, è possibile aggiungere un sensore che misuri il flusso luminoso durante i periodi di funzionamento, ma è difficile o impossibile trovare la posizione ottimale per tale elemento, oltre al fatto che lo sporco può provocare una riduzione delle emissioni in uscita dall'apparecchio, compromettendo le misurazioni.

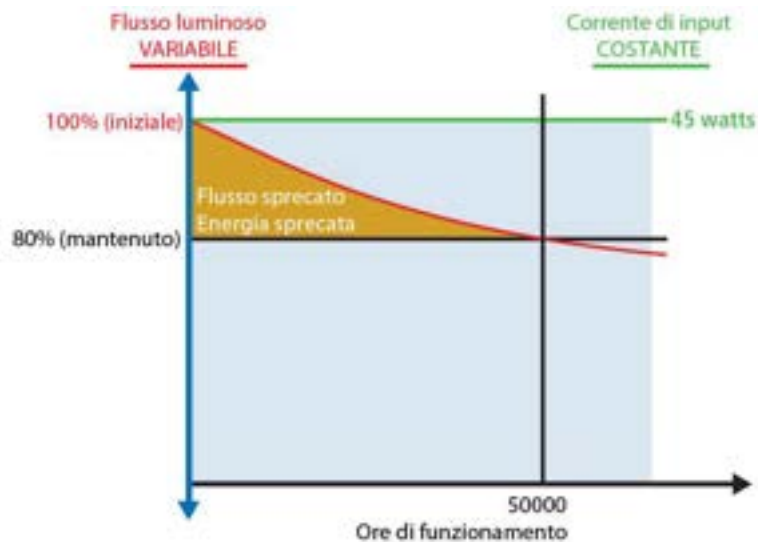


Figura 4.16. Grazie ai sistemi di illuminazione intelligente è possibile adattare l'alimentazione (curva rossa) per fornire un flusso luminoso costante (linea orizzontale nera) evitando sprechi energetici.

### Schemi di funzionamento innovativi

Come ampiamente discusso, la tendenza attuale è chiaramente orientata verso sistemi che integrino le strategie di controllo e gli elementi smart direttamente all'interno del ballast o del driver; le architetture globali di alimentatori e controlli di questi sistemi probabilmente cambieranno nel prossimo futuro per sfruttare al meglio la tecnologia LED: si consideri ad esempio uno spazio illuminato con apparecchi downlight, schematizzato in Fig. 4.17.

Le lampade sono controllate tramite sensori remoti di presenza e di illuminamento attraverso un PAN wireless, anche se una configurazione cablata avrebbe lo stesso schema. Ogni apparecchio funziona a voltaggio di rete e include i seguenti elementi intelligenti:

- un convertitore da 25W AC/DC;
- un convertitore a corrente costante 25W DC/LED;
- una ricetrasmittente per il PAN wireless;
- un microcontroller (piuttosto costoso) che include una memoria flash per protocolli stratificati (protocolli *stack*)
- un controllo del consumo energetico;
- sensori opzionali (di temperatura, di flusso luminoso, di colore).

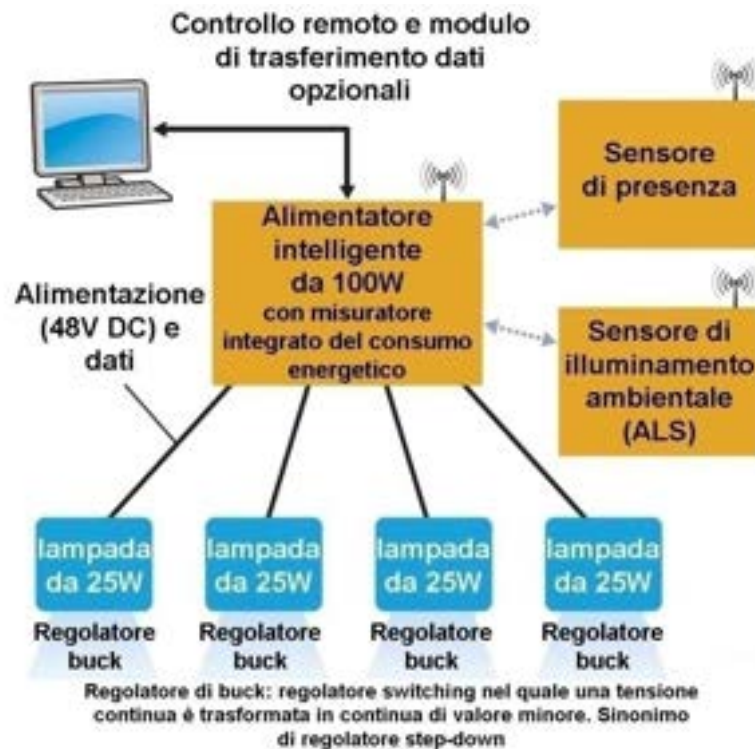


Figura 4.17. In questo sistema di illuminazione intelligente relativamente costoso, ogni apparecchio illuminante include un alimentatore AC/DC e una ricetrasmittente per il collegamento wireless al network di controllo.

Come mostrato in Fig.4.17, i dati acquisiti dalla MCU (*Memory Control Unit*) possono essere inoltrati dal nodo remoto a un centro di controllo che registri il consumo energetico. Questo sistema, se da un lato è perfettamente funzionale, dall'altro è costoso da implementare. Un alternativa a questo sistema è mostrata in Fig. 4.18.

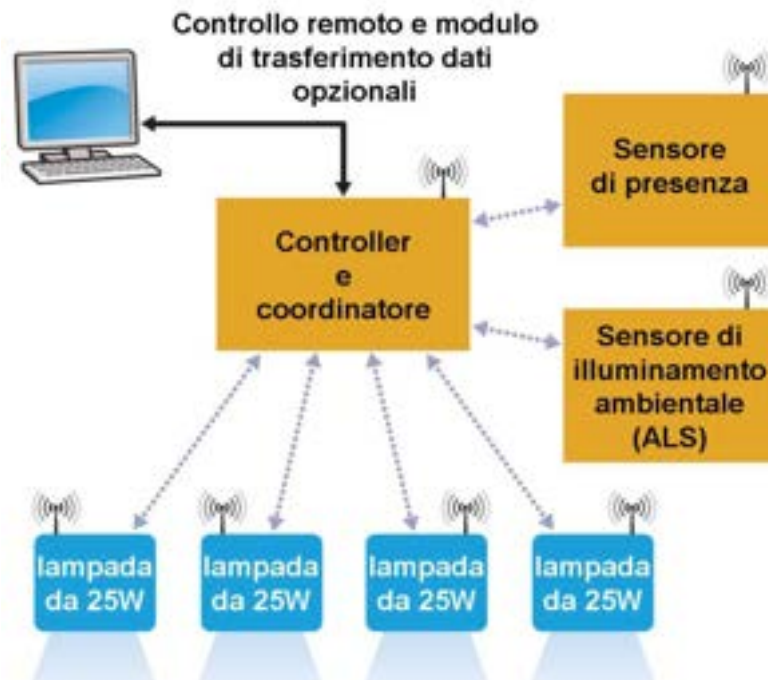


Figura 4.18.

Un alimentatore centralizzato e una semplice rete di collegamento cablata all'interno di un ambiente forniscono un sistema di illuminazione intelligente e low-cost.

In questo caso, l'alimentatore da 100W incorpora l'elemento di controllo e coordinamento per l'ambiente, ed è quindi capace di comunicare direttamente con i sensori e l'interfaccia di controllo remoto e trasmissione dati. In questo caso, ogni apparecchio contiene:

- un convertitore a corrente costante 25W DC/LED;
- un microcontroller poco costoso;
- sensori opzionali (di temperatura, di flusso luminoso, di colore).

Dal punto di vista dell'alimentazione, un convertitore da 100W AC/DC è più efficiente energeticamente e meno costoso rispetto ai quattro convertitori da 25W AC/DC. Il controllo del consumo energetico è svolto dall'alimentatore centrale piuttosto che da un elemento posto all'interno di ogni apparecchio. Le lampade comunicano con l'alimentatore attraverso un'interfaccia cablata semplice e poco costosa, e quindi contengono un microcontroller anch'esso semplice e poco costoso, un protocollo stack più "leggero" e nessuna ricetrasmittente. Infine, se non è necessario l'impiego di sensori opzionali, non serve alcun elemento elettronico all'interno dell'apparecchio illuminante, e l'alimentatore da 100W può mandare una corrente costante direttamente alla lampada.

## **Criteri di base per la scelta di apparecchi LED da utilizzare all'interno di sistemi intelligenti**

Poiché, come detto, i sistemi intelligenti per il controllo dell'illuminazione pongono alcune questioni di compatibilità, si forniscono, in chiusura di capitolo, alcune utili e sintetiche indicazioni per la valutazione degli apparecchi dimmerabili da impiegare.

### Dimming.

Relativamente a questa funzione, è importante valutare tre aspetti principali:

- il voltaggio di input;
- il tipo di dimming;
- la qualità e la performance del dimmer.

*Voltaggio di input.* Gli apparecchi che funzionano a basso voltaggio, come ad esempio le lampade con fattore di forma MR16 a 12 o 24 V AC, difficilmente sono dotati di driver compatibili con i dimmer TRIAC presenti come elementi di controllo nei comuni impianti elettrici.

*Tipo di dimming.* I dimmer TRIAC non sono progettati per interfacciarsi con i sistemi LED, ma sono molto diffusi: è possibile che un driver LED dimmerabile AC/DC funzioni solamente con metà dei dimmer TRIAC installati. Il driver può inoltre essere incapace di decodificare in maniera corretta l'estremo inferiore e superiore del range di dimming, reagendo così solo al 20-40% dell'ampiezza del range senza causare flicker, specialmente nella zona a basso voltaggio. Se poi il comando di dimming viene da un microcontroller, la corrente dalla linea AC ha bisogno di essere manipolata in modo appropriato: i driver standard AC/DC non sono pensati per alimentare un micro controller, il cui input massimo è di 5V. Tale dispositivo necessita inoltre di un segnale di input che controlli le modifiche della forma d'onda dell'output di dimming, fatto che può porre a sua volta il problema del supporto di un network di comunicazione per trasportare l'informazione di dimming.

*Qualità e performance del dimmer.* La valutazione della forma d'onda del dimming è importante perché i circuiti di regolazione non sono tutti uguali. Nominalmente il dimming è eseguito attraverso un segnale PWM, che può produrre interferenza elettromagnetica, con conseguente flicker dei diodi. Alcuni driver utilizzano controlli pseudo-random del segnale PWM per contrastare tale fenomeno. La performance di dimming può essere compromessa se il controllo digitale non riesce a regolare la luce in maniera sufficientemente graduale. Una forma d'onda PWM a 8 bit offre solamente 256 livelli (step) per dimmerare una stringa di LED bianchi: specialmente nella

parte inferiore del range di dimming, questi step possono diventare visibili all'utente. In compenso, un PWM a 16 bit offre una gamma di oltre 65000 step, consentendo una curva di dimming molto più definita.

### Feedback

Tutti i sistemi LED dovrebbero essere in grado di monitorare in modo appropriato almeno alcuni parametri all'interno dei loro circuiti, come il sovraccarico, il corto circuito, il circuito aperto e le fughe termiche. In Fig. 4.19 è mostrato un esempio di circuito che consente tale operazione: il sistema è basato su un trasformatore (rappresentato a tratteggio) che crea un circuito isolato. Il circuito stesso è in grado di percepire ciò che accade al carico attraverso un winding terziario del trasformatore, situato a valle, posizione in cui può ricreare internamente la forma d'onda e aggiustare l'alimentazione dei LED. Tale circuito include inoltre un sensore di temperatura che provoca lo spegnimento se essa sale al di sopra di un valore prestabilito, che solitamente è la temperatura di giunzione di soglia fornita dal produttore.

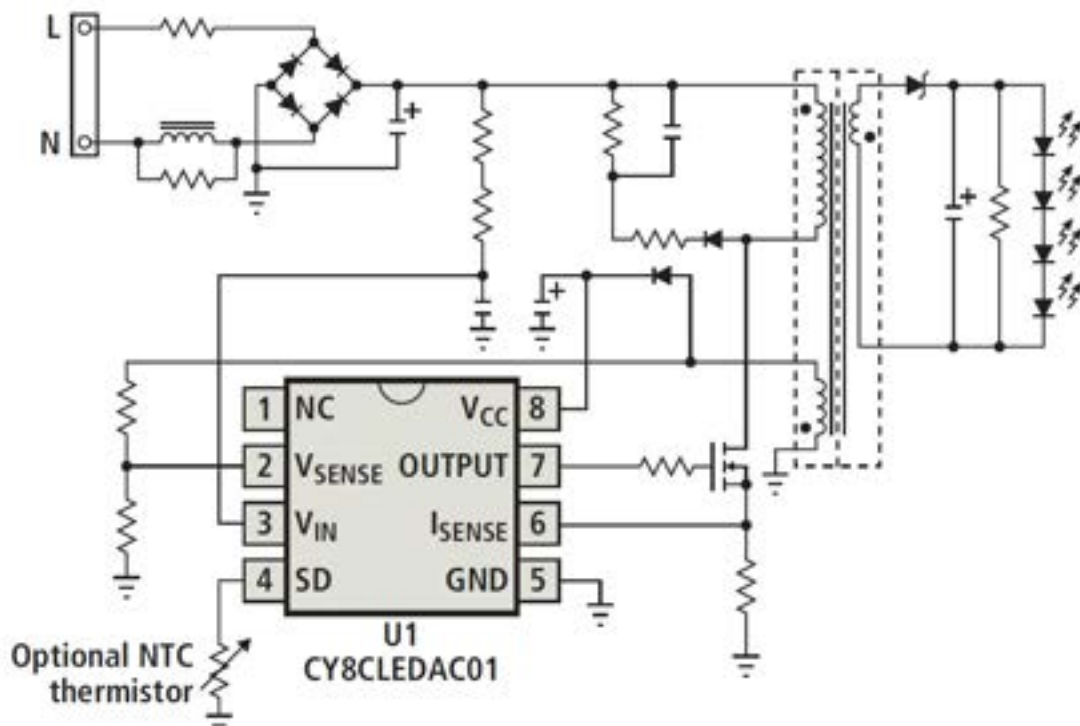


Figura 4.19. Anche in un circuito isolato dove è un trasformatore ad alimentare i LED, il driver può usare il feedback da un winding terziario posto a valle del trasformatore (elemento in grigio) per aggiustare il segnale di alimentazione sulla base delle caratteristiche di funzionamento.

Un sistema intelligente e alimentato da un microcontroller può implementare un algoritmo di compensazione della temperatura utilizzando un termistore situato vicino ai diodi: dopo aver letto la temperatura del PCB, esso calcola la temperatura di giunzione, uguale alla temperatura

misurata più il prodotto della resistenza termica del supporto, la corrente costante di alimentazione dei LED e il voltaggio di mandata dei LED, tutti dati forniti dal produttore. La temperatura calcolata può poi essere usata per valutare l'entità di eventuali aggiustamenti da fare alla corrente o al voltaggio di mandata per mantenere il flusso luminoso (o le coordinate cromatiche desiderate, se si tratta di LED RGB) all'interno del range desiderato.

## Driver

Per motivi di costo, molti produttori utilizzano un'implementazione lineare che, però, può diminuire fino al 50% l'efficienza globale del sistema, annullando i benefici dell'impiego di sorgenti LED. Le implementazioni switching impiegano solitamente un convertitore DC/DC di tipo step-down o step-up: molti tipi di driver in commercio supportano questo tipo di tecnologia, ma tra questi è bene valutare alcune caratteristiche che possono influenzare la performance.

*Frequenza di switching.* Un driver capace di fare lo switching a 1,5MHz piuttosto che a 1,0MHz ha un induttore di dimensioni ridotte, il che è utile specialmente per gli apparecchi per retrofitting.

*RDSon.* Tale parametro è associato al MOSFET ad alto voltaggio che esegue lo switching dell'output e in alcuni casi è integrato nel driver del circuito integrato. Se il valore RDSon è troppo alto, ad esempio oltre 1 Ohm, si verifica eccessiva dissipazione di calore nel sistema e quindi una forte diminuzione dell'efficienza.

*Specifiche sull'efficienza del driver.* L'efficienza del regolatore di switching può arrivare al 95%, ottimizzando l'efficienza globale del sistema, oppure può essere molto più bassa, ragion per cui è un parametro da valutare.

In fig. 4.20 è rappresentata un ipotetico bulbo per retrofitting, che prende il voltaggio di linea, come ad esempio 120V AC e lo abbassa attraverso un micro controller che gestisce il dimming TRIAC dei LED. Tale approccio è simile a quello di generazione del segnale PWM visto prima, ma in questo esempio esso si interfaccia inoltre con un sensore di movimento, dispositivo esterno di costo contenuto che può essere implementato in un sistema di illuminazione e che è in grado di individuare la presenza di individui in un ambiente, accendendo automaticamente gli apparecchi.

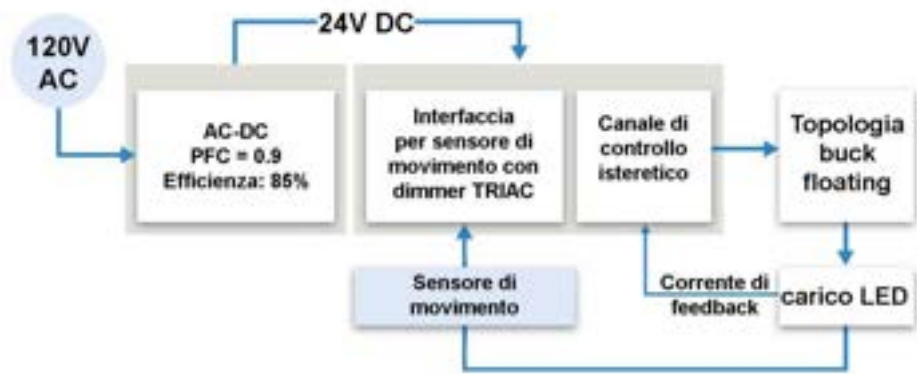


Figura 4.20. Modello a blocchi di un prototipo di lampada LED per retrofitting che dimostra come caratteristiche come i sensori di movimento possano aggiungere valore all'apparecchio.



## Capitolo 5

### Illuminazione stradale

*Il principale settore per lo sviluppo dell'illuminazione SSL è attualmente quello stradale, complici gli incentivi che vari enti nazionali e sovranazionali forniscono alle municipalità che vogliono impiegare tale tecnologia.*

*Accanto ai grandi benefici, costituiti dal risparmio energetico, dalla riduzione dell'inquinamento luminoso e dalle possibilità di impiego di sistemi di controllo, questo settore porta con sé ancora molti problemi: tra questi, l'EPRI ha individuato il principale nell'assenza di dati definitivi sulla durata di vita e sull'effettivo risparmio energetico dei diodi. Se si pensa che il 13% delle prime lampade stradali ai vapori di mercurio installate nel 1938 sono ancora in funzione negli USA, appare in tutta la sua serietà il problema della raccolta a lungo termine di dati sul campo.*

*Un altro punto molto importante e poco noto è legato all'efficienza dei driver LED attualmente in commercio, che per varie ragioni sono molto meno efficienti di altri di uso comune, come ad esempio quelli che alimentano i computer. Se poi il driver lavora in associazione con un dimmer, l'efficienza diminuisce del 10% circa, e a basse temperature un altro 6% viene tolto all'efficienza del sistema.*

## **Progetti pilota e programmi di ricerca sull'illuminazione stradale**

La tecnologia LED per l'illuminazione stradale si è sviluppata solo molto recentemente, per cui in tutto il mondo si stanno svolgendo programmi di ricerca e sviluppo orientati a raccogliere dati sul lungo periodo riguardo il funzionamento e l'affidabilità: in particolare, si darà nel seguito breve cenno dell'attività svolta da enti governativi come l'EPRI (Electric Power Research Institute) e il DOE (*Department of Energy*) e di quella svolta dal consorzio di municipalità denominato LightSavers e promosso dal TAF (*Toronto Atmospheric Fund*).

### I siti dimostrativi dell'EPRI

L'EPRI è un ente di ricerca degli Stati Uniti con finalità di studiare tutto ciò che è connesso all'energia elettrica allo scopo di ridurre l'emissione di gas serra, favorire i risparmi energetici e divulgare i risultati ottenuti. Questa istituzione sta attualmente gestendo oltre 20 progetti pilota di tecnologie di illuminazione LED negli USA: l'obiettivo è la raccolta della maggior quantità possibile di dati, valutando allo stesso tempo miglioramenti nelle modalità di acquisizione, misurazione, elaborazione e valutazione degli stessi.

Sulla base dei primi dati raccolti, nel 2008 il DOE ha stimato i risparmi potenziali dei LED in 4500MWh all'anno se i LED riuscissero a raggiungere il 100% di penetrazione come illuminazione stradale. Unendo questo dato alla semplice constatazione che il 13% delle prime lampade ai vapori di mercurio, che furono installate nel 1938, sono ancora in funzione, è facile arrivare a concludere che prima di adottare i LED su scala globale sia assolutamente necessario monitorare i consumi energetici, verificare i livelli di illuminamento, e tracciare l'affidabilità e la performance nel tempo.

L'EPRI sviluppa un piano analitico globale progettato per rispondere alle domande di tre attori principali:

- i fornitori di energia, che chiedono informazioni sull'influenza della distribuzione massiva di lampadine LED sul profilo di carico della rete elettrica in termini di risparmi energetici stagionali;
- i proprietari di impianti di illuminazione, come ad esempio i comuni, che hanno bisogno di sapere se l'illuminazione LED consenta effettivamente i risparmi energetici dichiarati e in cosa sia diversa, dal punto di vista della manutenzione, rispetto ai sistemi tradizionali;
- gli utenti, siano essi pedoni o automobilisti, che necessitano di informazioni sull'aspetto estetico e la sicurezza in confronto all'illuminazione tradizionale.

Relativamente allo studio e alla performance dell'illuminazione LED stradale e per aree, l'EPRI ha coniato il termine "*Defined-Area Efficacy*" (DAE), che descrive la performance sul campo nel tempo. L'EPRI misura e calcola l'illuminamento all'interno di una griglia e divide il risultato per la

potenza elettrica misurata. Il quoziente risultante è confrontato con le misure effettuate durante il corso di un intervallo di test, che nel caso dell'EPRI è di circa due anni. La misura del DAE è simile alla "*Fitted Target Efficacy*" (FTE), proposta dal DOE: a differenza di questa, però, il DAE non è una simulazione al computer, ma una misura della performance sul campo.

La selezione di apparecchi da testare è stata complessa: l'EPRI ha preselezionato diversi produttori utilizzando criteri che includevano un'ispezione visiva della qualità tecnica di realizzazione e la sopravvivenza a un test di vita accelerata utilizzando un contenitore a 50°C con l'apparecchio alimentato non-stop per mesi.

Lo scopo finale del progetto è la raccolta di dati sul campo: il metodo standard di misura richiede di utilizzare una griglia, piazzando a mano il sensore all'intersezione delle linee e registrando le letture. In aggiunta all'efficienza, l'EPRI è interessata anche alla verifica del risparmio energetico: su ogni sito dimostrativo, la EPRI ha installato un contatore elettrico con la capacità di trasmettere i dati wireless ad un server situato all'interno della sede dell'organizzazione; lo scopo è verificare i risparmi energetici nel tempo, e se ogni sito si comporta come ci si aspetta dal punto di vista energetico. I primi risultati sul campo hanno dimostrato che l'illuminazione LED può in alcune applicazioni fornire un'illuminazione accettabile, e risparmio energetico.

Contrariamente a quanto generalmente ritenuto, il rapporto tra risparmio energetico e risparmio economico non è lineare: è infatti raro che una riduzione del 50% nel consumo energetico corrisponda ad una riduzione del 50% sulla bolletta dell'energia elettrica, ma piuttosto un 15%, perché il restante 35% è utilizzato per coprire i costi accessori, come l'acquisto e l'installazione dei pali e la manutenzione.

Per un comune driver LED, il valore standard dell'efficienza è attorno al 92% : si tratta di un valore elevato, ma che è sicuramente possibile migliorare ulteriormente. Tra i risultati più importanti ottenuti dall'EPRI attraverso questa ricerca ne vanno segnalati due in particolare, che riguardano entrambi il consumo dei driver LED in condizioni particolari.

*Efficienza e dimming.* La Fig. 5.1a mostra l'efficienza di un comune driver LED in funzione del carico di corrente, considerato nell'intervallo dal 20% al 100%. Dal diagramma, risulta evidente che l'efficienza del driver è funzione del carico: poiché lo scopo da perseguire con l'alimentazione LED è l'efficienza energetica, e poiché tale tecnologia è pensata per essere utilizzata in associazione con tecnologie di dimming, è necessario studiare driver con un'efficienza più elevata e più costante, altrimenti si corre il rischio di diminuire il flusso luminoso emesso e non ottenere i vantaggi sperati in termini di risparmio sui consumi.

*Efficienza e temperatura.* Un'altra caratteristica poco nota degli apparecchi LED, è che essi richiedono più energia per funzionare alle basse temperature rispetto a quanta ne richiedano a temperature più elevate. La Fig. 5.1b mostra i risultati di un test termico svolto dall'EPRI: il

diagramma mostra come l'apparecchio a ioduri metallici non presenti una relazione tra corrente e temperatura, diversamente dall'apparecchio LED, in cui la temperatura ambiente ha un forte impatto sul risparmio energetico. A titolo di esempio, dai risultati emerge che un risparmio sui consumi energetici pari al 30% ricavato a una temperatura di 25°C diminuisce del 5% se la temperatura scende a -20°C.

Esiste infine una non trascurabile differenza tra l'input dichiarato dai produttori e l'input effettivo: la variazione media è del 4% con picchi oltre il 6%. Le lampade tradizionali a scarica di gas (HID) mostrano anch'esse variazioni di questo genere: in entrambi i casi è necessario verificare attentamente i dati dichiarati, perché sia garantito il risparmio energetico.

Anche il voltaggio di alimentazione può avere conseguenze sul consumo energetico e sull'efficienza. A titolo di esempio, si riporta un'esperienza recente: in un sito alimentato a 480V, gli apparecchi non erano ottimizzati, ma forniti di autotrasformatore per facilitarne il funzionamento con quell'alimentazione: tale dispositivo aumentava del 7% la corrente di alimentazione dell'apparecchio, causando quindi una perdita di energia del 7% all'interno dei circuiti.

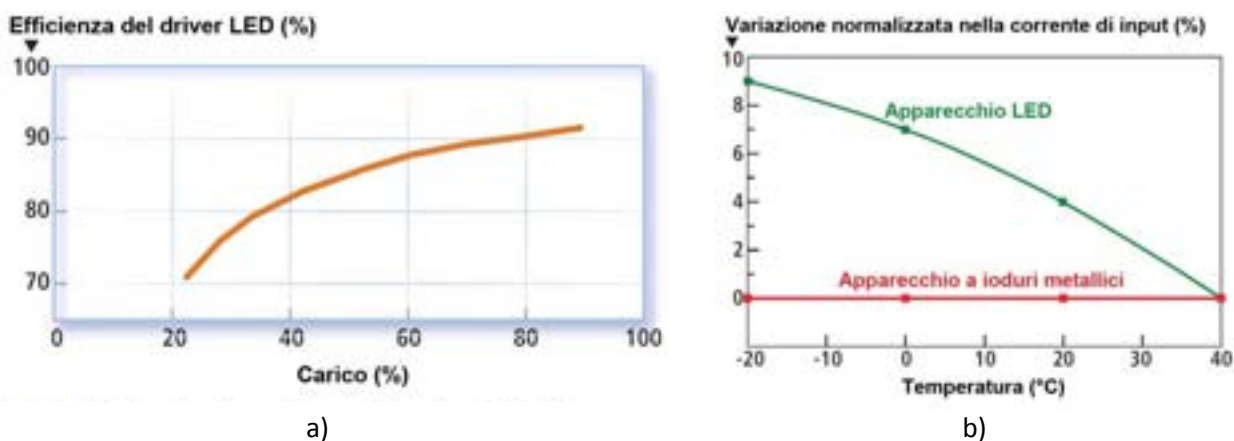


Figura 5.1. Corrente di input fornita da un driver LED.

- a) All'aumentare del carico, il driver opera in maniera più efficiente.
- b) Le temperature basse aumentano in modo significativo il consumo degli apparecchi LED.

### Le ricerche del DOE

Il DOE (Department of Energy) degli Stati Uniti si occupa da alcuni anni dell'illuminazione LED, sia dal punto di vista della raccolta di dati all'interno di siti dimostrativi, sia in laboratorio, valutando le caratteristiche degli apparecchi LED e adoperandosi per creare uno standard di valutazione.

### *Programma GATEWAY*

Il DOE ha creato un programma di ricerca e sviluppo sull'illuminazione energeticamente efficiente, la cui strategia di ricerca a tutto campo riguarda i campi dell'energetica, dell'elettronica, della

chimica, dello sviluppo di prodotti, della ricerca sulle tecniche di produzione, del supporto alla commercializzazione e dello sviluppo di standard.

### *Programma CALIPER*

Il *Commercially Available LED Product Evaluation and Reporting* è un programma sviluppato dal DOE al fine di standardizzare la valutazione dei parametri di tutti i tipi di apparecchi LED per illuminazione generale. I documenti presenti sul sito comprendono il "Roundtable Report" per il 2010. I risultati del test CALIPER, svolti già su diverse centinaia di prodotti, servono:

- per guidare le attività di introduzione della tecnologia SSL nel mercato, incluso il programma Energy Star;
- per fare da supporto al programma GATEWAY;
- per fornire informazioni oggettive sulla performance del prodotto, aiutando gli utenti ad acquisire fiducia nella nuova tecnologia e nelle dichiarazioni dei produttori.

A tal proposito, l'ente ha attrezzato un Laboratorio, il PNNL (Pacific Northwest National Laboratory), dove vengono svolti i test Caliper. Tra i risultati notevoli ottenuti quest'anno, vanno segnalati quelli riguardanti gli apparecchi SSL T8, cioè quegli apparecchi LED per il retrofitting di tubi fluorescenti. I test del programma Caliper hanno rivelato che le lampade LED per retrofitting hanno la stessa efficienza di quelle fluorescenti: mentre l'attenzione e il clamore si spostano progressivamente sui progressi dell'illuminazione SSL, infatti, anche le lampade fluorescenti progrediscono tecnologicamente, tanto da arrivare ad efficienze di 100lm/W comprensive delle perdite nel ballast, mentre le efficienze dei LED vengono sempre fornite depurate dalle perdite dovute al driver.

### *Municipal Solid-State Lighting Consortium*

A maggio 2011, il Consorzio per l'illuminazione stradale municipale del DOE ha pubblicato le bozze delle specifiche per apparecchi di illuminazione stradale. I documenti, redatti in forma di modello per gli acquirenti di apparecchi stradali che abbiano intenzione di utilizzare la tecnologia LED, sono:

- il documento principale (Fig. 5.2a,b) include sezioni sui singoli prodotti, come la garanzia, la temperatura di colore, gli elementi relativi alla progettazione ambientale, i requisiti elettrici come i connettori e i requisiti meccanici di montaggio;

- l'appendice A, contenente le specifiche relative ai parametri ottici ed elettrici dell'apparecchio; pubblicata in due versioni, quella "semplificata" a cui ci si riferisce come specifica materiale copre un set di parametri relativamente ristretto, come la conformazione del fascio luminoso, la potenza assorbita, il flusso emesso e la temperatura di colore; la versione completa riporta invece le specifiche di sistema e include un set di requisiti molto più dettagliato, includendo l'uniformità della luce e la luminanza al livello del suolo;
- l'appendice B, specifica per la valutazione del decadimento del flusso.

Un utente, come ad esempio una municipalità, che vuole investire in un progetto LED, combinerà la scelta basata sull'Appendice A con i contenuti del documento principale: lo scopo dei documenti è quello di facilitare la comprensione delle caratteristiche dei vari apparecchi al fine di fare la scelta migliore e facilitare la comunicazione tra utenti, produttori, distributori e progettisti illuminotecnici.

Nelle due pagine seguenti è riportato integralmente il testo del documento principale, in lingua inglese.

## Outdoor Lighting Guidance

Many municipalities and other organizations are considering outdoor lighting energy efficiency upgrades and have requested DOE assistance in evaluating outdoor luminaires (lighting fixtures). This document provides basic guidance for common outdoor lighting applications: wall-mounted area lighting, parking garage lighting, canopy lighting, and pole mounted street and area lighting. Minimum performance recommendations are provided for lifetime, warranty, energy efficiency, and light distribution.

For All Luminaires		
Life/Lumen Maintenance	Light sources used in qualified luminaires should have minimum estimated lifetimes as follows: <ul style="list-style-type: none"> <li>For LED products, 35,000 hours. See Guide to Evaluating LED Lumen Maintenance: <a href="http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/guide_lumen_maintenance.pdf">http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/guide_lumen_maintenance.pdf</a></li> <li>For other source types, 20,000 hours. See rated lamp life and lumen maintenance and mortality curves provided by lamp manufacturer.</li> </ul>	
Uplight and Glare	Should be appropriate for project Lighting Zone(s) as per the Commercial Building Energy Alliances (CBEA) LED Site Lighting Performance Specification, Tables 6-8 and Appendix B: <a href="http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/alliances/cbea_led_site_lighting_spec.pdf">http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/alliances/cbea_led_site_lighting_spec.pdf</a>	
Warranty	A warranty should be provided for luminaires, covering repair or replacement of any defective parts (including light source, housings, seals, power supplies, and any ancillary components necessary for proper functioning of the luminaire) for a minimum of three (3) years from the date of purchase.	
By Luminaire Type		
	Minimum Luminaire Efficacy (lumens per watt)	Zonal Lumen Guidelines (Angles are given from nadir; 0° is straight down, 90° is horizontal, and 180° is straight up)
Outdoor Wall-mounted Area Luminaires ("Wall Packs")	52 lm/W	<ul style="list-style-type: none"> <li>No more than 48% of total luminaire output within the forward 60-80° zone (FH).</li> <li>No more than 3% of total luminaire output in the forward 80-90° zone (FVH).</li> <li>No light at or above horizontal (90-180° zone).</li> </ul>
Parking Structure Luminaires	70 lm/W	<ul style="list-style-type: none"> <li>At least 30% of total output within the 60-80° zone.</li> <li>No more than 20% of total output above 80°.</li> </ul>
Canopy Luminaires	70 lm/W	<ul style="list-style-type: none"> <li>At least 30% of total output within the 40-60° zone.</li> <li>No more than 20% of total output above 80°.</li> </ul>
Outdoor Pole-mounted Area and Roadway Luminaires	See guidelines below	

Figura 5.2a. Documento del DOE di guida alla scelta dell'illuminazione stradale – pagina 1.

### Guidelines for Outdoor Pole-Mounted Area and Roadway Luminaires

Fitted Target Efficacy (FTE) evaluates how efficiently a luminaire delivers light to its estimated target area. Suggested minimum requirements are given in the table below, as a function of luminaire output and house-side shielding (some pole locations may require backlight control to reduce light trespass onto neighboring properties).

Initial Luminaire Output	Shielded [uniform light pool extends less than 1.5 mounting heights (MH) behind the light pole (i.e., house-side)]			Unshielded [uniform light pool extends 1.5 mounting heights or more behind the light pole (i.e., house-side)]		
	Low Output < 7,500 lumens	Mid Output	High Output > 23,500 lumens	Low Output < 10,500 lumens	Mid Output	High Output > 33,000 lumens
Minimum Initial Fitted Target Efficacy (lm/W)	30	38	48	38	49	62

FTE is calculated using standard luminaire photometry (IES-format as per LM-63-02). DOE provides a software tool that reads the IES-format file and provides the FTE value: see [http://www.eere.energy.gov/buildings/ssl/downloads/fte\\_calculator.exe](http://www.eere.energy.gov/buildings/ssl/downloads/fte_calculator.exe). The tool automatically categorizes the luminaire by whether it is effectively shielded (to reduce light trespass) or not shielded, and then by light output: low, mid, or high. See [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/fte\\_performance\\_metric.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/fte_performance_metric.pdf) for additional information regarding the FTE metric and software tool.

NOTE: The above guidelines do not specify minimum light output or the horizontal distribution of light (e.g., Type II Medium). For any given product line, the appropriate lumen package and optical system must be selected by the lighting system owner to ensure light level and uniformity requirements are satisfied.

#### Ask manufacturer for the following information:

- Photometric data
  - For all products: photometric data in standard IES data format defined in LM-63-02
  - Additionally, for LED products, request original IES LM-79-08 report from a qualified independent laboratory
    - See [http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/test\\_labs.html](http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/test_labs.html)
- Lifetime data
  - For LED products:
    - Documentation as recommended in the Guide to Evaluating LED Lumen Maintenance: see [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/guide\\_lumen\\_maintenance.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/guide_lumen_maintenance.pdf)
  - For other lighting products:
    - Lamp life rating
    - Lamp lumen depreciation curve
    - Lamp mortality curve
- Written warranty

Figura 5.2b. Documento del DOE di guida alla scelta dell'illuminazione stradale – pagina 2.



## Report aziendali: Cleantech Approach (CTA) e Lux Research

Oltre all'operato degli enti governativi, anche le grandi aziende produttrici di apparecchi LED svolgono la loro attività di ricerca.

Nei due report recentemente pubblicati dalla Cleantech e dalla Lux Research, viene fatta esplicita richiesta affinché, nelle ricerche sull'illuminazione LED, sia valutata e studiata l'integrazione dei sistemi di regolazione e controllo con l'illuminazione LED: lo scopo di tali ricerche è quello di approdare ad una gestione ottimizzata del flusso luminoso, che consenta un ulteriore aumento del risparmio energetico e della durata di vita degli apparecchi.

Entrambi i report sopracitati focalizzano l'attenzione sull'illuminazione LED per le applicazioni commerciali. In particolare, il report della CTA, relativo all'analisi dei sistemi di controllo per l'illuminazione, stabilisce come obiettivo per gli apparecchi SSL un risparmio energetico dell'ordine del 35-55%, ponendo l'accento sulle necessità di compatibilità nel tempo tra sistemi di controllo e apparecchi illuminanti. Tale documento si occupa inoltre della stima dei risparmi e dei periodi di payback dell'investimento, prendendo in considerazione sia i costi per l'adeguamento tecnologico dell'illuminazione, sia il potenziale risparmio energetico. Tale analisi si conclude affermando che, nelle condizioni più sfavorevoli, un progetto costerebbe circa 20€/m<sup>2</sup>, ridurrebbe i consumi del 35% e avrebbe quindi un periodo di payback di 10.7 anni, mentre nel caso migliore un progetto costerebbe 7,5€/m<sup>2</sup> e risparmierebbe il 55% dell'energia, con un periodo di payback di 2.7 anni.

Il report pubblicato dalla Lux Research, invece, focalizza l'attenzione sul risparmio energetico, fornendo l'interessante stima di una riduzione del 60% del consumo elettrico grazie alla combinazione di sistemi di controllo automatico e di apparecchi LED e fluorescenti entro il 2020. L'idea del funzionamento degli apparecchi stradali LED con una corrente ridotta all'inizio e poi in continuo aumento man mano che si verifica il fisiologico decadimento del flusso pone un problema logistico: un'installazione in rete degli apparecchi consentirebbe il controllo a distanza della corrente e del flusso luminoso, ma avrebbe un costo aggiuntivo significativo. Naturalmente, i Comuni potrebbero controllare manualmente di tanto in tanto il flusso luminoso e fare degli aggiustamenti nella corrente, ma questo andrebbe contro il principio per cui i LED necessitano di scarsa manutenzione. Un Comune può però valutare la performance degli apparecchi stradali su base annua, o per periodi definiti, e prevedere adeguamenti periodici, se necessario; d'altra parte, l'assenza totale di manutenzione non è un fatto realistico: lo sporcamento delle lenti produce una diminuzione del flusso luminoso ed è quindi necessario preventivare manutenzioni periodiche anche con apparecchi LED.

Accanto a questo approccio teorico-pratico, ci sono poi altri programmi, come il consorzio LightSavers, che invece si occupano di valutare l'affidabilità degli apparecchi in commercio, ai fini di guidare la scelta delle municipalità nella delicata transizione tecnologica da un'illuminazione di tipo tradizionale a quella LED.

### Consorzio LightSavers.

In 13 grandi città situate in sette Paesi diversi (dalla Gran Bretagna, agli USA, alla Cina, all'India) e aderenti al consorzio Lightsavers, gli enti per l'illuminazione pubblica stanno conducendo degli studi sul campo preliminari all'adozione su larga scala della tecnologia LED, al fine di verificarne i potenziali benefici.

*New York, USA.* Nell'estate/autunno 2009 il Dipartimento dei Trasporti (DoT) della città di New York ha iniziato i test sul campo dei prodotti LED in due siti: cinque prodotti LED hanno rimpiazzato le lampade a ioduri metallici sui percorsi pedonali di Central Park; inoltre, quattro apparecchi LED hanno sostituito gli apparecchi ai vapori di sodio ad alta pressione lungo una strada di scorrimento a Manhattan. Lo staff del DoT ha raccolto per un anno dati sull'illuminamento su base mensile insieme con misurazioni dei risparmi energetici, della temperatura di colore e della temperatura ambiente.

*Toronto, Canada.* Sono state testate delle lampade LED T8 all'interno di due garage di residenze, precedentemente illuminati con lampade ai vapori di sodio ad alta pressione, in associazione con controlli adattivi che aumentano il flusso quando c'è movimento. La performance è stata convincente: il risparmio energetico è stato del 70%, ed il mantenimento del flusso è stato ottimo, come il gradimento del pubblico.

*Sydney, Australia.* A Sydney sono stati creati quattro siti per test sul campo, dove sono stati montati molti apparecchi LED diversi, inizialmente senza controlli, e in seguito con controlli integrati intelligenti (installati nel 2010).

Rigorosi test sul campo per la valutazione dei prodotti LED si stanno mostrando decisivi in tre delle città appartenenti al consorzio LightSavers, dimostrando che la nuova tecnologia si comporta bene, raggiungendo o superando le aspettative dei potenziali acquirenti. L'accettazione del pubblico, come misurato da sondaggi, è stata anch'essa superiore alle aspettative. Tuttavia, il costo molto superiore dei LED rispetto ad altre tecnologie costituisce ancora una barriera. A parte il progetto di illuminazione per Central Park, che è stato interamente finanziato, le altre città stanno cercando fondi per portare avanti i programmi.

## Selezione di casi studio sull'illuminazione stradale a LED

A settembre 2010, l'*Illuminating Engineering Society* (IES) ha tenuto la conferenza annuale sull'illuminazione stradale e per grandi aree (*Street and Area Lighting Conference, SALC*) in California: nel corso della manifestazione, sono state discusse diverse installazioni stradali a LED attualmente in fase di realizzazione in California, ed in particolar modo quelle di Los Angeles e San Jose.

### Los Angeles, California, USA

Quello di Los Angeles è il progetto di retrofitting stradale di maggiori dimensioni al mondo. La città ha circa 210mila lampioni, e progetta di realizzare il retrofitting di 140mila di essi (tutti quelli di tipo tradizionale): di questi, 20000 sono già stati installati. Prima del retrofitting, la città consumava 190milioni di kWh/anno, con un costo di 17milioni di dollari: a programma ultimato si stima che la spesa sarà ridotta di 10milioni di dollari l'anno, di cui 7,5milioni in risparmio energetico e 2,5milioni in risparmio sulla manutenzione.

Sono state inoltre compilate delle specifiche per guidare all'acquisto delle sorgenti: si richiedono lampade con temperatura di colore di 4300K, 6 anni di garanzia, il 70% di flusso emesso dopo 50000 ore, e il 40% di risparmio energetico.

Per quanto riguarda i costi legati a tale operazione, globalmente la città di Los Angeles paga 500\$ per ogni apparecchio stradale installato: questo costo comprende sia i materiali (423\$), sia i costi di progettazione (30\$), sia quelli di installazione (42\$). Inoltre, l'installazione di Los Angeles utilizza esclusivamente apparecchi equipaggiati con connettività network di tipo Roam per il monitoraggio in remoto: questo sistema, come detto nel Cap. IV, è in grado di individuare facilmente gli apparecchi rotti, riducendo al minimo i costi di manutenzione. Attualmente, l'impianto non è dimmerabile, ma la città sta pensando di introdurre i dispositivi necessari per abilitare questa opzione e tagliare ulteriormente i costi di gestione. L'insieme di apparecchi LED installati a Los Angeles fornisce un'illuminazione più uniforme, favorendo un effetto visivo "a tappeto", con minime zone d'ombra sul manto stradale (Fig. 5.3): il miglioramento della visibilità dall'alto, che è stato approssimativamente valutato in cinque volte rispetto alle lampade ai vapori di sodio ad alta pressione precedentemente installate, ha portato risvolti positivi nella lotta alla criminalità.



a)



b)

Figura 5.3. Illuminazione stradale a Los Angeles, Hoover Street.

- a) Le lampade ai vapori di sodio ad alta pressione preesistenti fornivano un'illuminazione disomogenea con aree scure.
- b) Il retrofitting con lampade LED crea un illuminamento più uniforme del piano stradale ed una maggiore visibilità.

## San Josè, California, USA.

La città di San Josè ha testato alcuni lampioni stradali, ed ha concluso che tali sorgenti non si ripagano a meno che non si trovi un modo di risparmiare al di là dell'efficienza e del dimming. In particolare, la ricerca ha focalizzato l'attenzione sul fenomeno di decadimento nel tempo del flusso luminoso emesso: in questo ambito, si ritiene che svolgano un ruolo importante la temperatura di colore e lo spettro di emissione. Un nuovo test ha riguardato il confronto tra le lampade in uso (ai vapori di sodio a bassa pressione) e lampade a induzione a 4000K e lampade LED a 3500-4000-5000K. L'esperimento includeva una lunga lista di domande fatte a volontari sui vari apparecchi testati: le risposte hanno mostrato una forte preferenza per i LED bianchi o a spettro largo, in particolare quelli con temperatura di colore pari a 3500K. I volontari, il cui compito consisteva nel guidare l'auto, dovevano segnalare al sistema di acquisizione dati quando vedevano un piccolo oggetto-target prestabilito: il test determina in questo modo la "distanza di discriminazione".

Per la raccolta di dati sul campo, l'EPRI ha realizzato un veicolo telecomandato soprannominato Scotty (Fig. 5.4a), equipaggiato con sensori luminosi fotopici e scotopici. Il veicolo contiene inoltre un ricevitore GPS con un'accuratezza dell'ordine di 1cm e un nodo wi-fi che trasmette dati ad un computer portatile. La raccolta dei dati avviene secondo una griglia rettangolare con maglie di area pari a circa  $0,5\text{m}^2$ .

La Fig. 5.4b mostra gli oggetti colorati sotto luce emessa da sorgenti ai vapori di sodio a bassa pressione. Nei test reali, gli oggetti erano dislocati in modo random lungo l'area del test, illuminata con le diverse sorgenti al medesimo livello di illuminamento. Il test è stato svolto in due notti consecutive: la prima notte, tutte le luci funzionavano a livello equivalente ai livelli delle lampade ai vapori di sodio a bassa pressione esistenti, mentre la seconda notte i livelli luminosi erano ridotti del 50%.

Il risultato di tale test mostra come i LED offrano una maggiore distanza di rilevazione, con un valore che rimane nell'ordine di 40-70m. Il fatto più significativo è che al 50% del flusso i LED consentono ancora una discriminazione dell'oggetto attorno ai 60m, mentre le lampade ai vapori di sodio a bassa pressione scendono a 40m. Il consumo energetico dei LED scende inoltre a 5,5W/ml, mentre le lampade ai vapori di sodio a bassa pressione non scendono sotto 22W/ml.



a)



b)

Figura 5.4.

- a) Il robot Scotty, creato dall'EPRI per misure telecomandate dell'illuminazione lungo le strade.  
b) Alcuni piccoli oggetti di diversi colori, mostrati sotto la luce ai vapori di sodio a bassa pressione, hanno aiutato nella misurazione della distanza di discriminazione sotto apparecchi illuminanti diversi.

## Beaverton, Oregon, USA

Uno studio completo sul campus Nike a Beaverton, Oregon, ha mostrato l'utilità di controlli adattivi basati su sensori termici che individuano la presenza di pedoni. Di notte le luci erano regolate a 4200lm di flusso luminoso: quando un pedone veniva individuato, l'output veniva aumentato fino a 9380lm. I sensori potevano essere regolati per far funzionare le lampade alla massima potenza per un periodo di tempo variabile tra 30 secondi e 30 minuti: il settaggio di base, nella dimostrazione, è stato di 10 minuti.

In un parcheggio di Washington, il progetto pilota ha invece previsto l'impiego di monitor installati su ogni palo con lettura della corrente ogni 10 secondi, per individuare ogni attività spuria attribuibile ai sensori.

La Fig. 5.5 mostra un grafico del funzionamento nelle 24 ore di uno dei sette pali installati. Nel periodo diurno non è stata ovviamente utilizzata energia, mentre nel periodo notturno un apparecchio LED usava a piena potenza, quando venivano individuati i pedoni, circa 0,6 A, e meno di 0,2 A per il resto del tempo. Come riferimento, le lampade esistenti a ioduri metallici consumavano una corrente di 1 A per tutta la notte. Il grafico mostra periodi di lunghezza variabile dove le sorgenti hanno lavorato a massima potenza: questo fatto può essere facilmente spiegabile considerando che un sensore può individuare una seconda persona e quindi ricominciare a contare i 10 minuti di accensione. La dimostrazione ha stimato un risparmio di 745kW/h annui per ciascun apparecchio.

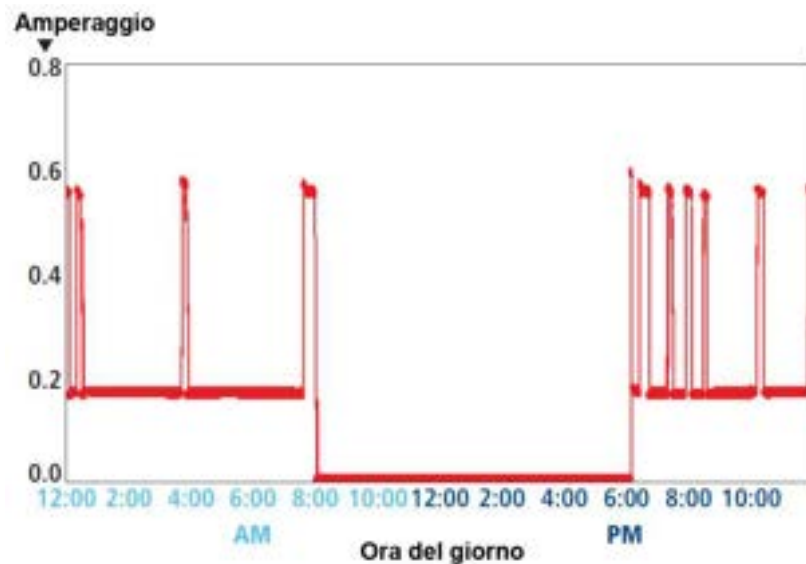


Figura 5.5. Funzionamento di un apparecchio LED nelle 24h nel parcheggio del campus Nike.

## Raleigh, North Carolina, USA

A partire dal 2007 Raleigh, North Carolina, USA, è stata tra le prime città a installare un'illuminazione LED, evidenziando risparmi energetici sul lungo periodo e migliore mantenimento del flusso luminoso.

In questo caso, il test dell'illuminazione stradale LED è durato per anni. I primi test effettuati nella cittadina avevano mostrato buoni risultati, mentre gli ultimi hanno mostrato risultati molto migliori in termini di qualità della luce, risparmio energetico e periodo di payback. Complessivamente, la città ha seguito 30-35 progetti LED, con lo scopo di selezionarne alcuni per trasformarli in applicazioni su larga scala. La città si è interessata sia di progetti di illuminazione di interni che d'esterni. Gli esempi in interni includono un'illuminazione d'accento nel centro culturale cittadino e l'illuminazione dell'ufficio del sindaco. Gli esempi dell'illuminazione d'esterni riguardano garage, illuminazione stradale, parchi, gallerie e illuminazione per i ponti pedonali.

I primi test sono documentati da 4 anni, e si sono ottenuti ottimi risultati sia in termini di performance luminosa che di gradimento: le persone hanno addirittura affermato che le nuove sorgenti risultavano più luminose rispetto alle precedenti, mentre il flusso emesso era minore dell'11%.

La valutazione dell'installazione LED nei parcheggi, dal punto di vista del risparmio energetico e del periodo di payback, è stata basata sulle specifiche degli apparecchi. Le sorgenti dovrebbero tenersi al di sopra di L70 per almeno 50000 ore di servizio, equivalenti a 5,7anni se accese 24 ore al giorno. Ma poiché il parcheggio interrato era esposto a una certa illuminazione naturale, la città ha impiegato una fotocellula per mantenerne spente alcune per 12 ore al giorno, estendendo la durata di vita a 11,4 anni per quegli apparecchi.

In seguito al successo del progetto del parcheggio, è stato poi deciso di sviluppare l'illuminazione LED con apparecchi BetaLED dapprima in un parcheggio interrato e nel nuovo centro congressi, in sostituzione delle lampade a ioduri metallici, e successivamente anche in un altro parcheggio interrato.

Raleigh può servire come esempio per altre città che stanno considerando progetti d'illuminazione a LED sia per la qualità e l'entità delle esperienze fatte, sia per le lezioni inaspettate, come ad esempio il fatto che l'illuminazione di uno dei parchi cittadini abbia resistito a un tornado che ha provocato ingenti danni.



## Chula Vista, California

La città di Chula Vista, in California, ha attrezzato un'area di prova (Fig. 5.6a) in cui l'illuminazione è regolata secondo una complessa strategia di dimmeraggio effettuata tramite controlli adattivi, che regolano 4 tipi di apparecchi LED diversi (Fig. 5.6b). Dopo aver confrontato il funzionamento in loco sia di un network di tipo PLC (cablato) che di uno wireless, e aver osservato che il primo causava una eccessiva lentezza nella risposta, si è scelto il secondo. Gli apparecchi illuminanti vengono accesi con un flusso luminoso limitato al tramonto e al calare progressivo dell'illuminamento dovuto alla luce naturale, il loro flusso viene gradualmente aumentato fino a raggiungere il 100% di emissione. A mezzanotte viene poi ridotto di nuovo fino al 50%, per poi essere riportato al massimo all'inizio dell'ora di punta mattutina.



Figura 5.6. Città di Chula Vista, California.

- a) Planimetria della zona occupata dal progetto pilota.
- b) Apparecchi LED impiegati, dall'alto: BetaLED, Hadco LED, Leotek LED, LED Roadway Itg.

Fonte:

[http://www.chulavistaca.gov/City\\_Services/Community\\_Services/Public\\_Works\\_Operations/StreetlightAssessmentProject.asp](http://www.chulavistaca.gov/City_Services/Community_Services/Public_Works_Operations/StreetlightAssessmentProject.asp)

## La situazione in Europa

Tutti gli esempi riportati riguardano essenzialmente gli Stati Uniti: in Europa l'illuminazione LED sta stentando di più ad affermarsi, probabilmente a causa della carenza di incentivi da parte degli enti pubblici e della diffidenza degli utenti verso un'innovazione come l'SSL. I progetti pilota presenti sul suolo europeo sono di piccole dimensioni e di costi contenuti, per cui la raccolta di dati è limitata e i risultati ottenuti non sono particolarmente rilevanti, se confrontati ai progetti su larga scala appena descritti.

La Commissione Europea (EC) è in procinto di erogare fondi fino a 10 milioni di Euro per supportare due o tre progetti pilota di illuminazione allo stato solido. I fondi saranno dati ad interventi di eccellenza che proporranno il miglior uso di sistemi LED innovativi per raggiungere una migliore qualità dell'illuminazione e del controllo con una riduzione sostanziale nei consumi elettrici. Lo scopo è dimostrare sul campo il valore dell'impiego di sistemi LED, valutando la percezione dell'utente, determinando i costi e i risparmi totali, e diffondendo le informazioni raccolte.

L'attenzione è rivolta in primo luogo al settore commerciale e/o residenziale, incluse infrastrutture pubbliche, semipubbliche o private di grandi dimensioni. I progetti dovrebbero includere attori provenienti da tutti gli stadi del processo di sviluppo, dall'industria fino agli utilizzatori dell'impianto di illuminazione. Ai progetti verrà richiesto di cooperare tra di loro per sviluppare metodologie di misura e di presentazione dei risultati uniformi. Ci si aspetta inoltre che le azioni contribuiscano congiuntamente a stabilire le iniziative riguardanti le etichette di qualità e che si adoperino per la certificazione e la standardizzazione nel settore.

### **Progettazione di apparecchi per illuminazione stradale a LED: sfide e strategie**

La direzionalità del fascio luminoso è uno degli aspetti essenziali della progettazione in ambienti esterni, ed in particolare dell'illuminazione stradale: in questo settore applicativo, lo scopo è quello di direzionare la luce nelle zone e nelle quantità desiderate, evitando di illuminare aree che non devono esserlo.

Ad oggi, l'illuminazione stradale a LED è ancora un problema aperto perché risulta ancora complesso realizzare una sagoma ellittica sulla strada, fornendo il medesimo livello di illuminamenti (sotto l'apparecchio e a 30 metri di distanza). L'obiettivo è quello di progettare prodotti che rispettino le specifiche relative al fascio luminoso, introdotte per il Nord America dalla IESNA (*Illuminating Engineering Society of North America*) e da altre organizzazioni analoghe in altre parti del mondo. Secondo le specifiche IESNA esistono cinque tipi fondamentali di distribuzione luminosa (Fig. 5.7) utilizzati per le applicazioni stradali. Le sagome di Tipo I e di Tipo V sono generalmente considerate abbastanza semplici da realizzare, mentre i Tipi II, III e IV, molto più utili nelle applicazioni di illuminazione stradale, risultano inevitabilmente più complessi: basti pensare che una distribuzione di Tipo IV richiede fasci luminosi di lunga gittata, minimizzando,

attraverso equa ripartizione delle intensità luminose da parte dell'apparecchio, le intensità luminose che colpiscono il suolo nell'area circostante l'apparecchio.

Queste necessità confliggono inoltre con i costi di installazione degli apparecchi LED: per risparmiare sull'installazione, e quindi avere periodi di payback inferiori, è auspicabile utilizzare il minor numero possibile di apparecchi, posizionandoli, quindi, ad interassi il più possibile ampi.

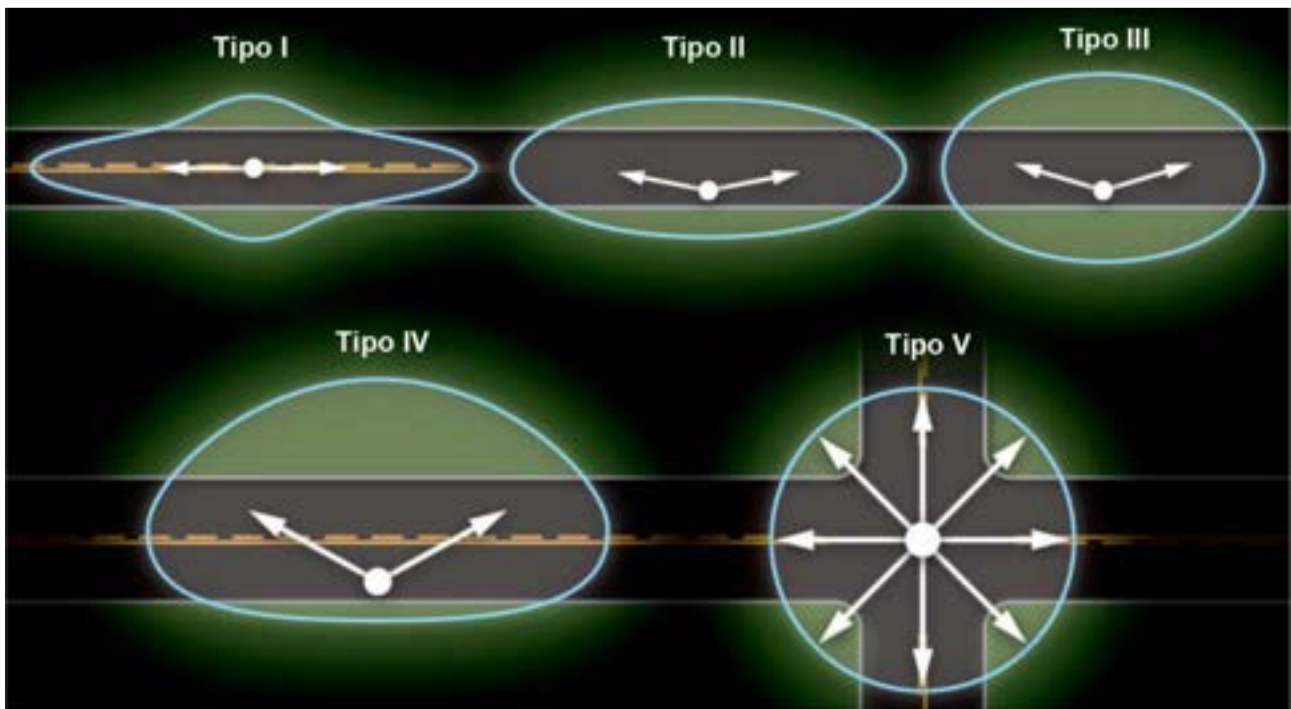


Figura 5.7. Tipi di distribuzione luminosa per apparecchi stradali secondo la classificazione effettuata dalla IESNA (Illuminating Engineering Society of North America)

La Fig. 5.8 illustra le difficoltà nella progettazione di un'illuminazione stradale uniforme e priva di problemi di abbagliamento. Nella progettazione di un apparecchio per illuminazione stradale a LED lo scopo primario è raggiungere un numero fisso di candele per metro quadro ( $X_m \cdot cd$ ) indipendentemente dalla distanza dall'apparecchio: per fare questo è necessario che il fascio luminoso diventi progressivamente più stretto man mano che ci si allontana dalla sorgente. Nell'esempio in figura, il flusso emesso verso la zona 4 deve essere 9 volte superiore rispetto a quello incidente sulla zona 1: ciò vuol dire che si creano condizioni sfavorevoli dal punto di vista dell'abbagliamento, specialmente in caso di interassi tra gli apparecchi di dimensioni notevoli.

La stragrande maggioranza degli apparecchi stradali attualmente in uso si basa su distribuzioni bidimensionali di LED singoli, in numero variabile tra 20 e 100 montati su una superficie piana, che insieme forniscono l'output luminoso necessario. In alternativa, si impiegano LED di grandi dimensioni in numero molto minore (da 1 a 10), che però emettono globalmente un flusso equivalente.

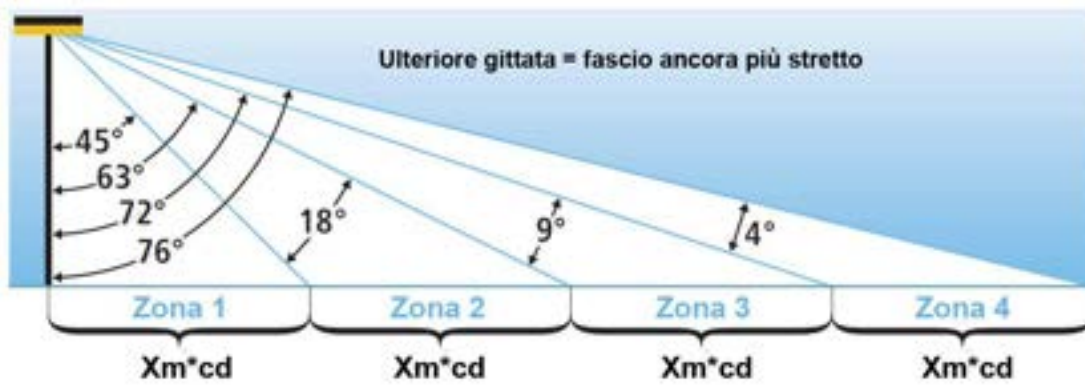


Figura 5.8. Gli apparecchi per illuminazione stradale devono emettere più luce con fasci sempre più stretti per illuminare uniformemente aree che sono progressivamente più lontane da esso. Ciò genera problemi di abbagliamento.

Indipendentemente dalla tecnologia impiegata, è importante ricordare che un medesimo apparecchio LED può essere adatto ad essere installato in una determinata posizione, mentre può risultare erroneamente progettato per un'altra: in Fig. 5.9 è visibile un esempio di apertura del fascio luminoso per un apparecchio tradizionale e per due apparecchi LED. Gli apparecchi per illuminazione stradale che impiegano sorgenti tradizionali (a sinistra) non consentono una distribuzione accurata del fascio luminoso emesso, per cui una buona parte dei raggi luminosi vanno ad incidere sugli eventuali edifici presenti lateralmente alla strada. Al contrario, alcuni apparecchi LED hanno un fascio estremamente stretto (al centro), accettabile se si vuole illuminare solamente la sede stradale, ma non adatto all'illuminazione laterale, necessaria ad esempio in caso di presenza di marciapiedi. In questa ultima circostanza, è più adatto un fascio luminoso come quello visibile nell'immagine di destra, che riesce a illuminare a sufficienza sia la sede stradale che ciò che è posto lateralmente ad essa, senza però sprecare luce direzionandola in modo incontrollato verso le facciate degli edifici circostanti.



Figura 5.9. Emissioni a confronto: apparecchi per illuminazione tradizionale e a LED.  
Fonte: Clanton & Associates.

Per direzionare il fascio luminoso, si possono installare i diodi inclinandoli secondo un certo angolo per direzionare il flusso luminoso nella direzione voluta, anche se questo approccio, se non

accuratamente gestito, può comportare problemi di abbagliamento. In alternativa a questo sistema, si possono impiegare ottiche TIR (*Total Internal Reflection*) su ogni elemento illuminante, diversificate singolarmente per conformare globalmente il fascio luminoso: questo sistema è attualmente il più diffuso, anche se altri sistemi di gestione dei raggi luminosi sono in forte ascesa, a causa della complessità di progettazione e realizzazione delle TIR, prodotte con iniezione in stampo.

Tra le ottiche TIR attualmente in commercio, si riportano le BetaLED NanoOptic, realizzate da Ruud Lighting per BetaLED, le Golden Dragon Plus di Osram Opto Semiconductors e le AccuLED di Cooper Lighting.

#### NanoOptic di Ruud Lighting per BetaLED

BetaLED utilizza un'ottica con rifrattore a contatto diretto chiamato NanoOptic, che viene installato direttamente sul LED per fornire la massima potenza luminosa e un controllo ottimale del direzionamento dell'emissione. Tali rifrattori sono poi applicati agli apparecchi per illuminazione stradale, come ad esempio il modello LEDway SLM (Single Light Module) (Fig. 5.10), che impiega strisce di LED con ottiche NanoOptic.

Queste ottiche sono progettate tramite una tecnica di modellazione computerizzata 3D che ne prevede precisamente il comportamento (Fig. 5.11). I rifrattori NanoOptic sono realizzati in acrilico HID stabilizzato agli ultravioletti e con procedimento produttivo consolidato da anni, che non prevede alcun rischio di ingiallimento o deformazione della trasparenza delle lenti. Il modello viene quindi lavorato e le sue prestazioni collaudate da test fotometrici verificati indipendentemente. Completato il processo di verifica e ottimizzazione del modello, questo viene duplicato e applicato ad ogni singolo prodotto NanoOptic. Il rifrattore NanoOptic riduce al minimo tutte le perdite, raggiungendo un grado di efficienza (85%) assai maggiore di quelle dei riflettori tradizionali.



Figura 5.10. Apparecchio BetaLED LEDway SLM (Single Light Module).

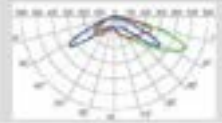


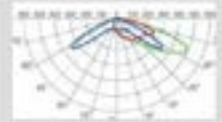


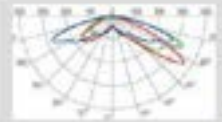


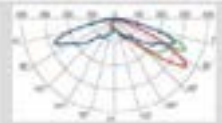


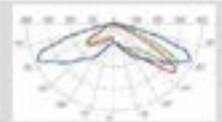


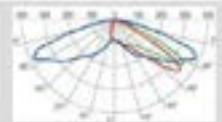


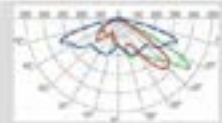


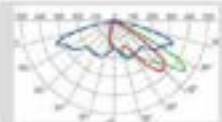


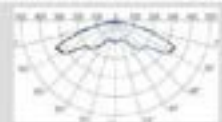


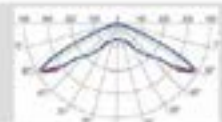





			<b>AC</b> Asymmetric optic (type IV Medium) for street lighting and parking area applications
			<b>ACB</b> Asymmetric optic lacking retroflex (type IV Medium) for street lighting and parking area applications
			<b>PR</b> Asymmetric optic (type III) for street lighting and parking area applications
			<b>PRB</b> Asymmetric optic lacking retroflex (type III) for street lighting and parking area applications
			<b>TM</b> Asymmetric optic (type II Medium) for street lighting, cycle tracks, pedestrian walkways
			<b>TMB</b> Asymmetric optic lacking retroflex (type II Medium) for street lighting, cycle tracks, pedestrian walkways
			<b>TS</b> Asymmetric optic (type II Short) for street lighting
			<b>TSB</b> Asymmetric optic lacking retroflex (type II Short) for street lighting
			<b>QVM</b> Quadrate symmetric optic (Type V Medium) for street lighting and parking area applications
			<b>QVS</b> Quadrate symmetric optic (Type V Short) for street lighting and parking area applications
			<b>FS</b> Flood symmetric for canopy installation

Figura 5.11. Tipi di ottiche NanoOptic di Ruud Lighting.

### Ottiche Golden Dragon Plus di Osram

La Osram ha commercializzato le lenti Golden Dragon Oval Plus (Fig. 5.12): inglobando il diodo, esse eliminano la necessità di ottiche secondarie perché sono in grado, da sole, di creare un fascio di forma pressoché rettangolare (Fig. 5.13) che semplifica enormemente la progettazione degli apparecchi per illuminazione stradale: il flusso luminoso ottenuto (Fig. 5.13) risulta distribuito uniformemente, in quanto risultante dalla giustapposizione delle emissioni luminose dei singoli diodi. Per ottenere la distribuzione del solido fotometrico desiderata, è sufficiente posizionare i diodi in stringhe di distanza variabile con l'altezza di sospensione (Fig. 5.14).

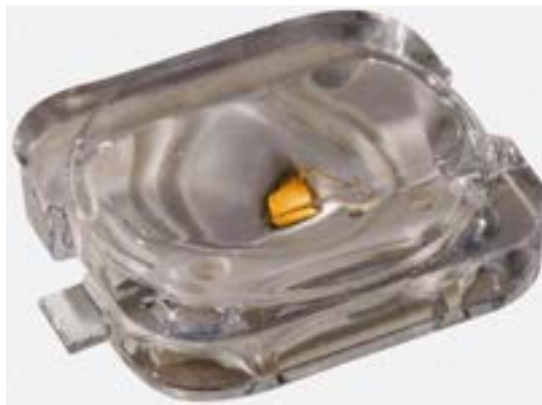


Figura 5.12. Luxeon Oval Plus.

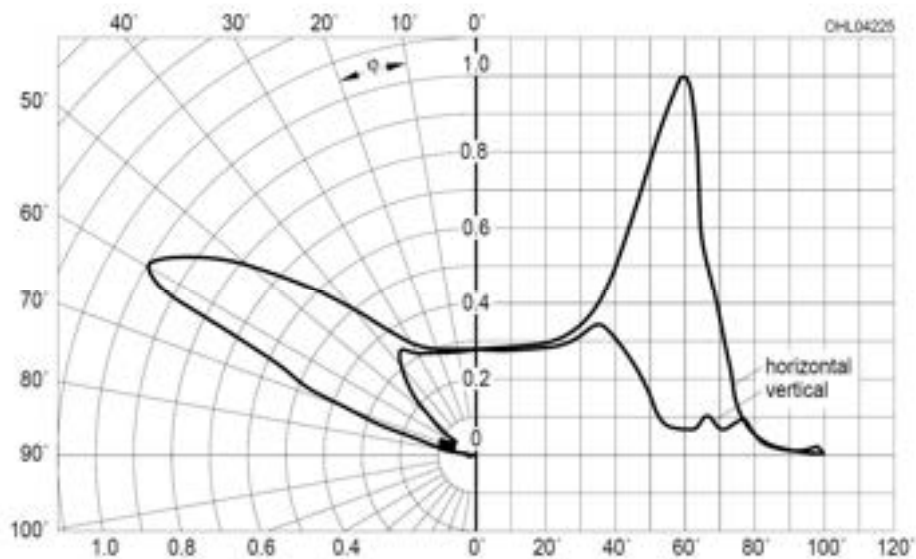


Figura 5.13. Luxeon Oval Plus, curve fotometriche.



Figura 5.14. Luxeon Oval Plus inseriti all'interno di un apparecchio per illuminazione stradale.

L'approccio TIR non è, però, l'unico adatto all'illuminazione stradale. Molti produttori di apparecchi hanno avuto accesso per molto tempo solamente ad emettitori da 1W-3W e hanno preferito utilizzare lunghe strisce di diodi per le applicazioni, come appunto l'illuminazione stradale, che richiedevano un elevato flusso luminoso. Sarebbe logico ritenere pertanto che sorgenti più estese possano essere una buona soluzione per questa applicazione, ma in realtà l'utilizzo di un numero inferiore di sorgenti di superficie maggiore richiede di indirizzarsi verso un approccio più legato all'impiego di un riflettore centrale, in quanto le lenti TIR non sono adatte a conformare la luce di LED di grande superficie: lenti molto grandi renderebbero inaffidabile il risultato del processo di iniezione in stampo.

L'approccio TIR con molti emettitori singoli non è inoltre molto piacevole alla vista: dalle precedenti esperienze, risulta che gli utenti non gradiscono vedere molteplici punti luminosi; naturalmente, tale considerazione ha un valore relativo: chiedere infatti a degli utenti di fare caso ad un aspetto particolare, come le luci multiple o l'abbagliamento, aumenta inevitabilmente la loro sensibilità e il grado di percezione proprio di quell'aspetto.

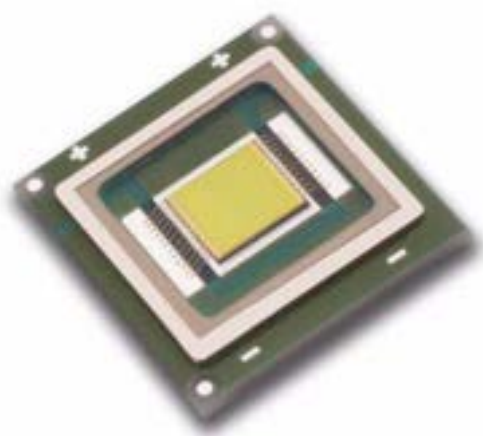
D'altra parte, LED di superficie maggiore o in stringhe possono ridurre i costi: se infatti si utilizza un lampione che usa da 1 a 10 stringhe di LED invece di 100 emettitori singoli, la sostituzione è più



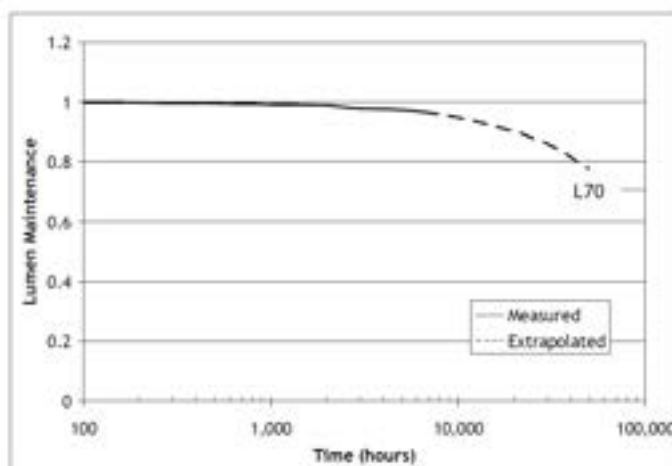
semplice, ci sono meno ottiche da comprare, e anche il montaggio in fase di produzione è molto più rapido ed economico. In questo caso le ottiche possono essere essenzialmente costituite da un riflettore o da un riflettore in combinazione con alcuni tipi di lenti terziarie.

#### SBT-90 e CMS-360 PhlatLight di Luminus Devices

La Luminous Devices ha messo in commercio a fine 2010 l' SBT-90 PhlatLight (Fig. 5.15), il cui nome deriva da *Photonic Lattice*, una tecnologia che consente di creare chip LED di grandi dimensioni caratterizzati da un'elevatissima uniformità di emissione. Tale elemento, così realizzato, è utilizzabile in applicazioni che non hanno un'ottica secondaria, ed è costituito da un chip di 9mm<sup>2</sup> di superficie (fig. 5.15a), montato su un supporto ceramico ad elevatissima conducibilità termica, ed offre un output medio pari a 1800lm con una CCT di 6500K e un CRI pari a 70. Notevole la durata di vita L70, stimata oltre le 70000 ore (Fig. 5.15b).



a)



b)

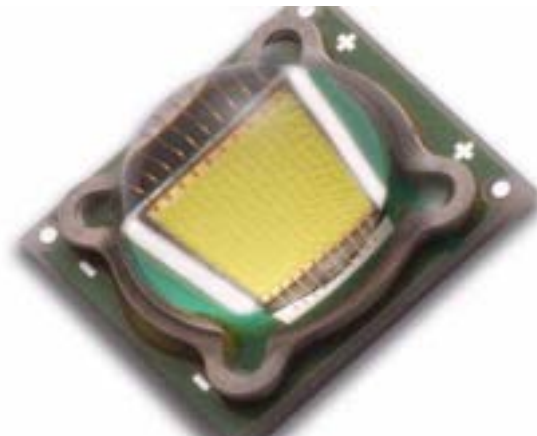
Figura 5.15. Chip SBT-90 PhlatLight LED di Luminus Devices.  
a) Immagine del chip, la cui superficie misura 9mm<sup>2</sup>.  
b) Grafico relativo al decadimento del flusso luminoso nel tempo.

Un esempio di applicazione di questo tipo di chip è l'apparecchio KiaroLED della Eye Lighting (Fig. 5.16), che ospita tali sorgenti in numero variabile tra 6 e 9 e equipaggiate con ottiche TIR.

Con una superficie di emissione pari a 36mm<sup>2</sup>, il CSM-360 (Fig. 5.17a) è 36 volte più grande di un comune LED da 1W, ed è in grado di emettere un flusso luminoso di 6000lm: utilizzare apparecchi stradali con un unico chip, come il modello Vega della Almeco (Fig. 5.17b), consente di evitare l'impiego di illuminazione diretta attraverso l'uso di un riflettore, impedendo totalmente la visione diretta della sorgente e quindi minimizzando i problemi di abbagliamento.



Figura 5.16. Apparecchio KiaroLED della Eye Lighting, versione che monta 9 chip SBT-90.



a)



b)

Figura 5.17. Chip Almecco CSM-360 Phlatlight.

a) LED CSM-360 PhlatLight, chip di superficie  $36\text{mm}^2$

b) Almecco Vega LED 98, apparecchio per illuminazione stradale con chip singolo CSM-360

## **Apparecchi LED per illuminazione stradale innovativi: alcuni esempi**

Essendo il settore dell'illuminazione stradale quello che più di tutti sta guidando a livello globale la penetrazione dei LED come tecnologia per l'illuminazione generale, molteplici sono stati i prodotti messi in commercio nell'anno 2010/2011, così come diversi sono stati i concorsi per l'attribuzione di premi speciali ai produttori di tali apparecchi: tali contest, se da un lato possono essere guardati con sospetto perché organizzati e gestiti da consorzi di produttori con il patrocinio di enti scientificamente riconosciuti, dall'altro sono ottimi eventi per conoscere il progresso della ricerca industriale sull'argomento, poco interessata a pubblicare i propri risultati, se non per ragioni commerciali e pubblicitarie.

Le tendenze di ricerca all'interno del settore dell'illuminazione stradale si sono concentrati lungo alcuni percorsi preferenziali:

- la progettazione di elementi che montano pochi chip di dimensioni notevoli (come quelli appena visti); tale approccio consente la realizzazione di apparecchi di dimensioni limitate, ma crea problemi di abbagliamento per via delle sorgenti estremamente luminose;
- la progettazione di elementi modulari ripetuti un numero limitato di volte a comporre un apparecchio per illuminazione stradale: tale approccio non tiene in considerazione le tematiche legate all'abbagliamento e alla conformazione del fascio luminoso per evitare dispersioni di luce verso aree da lasciare in ombra, eppure a livello industriale è piuttosto diffuso perché consente una realizzazione semplice degli apparecchi, che quindi risultano poco costosi;
- la progettazione complessa di elementi tridimensionali, siano essi modulari oppure di conformazione libera: quest'ultimo approccio risulta sicuramente il migliore dal punto di vista della garanzia del comfort visivo e dell'effettiva distribuzione della luce solo sulle aree dove è desiderata. La grande libertà offerta da questo tipo di elementi da un lato consente una conformazione molto precisa del fascio luminoso, mentre dall'altra richiede una progettazione dispendiosa, perché è necessario testare molteplici combinazioni di diodi, ottiche e posizioni per arrivare alla conformazione del fascio luminoso desiderata.

Di seguito, si riportano alcuni esempi di ciascuna delle tre tipologie di apparecchi per illuminazione stradale a LED.

### Optoblk di Alliance Optotek Corporation

La Alliance Optotek Corporation (AOP) ha realizzato il modulo Optoblk (Fig. 5.18), utilizzabile per la realizzazione di apparecchi di illuminazione stradale. Il modulo, certificato IP65, contiene 24 LED high power, con un output di 2600lm a 6000K, oppure 1670lm a 3000K.

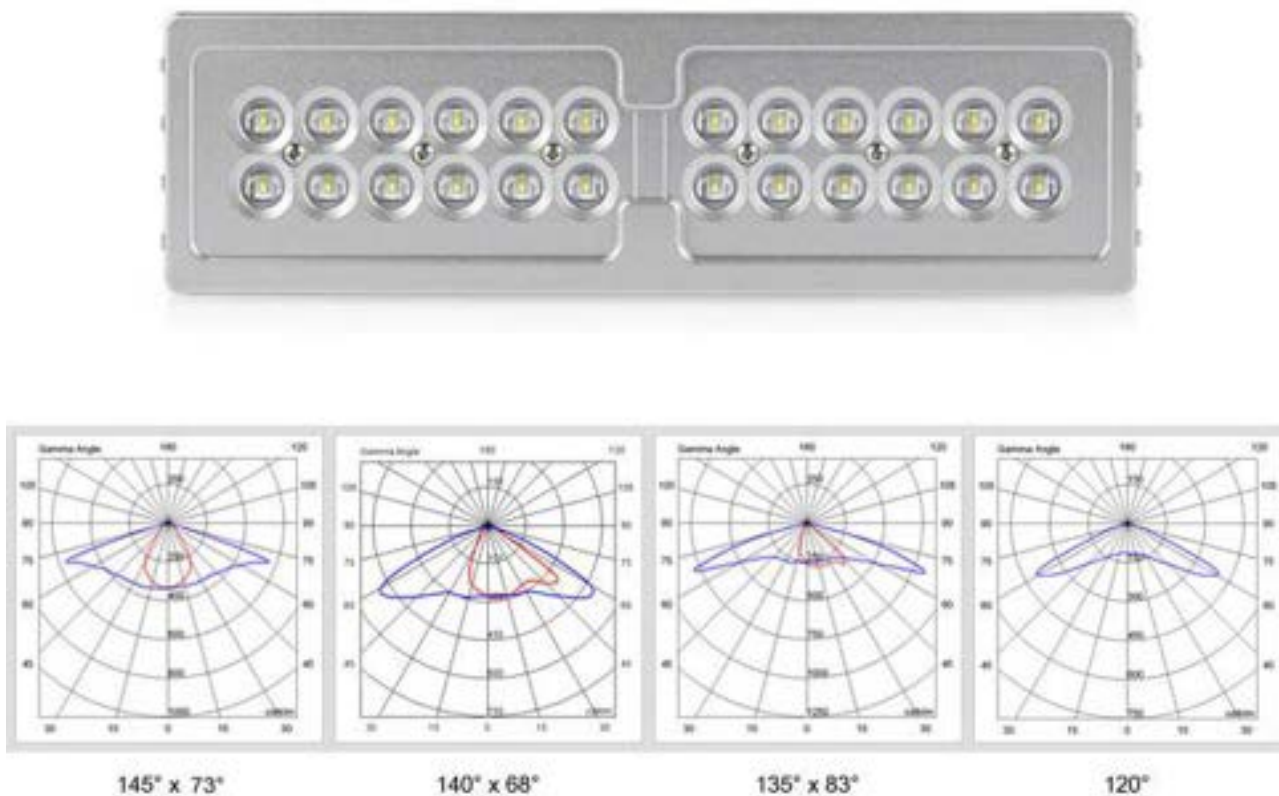


Figura 5.18. Modulo Optoblk della Alliance Optotek Corporation e relative curve fotometriche.

Tale modulo è stato integrato all'interno di diversi apparecchi per l'illuminazione stradale e di esterni, come mostrato in Fig. 5.19.

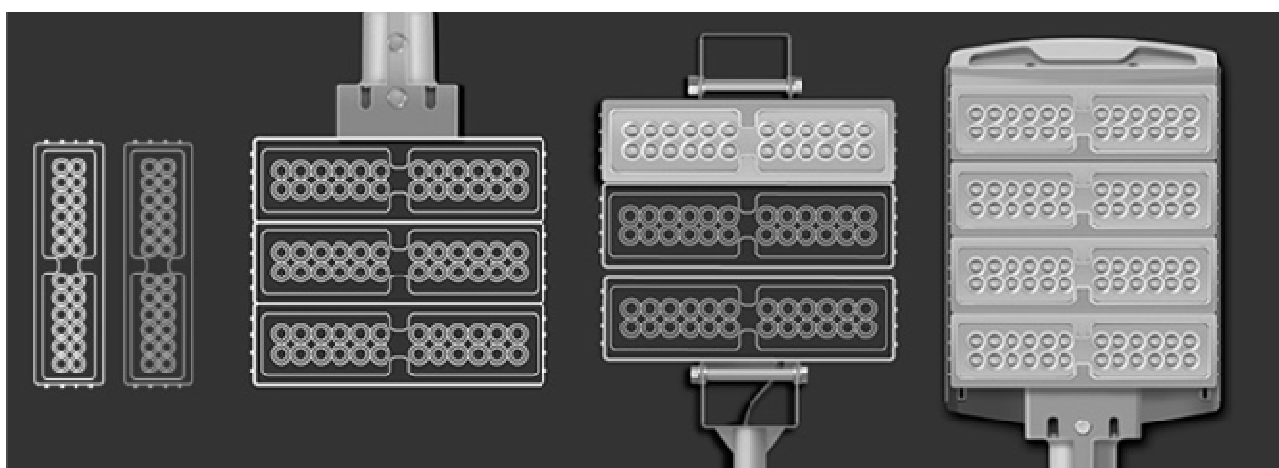


Figura 5.19. Impiego del modulo Optoblk all'interno di apparecchi per illuminazione d'esterni.

### LightBAR di Cooper Lighting

Anche la Cooper Lighting ha progettato un modulo di illuminazione da inserire all'interno di apparecchi stradali: si tratta dell'elemento denominato LightBAR (Fig. 5.20a). Di forma

rettangolare, certificato IP66, il modulo ospita due strisce di LED, ognuno dei quali monta un'ottica singola, chiamata AccuLED, in grado di direzionare la luce con grande precisione.

La durata di vita della tecnologia LightBAR è superiore alle 50000 ore di funzionamento e fornisce risparmi energetici del 30-75% rispetto ai sistemi di illuminazione standard HID, aumentabili ulteriormente grazie alla possibilità di switching bi-livello (Fig. 5.20b), grazie alla quale è possibile accendere solo alcuni dei moduli posti all'interno dell'apparecchio, lasciando spenti tutti quelli che non risultano necessari al momento.

Aspetto interessante riguarda la scelta di un'unica TCC, pari a 4000K, scelta in controtendenza, dato che la maggior parte degli apparecchi stradali monta diodi con TCC che si aggirano attorno ai 6000-7000K.



Figura 5.20. LightBAR di Cooper Lighting.

Le ottiche AccuLED per la conformazione del flusso luminoso (Fig. 5.21) sono invece prodotte in 17 varianti e sono più efficienti del 30% rispetto ai sistemi ottici tradizionalmente impiegati con le lampade HID. Tali lenti sono prodotte con 15 diverse distribuzioni del fascio luminoso, alcune delle quali chiamate "*Spill Light Eliminator Optics*", particolarmente interessanti perché studiate per ridurre drasticamente la luce emessa dai diodi verso la parte superiore e posteriore dell'apparecchio, ridirezionandola sul piano di lavoro e aumentando così l'efficienza globale dell'apparecchio.



Figura 5.21. Ottica AccuLED.

La Cooper Lighting utilizza la LightBAR come modulo progettuale all'interno di 16 diversi tipi di apparecchi per illuminazione stradale e di aree (parcheggi) (Fig. 5.22).

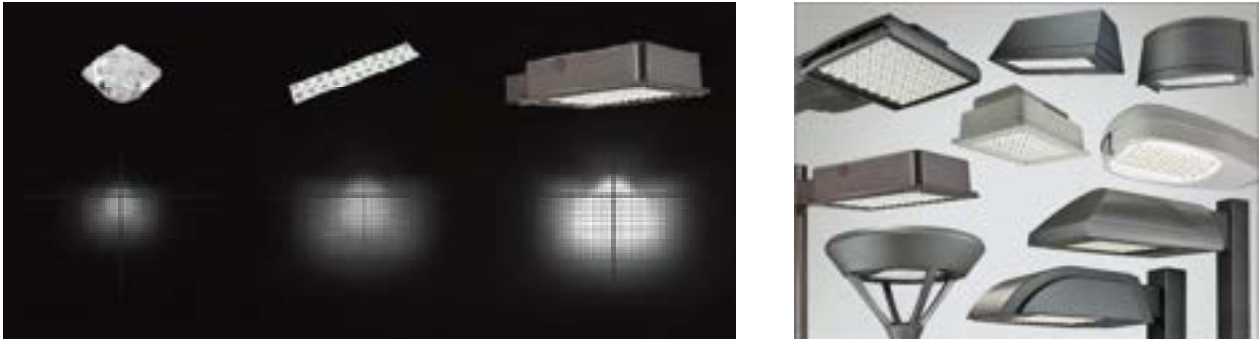


Figura 5.22. L'impiego delle ottiche AccuLED, all'interno della LightBAR, per la progettazione di apparecchi stradali.

Nell'esempio in Fig.5.23 è raffigurato l'apparecchio denominato McGraw-Edison che, grazie all'impiego della LightBAR come modulo illuminante in 12 diverse configurazioni, può raggiungere risparmi energetici fino al 75% rispetto alle lampade a scarica ad alta intensità. La conformazione dell'apparecchio consente un raffreddamento passivo efficace e la pulitura tramite acqua piovana del dissipatore di calore alettato, posto sulla parte superiore dell'apparecchio.



Figura 5.23. Apparecchio stradale McGraw-Edison Ventus di Cooper Lighting con LightBar modulari.

## Printed-Board HSMtec di Hauserman GmbH

Schröder ha incorporato la tecnologia printed-board HSMtec della Hausermann GmbH nei suoi nuovi apparecchi per illuminazione stradale (Fig. 5.24).

Lo scopo della tecnologia HSMtec, che consente la realizzazione di elementi autoportanti tridimensionali, con correnti di funzionamento elevate e buona gestione del calore, è quello di integrare i LED all'interno di alloggiamenti nati per sorgenti tradizionali, riuscendo a disporre le ottiche dei diodi in modo tale da ottimizzare la distribuzione luminosa.

Ogni elemento di supporto HSMtec svolge tre funzioni:

- la distribuzione della luce attraverso segmenti del supporto stampato (*Printed Board*, PB) flessibili e autoportanti;
- la gestione termica attraverso dissipatori piani in rame, collegati ai diodi tramite le saldature stesse del circuito elettrico;
- la connessione dei LED attraverso i punti di saldatura e la lamiera di rame integrata all'interno del supporto.

Le parti esterne in rame (nella forma di profili o cavi) sono saldate attraverso una tecnologia ad ultrasuoni sulle parti del PCB dove è necessaria la dissipazione del calore, cioè vicino ai diodi, nei punti in cui ci sono correnti elevate, nei punti di curvatura.

Grazie ad una gestione termica particolarmente efficiente, è possibile abbassare la temperatura di giunzione da 85 a 80°C, permettendo una durata di vita L70 di 60000 ore.

Elemento di innovazione fondamentale è la totale flessibilità di progettazione e di conformazione del PCB (*Printed Board Circuit*), che porta con sé la libertà di sperimentazione ed uso di ottiche innovative: ogni singolo diodo può essere dotato di lenti ad hoc e di un'inclinazione propria, grazie a incisioni superficiali su PCB in corrispondenza delle possibili linee di piegatura.

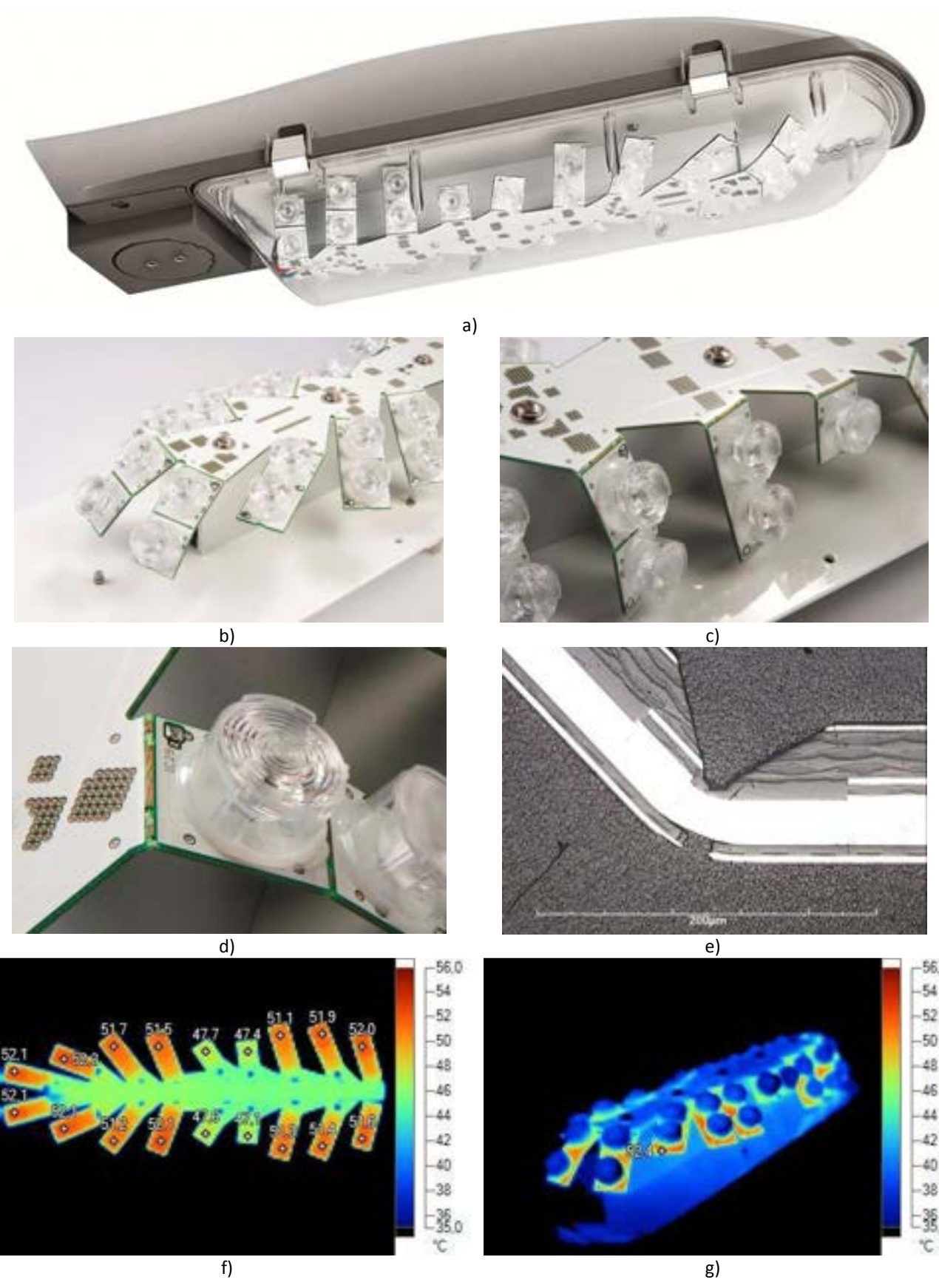


Figura 5.24. Shröder Lighting ha integrato la tecnologia HSMtec printed-board di Hausermann GmbH nello sviluppo di un nuovo apparecchio stradale.



## Warp9 di Kim Lighting

La Kim Lighting ha integrato la tecnologia MicroEmitter all'interno di alcuni dei suoi modelli di apparecchi per illuminazione stradale, come il Warp9 LED (Fig. 5.25).



Figura 5.25. L'apparecchio Warp9 LED della Kim monta piccoli gruppi di LED all'interno di un modulo riflettore MicroEmitter che dirige la luce a un riflettore più ampio per formare il fascio luminoso desiderato.

L'apparecchio monta piccoli gruppi LED posti all'interno di riflettori modulari denominati MicroEmitter. Tali moduli direzionano la luce su superfici riflettenti addizionali per formare il fascio luminoso (Fig. 5.26). Lo schema di funzionamento è ottimo dal punto di vista termico perché ogni MicroEmitter è collegato direttamente alla struttura in alluminio retrostante, che svolge quindi anche funzione di dissipatore di calore.

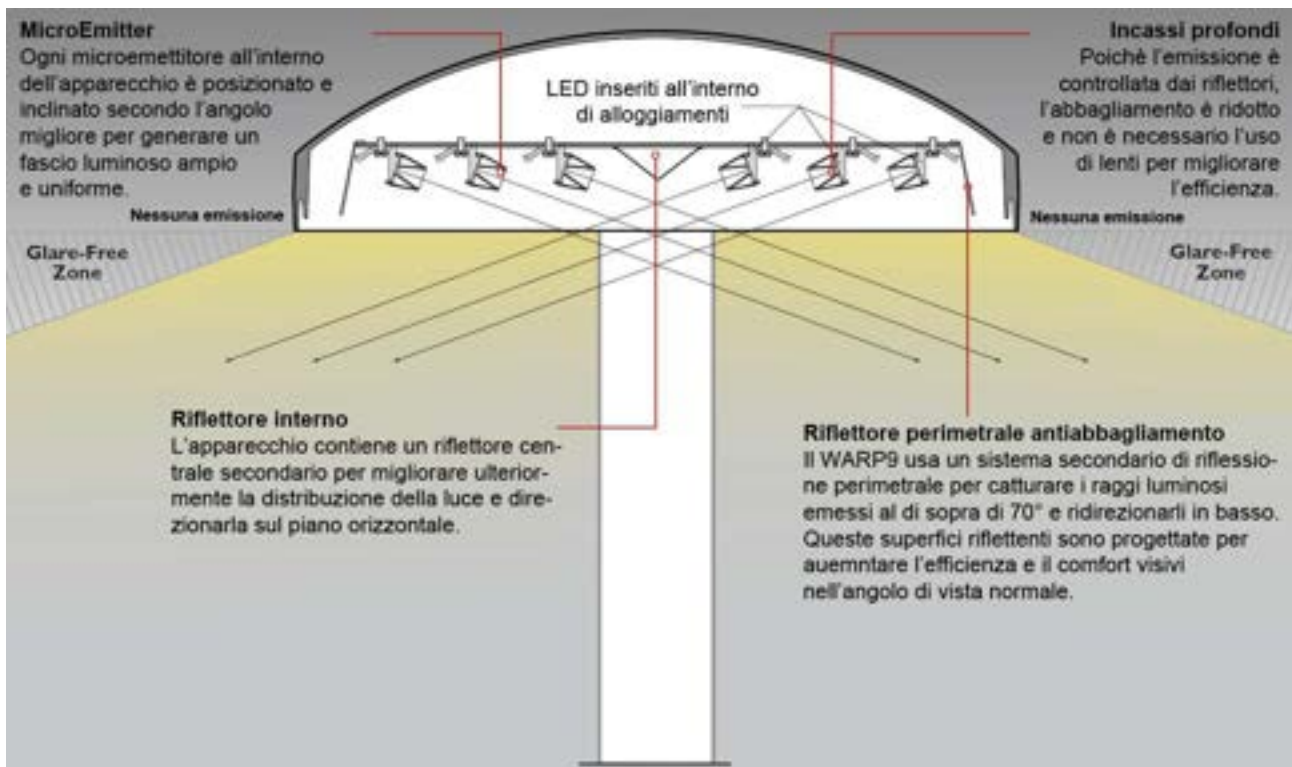


Figura 5.26. Sezione schematica illustrante il funzionamento dell'apparecchio Warp9 della Kim.

Il MicroEmitter (Fig. 5.27) è un apparecchio in miniatura sostituibile, costituito da un circuito con 3 LED, controllati da riflettori. Questo design lascia che i diodi emettano direttamente in aria, senza dispersione di luce oltre l'angolo di 70°. Per maggiore sicurezza, un riflettore perimetrale secondario blocca e ridistribuisce qualunque raggio di luce che ricada al di fuori dello stesso angolo.

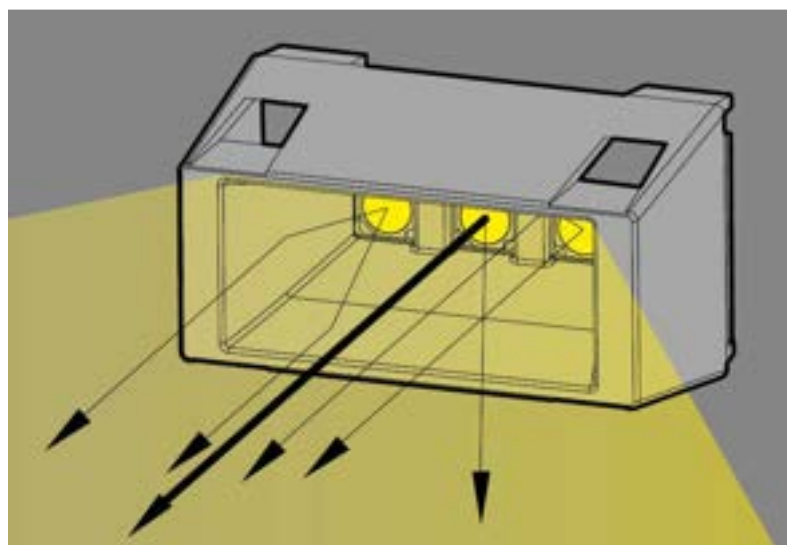


Figura 5.27. Schema del MicroEmitter.

La disposizione dei MicroEmitter all'interno dell'apparecchio è studiata per limitare al massimo i problemi di abbagliamento, permettendo allo stesso tempo l'impiego di un ampio intervallo tra i corpi illuminanti: è da sottolineare che, anche nel caso in cui l'utente (pedone o automobilista) diriga lo sguardo direttamente verso l'apparecchio, almeno la metà dei LED non sono visibili, per cui l'abbagliamento rispetto ai comuni lampioni risulta ridotto almeno del 50% (Fig. 5.28).

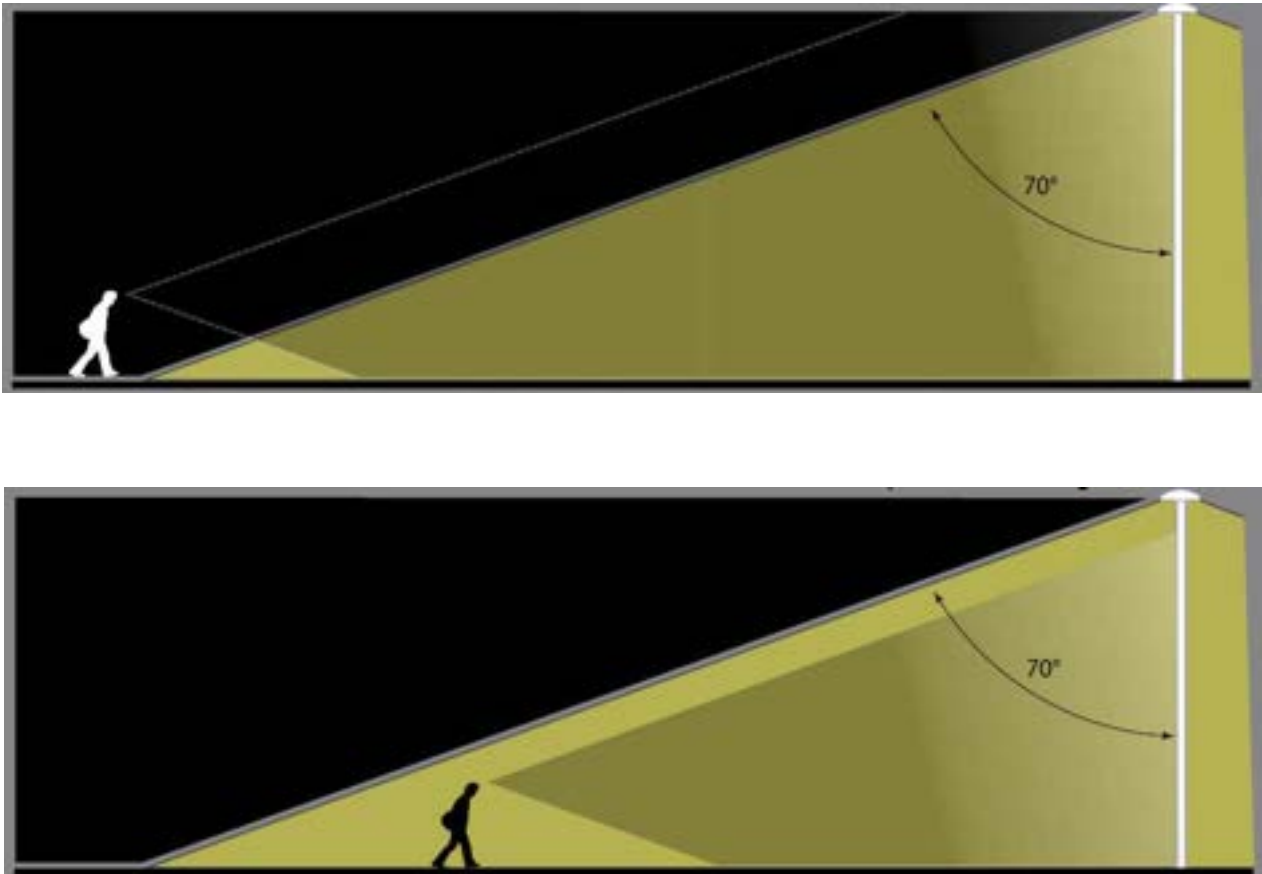


Figura 5.28. Schema relativo alla limitazione dell'abbagliamento nell'apparecchio Warp9.

- a) Quando si trova all'esterno della zona illuminata, l'osservatore si trova sempre in una zona glare-free.
- b) Quando l'osservatore si trova all'interno della zona illuminata, il campo normale di visione include solo alcune delle sorgenti LED.

## Capitolo 6

### Altre applicazioni

*Oltre all'illuminazione stradale, sono molteplici i campi in cui la tecnologia LED si avvia a diventare, seppur lentamente, la tecnologia dominante.*

*Come accennato nei capitoli precedenti, il settore del retrofitting sta acquisendo un'importanza sempre maggiore per lo sviluppo tecnologico legato all'illuminazione allo stato solido. Progettare lampade LED per retrofitting, però, è una operazione complessa: esse devono entrare all'interno di spazi fisici ed infrastrutture che sono state realizzate per lampade incandescenti ed alogene, che hanno necessità e limitazioni diverse. Un aspetto particolarmente delicato è poi quello della progettazione elettrica del sistema.*

*Il settore della retroilluminazione per monitor e tv LCD è attualmente in forte espansione, e le tecnologie che sono alla base di tale applicazione sono in continua evoluzione. Le problematiche di gestione elettrica legate alla produzione di schermi per visione 3d sono ancora in parte da risolvere, ma la tecnologia LED sta superando quella al plasma per via dei grandi risparmi che i diodi consentono anche in questo settore.*

*Le potenzialità dei LED, però, trovano espressione anche e soprattutto nelle applicazioni legate alla vita: l'illuminazione per l'agricoltura e l'illuminazione per la salute umana rappresentano attualmente i settori di ricerca più promettenti per questa tecnologia.*

*Poiché la superficie dei terreni coltivabili è in continua diminuzione e la popolazione mondiale in continuo aumento, urge trovare metodi per garantire il sostentamento della specie umana: l'agricoltura indoor, cioè in spazi chiusi, offre la possibilità di mettere al sicuro i raccolti rispetto agli eventi catastrofici naturali e rispetto a tutta una serie di patologie vegetali. L'illuminazione LED, con la sua capacità di conformazione estremamente accurata dello spettro di emissione, si è rivelata perfetta per assicurare una illuminazione adeguata alle esigenze delle varie specie. Sempre grazie a questa peculiarità dei LED, un ulteriore campo di sviluppo in relazione all'agricoltura è rappresentato dall'illuminazione volta all'integrazione della luce naturale, e più in particolare delle lunghezze d'onda dello spettro solare tagliate fuori dai materiali trasparenti usati per il rivestimento delle serre.*

*Se il rapporto tra l'illuminazione e il benessere e la crescita delle piante è stato in parte già scoperto, più complesso è il caso tra la luce e la salute psicofisica degli esseri umani: campo di ricerca sviluppato negli ultimi dieci anni, è attualmente oggetto di innumerevoli studi, di cui se ne riporteranno alcuni, a titolo esemplificativo.*

## Retrofitting

Quanto detto nei capitoli sui materiali, sull'evoluzione del chip LED e su quello dei sistemi di controllo, trova applicazione nel settore del retrofitting, cioè della sostituzione di lampade tradizionali con apparecchi LED. Tale adeguamento tecnologico sarà in un prossimo futuro il settore trainante nell'adozione dei LED ed uno degli ambiti d'impiego più problematici per la tecnologia SSL, perché è necessario rimanere all'interno di fattori di forma prestabiliti per ogni tipo di lampada (indicato da una sigla, Fig. 6.1) che si vuole sostituire. E' per questo tipo di applicazione in particolare che sono stati sviluppati i materiali superconduttori (di cui si è parlato) e che si è realizzato il sistema di raffreddamento attivo: in questo settore di applicazione è infatti necessario che il dissipatore di calore abbia dimensioni contenute e che allo stesso tempo la dissipazione di calore dall'alloggiamento chiuso in cui solitamente vengono inserite le lampade per retrofitting sia efficiente.



Figura 6.1. Sigle di identificazione del fattore di forma e sagome dei diversi tipi di lampade.

Le lampade alogene ed incandescenti sono poco efficienti e hanno durata di vita di poche migliaia di ore. Le ultime generazioni di LED HB offrono un'ottima alternativa: sono molto più efficienti e possono durare fino a cinquanta volte di più. Progettare lampade LED per sostituire sul campo le sorgenti tradizionali presenta diverse difficoltà: le lampade per retrofitting devono lavorare con dimmer TRIAC e i driver elettronici devono essere inseriti in spazi molto ristretti.

I nuovi tipi di driver con PFC permettono la realizzazione di lampade SSL affidabili e dimmerabili, con dimensioni adatte per il retrofitting.

Le principali caratteristiche di una lampada per retrofit:

- deve poter essere inserita nello stesso attacco della sorgente che sostituisce, e ciò significa che deve avere lo stesso fattore di forma;
- deve essere in grado di gestire l'elevata quantità di calore generato dai LED, sia attraverso un elemento di dissipazione del calore, sia attraverso la capacità di funzionare a temperature elevate mantenendo elevate affidabilità e durata di vita;
- deve essere compatibile con l'infrastruttura elettrica esistente (interruttori, dimmer ecc.).

Le precedenti generazioni di driver LED consentivano l'impiego di lampade per retrofitting in grado di soddisfare al primo punto, ma la maggior parte dei driver non aveva l'hardware per soddisfare il terzo punto, quando era presente un dimmer TRIAC, e incontravano difficoltà in termini di durata di vita per le elevate temperature di funzionamento, a causa della resistenza dei capacitori elettrolitici. L'ultima generazione di driver incorpora circuiti aggiuntivi per gestire le funzioni di dimming e fornire funzionalità simili a quelle di lampade alogene e a incandescenza, permettendo quindi ai LED di mantenere una lunga durata di vita e ulteriori possibilità di retrofitting.

Il fattore di forma è l'elemento progettuale essenziale per il retrofitting: espresso per mezzo di una sigla alfanumerica per ogni tipo di lampada, contiene tutte le informazioni sulle dimensioni fisiche dell'apparecchio e sul tipo di alimentazione. Le dimensioni ridotte imposte da tale fattore impongono dunque sia limitazioni spaziali alla progettazione, in quanto sia il driver che il dissipatore devono essere contenuti in volumi angusti, sia limitazioni alla gestione termica, che deve avvenire in spazi poco o per nulla ventilati. Entrambe le limitazioni costituiscono un vero e proprio problema per i fattori di forma MR16 e GU10, ma sono comunque elementi delicati nella progettazione di tutti i fattori di forma, a partire dal PAR, R, A19 (Fig. 6.2).



Figura 6.2. Esempi di alcuni tipi di lampade:  
a) PAR 38; b) R 30; c) GU 10; d) MR 16; e) A 19.

Mentre la dimensione è importante per una sostituzione, la limitazione termica è critica: i LED emettono infatti praticamente solo radiazione nel visibile, mentre non irradiano energia nell'infrarosso, come invece fanno praticamente tutte le altre tecnologie; pur essendo quindi naturalmente più efficienti delle lampade incandescenti o alogene, essi dissipano molto più calore per conduzione termica nella lampada.

La dissipazione termica è il principale fattore di limitazione del flusso luminoso che una lampada può emettere. La tecnologia attuale delle lampade per retrofitting raggiunge con difficoltà un livello accettabile per il mercato tradizionale; spingersi oltre i limiti di emissione e gestione termica risulta complesso, ma strategico per una più ampia diffusione di tali soluzioni sul mercato.

Per emettere più luce, la lampada deve lavorare a temperature relativamente elevate, spesso comprese tra 80°C e 100°C. A questa temperatura, la durata di vita della scheda driver può limitare la durata di vita dell'intera lampada. I capacitori elettrolitici sono, in particolare, il problema principale: a temperature elevate si asciugano velocemente, la loro durata di vita è limitata a poco più di 10000 ore, e questo diventa il fattore limitante per la vita dell'intero apparecchio.

Il grafico di Fig. 6.3 mostra un esempio di degradazione della durata di vita di una lampada (B50/L70, cioè quando il 50% dei LED ha perso almeno il 30% della suo flusso luminoso) in funzione della temperatura interna di funzionamento della lampada. Come si può vedere, a circa 80°C la durata di vita diminuisce per le lampade che usano capacitori elettrolitici rispetto alle lampade che non li usano; a 100°C, la durata di vita con capacitori elettrolitici è ancora minore.

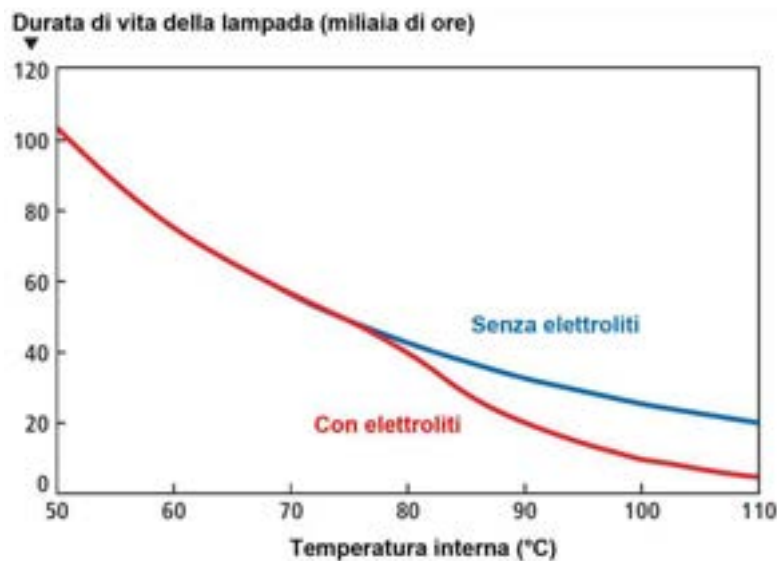


Figura 6.3. Durata di vita di una lampada LED al variare della temperatura in presenza e in assenza di capacitori elettrolitici.

La durata di vita è uno dei principali pregi dei LED, e probabilmente la ragione principale per cui questa tecnologia sta avendo successo sul mercato. Per questo, i produttori di apparecchi LED hanno la necessità di arrivare a garantire durate di vita superiori alle 50000 ore, per ottenere così prodotti vendibili in sostituzione delle sorgenti tradizionali.

## Funzionamento con l'infrastruttura elettrica

Le lampade LED per retrofitting devono lavorare correttamente inserendosi all'interno di infrastrutture elettriche preesistenti, che includono dimmer TRIAC e trasformatori elettronici.

I dimmer TRIAC sono progettati per funzionare con lampade incandescenti ed alogene, elementi puramente resistivi. I dimmer TRIAC riducono il flusso luminoso prodotto dalla lampada connessa alla loro alimentazione tenendola spenta per la parte iniziale di ogni ciclo di voltaggio in corrente alternata: il dimmer è spento per un intervallo di tempo regolabile, dopo il quale si accende, restando acceso per il resto del semiciclo. L'effetto è che il voltaggio applicato alla lampada assume la forma di Fig. 6.4.

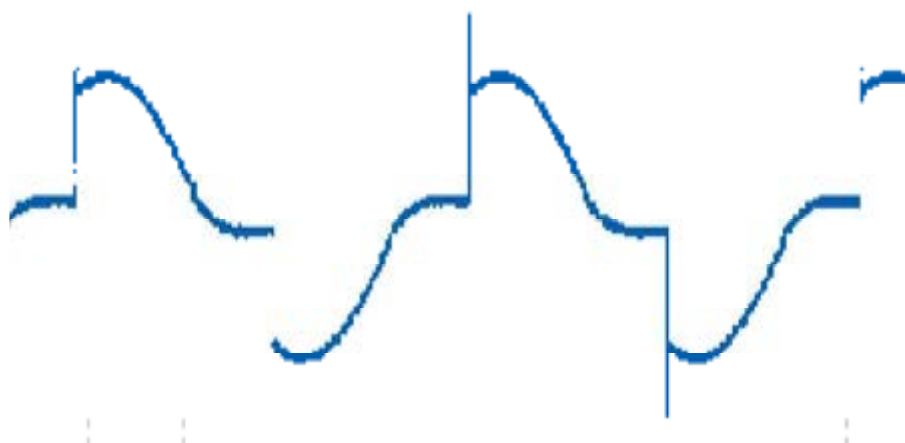


Figura 6.4. Voltaggio di output tipico (asse verticale) nel tempo (asse orizzontale) per un dimmer TRIAC.

Durante l'intervallo di spento del semiciclo del voltaggio, il dimmer necessita di un carico resistivo. Alla fine dell'intervallo di spento, il dimmer entra in funzione. Per rimanere tale per la restante parte del ciclo, il dispositivo ha bisogno che la corrente rimanga al di sopra di un certo valore: se si scende al di sotto, il dimmer si spegne in modo inappropriato, avendo per conseguenza lo sfarfallamento della luce. Elevati picchi di transizione nella corrente di carico possono costituire anch'essi un problema, perché possono far scendere la corrente di carico al di sotto di questa soglia minima.

Le lampade LED non progettate per essere dimmerabili non sono compatibili con i dimmer TRIAC. I circuiti del driver interno solitamente includono un rettificatore, che converte l'input di corrente alternata in continua, e un convertitore di tipo buck o flyback (Fig. 6.5). La corrente di input di questo tipo di driver consiste di picchi brevi ed elevati ad ogni mezzo ciclo del voltaggio di input. Questo tipo di corrente di input non è compatibile con un dimmer TRIAC, e per questo le lampade, quando utilizzate con dimmer TRIAC, non si accendono.



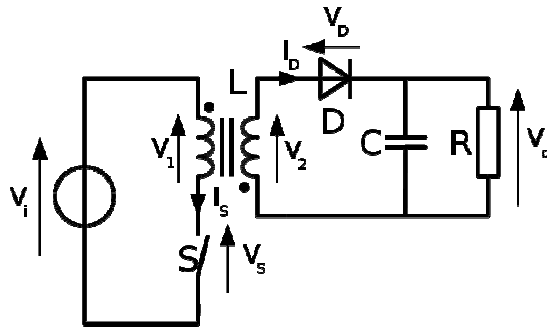


Figura 6.5. Schema di funzionamento di convertitore flyback.

L'infrastruttura elettrica risulta ancora più complessa per le lampade a bassa tensione (12V). In questo caso è però possibile ridimensionare il problema modulando il voltaggio in ingresso con una frequenza maggiore: in questo modo si riducono dimensioni, peso e costo del trasformatore.

Analogamente ai dimmer TRIAC, i trasformatori elettronici hanno bisogno di un certo carico di corrente per rimanere accesi durante tutto il ciclo di voltaggio di input. Se il carico di corrente non è sufficiente, o presenta picchi eccessivamente alti, il trasformatore si può spegnere, causando lo sfarfallamento della sorgente. Analogamente, un driver di un convertitore tradizionale AC/DC può essere incompatibile con il trasformatore e il dimmer, e provocare sfarfallamento.

Altro aspetto importante per le lampade LED, in relazione alla forma della corrente di input, è la correzione del fattore di corrente (*Power-Factor Correction, PFC*), caratteristica di alcuni alimentatori che riduce la quantità di corrente reattiva generata dal carico. Tale corrente non è utilizzabile dal dispositivo elettronico, ma viene comunque inserita in bolletta, per cui limitarla al minimo significa ridurre i consumi energetici. Numericamente, il PFC è il rapporto tra la potenza reale e la potenza reattiva: se tale rapporto è superiore a 0.9, il dispositivo è energeticamente efficiente. Un alimentatore standard ha un PF di 0.70-0.75, mentre un alimentatore con PFC ha un PFC di 0.95-0.99. Poiché i problemi di dimmerabilità e correzione del fattore corrente sono simili, la stessa soluzione dovrebbe poter risolvere entrambi. Una delle soluzioni possibili, forse la migliore, è quella della correzione attiva del fattore di corrente; molte sono le ragioni per cui questa correzione è migliore di quella passiva:

- con la correzione attiva è facilmente raggiungibile un power factor di 0.9 mentre con quello passivo è difficile arrivare a 0.7;
- la correzione attiva permette un controllo molto accurato della corrente di input e quindi può mantenerla al di sopra del livello necessario al dimmer per funzionare adeguatamente per l'intero ciclo di voltaggio di input; con i PFC passivi, la corrente di input rimane zero o vicina a zero per una certa parte del ciclo di voltaggio di input, o risulta sfasata rispetto al voltaggio di input;

- la correzione passiva provoca picchi nella corrente di input, che possono a loro volta causare flicker, mentre la correzione attiva consente la riduzione dell'ampiezza di tali picchi.

La progettazione elettrica delle lampade per retrofitting comprende anche la scelta tra un regolatore di switching a frequenza fissa oppure variabile (schema di transizione), e tra una modalità di conduzione continua, oppure discontinua o di transizione.

Le frequenza fissa offre un vantaggio nella gestione dei problemi legati all'interferenza elettromagnetica (EMI) con altri apparecchi e con la rete elettrica: con una soluzione a frequenza fissa, il progettista deve infatti filtrare solo il rumore EMI a quella particolare frequenza, mentre con una progettazione a frequenza variabile, la frequenza di switching varia, per cui è presente rumore su un vasto intervallo di frequenze e diventa difficile filtrarlo. La conduzione continua offre il vantaggio di mantenere la corrente di picco più bassa, riducendo così le perdite di conduzione, che aumentano con il quadrato della corrente. Con la modalità discontinua o di transizione, le perdite di switching sono più basse perché l'interruttore MOSFET si accende con una corrente del trasformatore pari a zero. Ma i guadagni nelle perdite di conduzione nella modalità di conduzione continua sono spesso maggiori della differenza delle perdite di switching.

La soluzione mostrata in Fig. 6.6 illustra un sistema di alimentazione di dimensioni ridotte, adatto al retrofitting. Tale sistema utilizza un PFC attivo a frequenza fissa in modalità di conduzione continua. In questa soluzione, la corrente di input è conformata come un'onda quadra alla stessa frequenza del voltaggio di input. La forma della corrente massimizza il suo valore durante tutto il ciclo di input, per soddisfare le richieste dei dimmer TRIAC. La corrente di forma quadrata è ottenuta controllando il suo valore medio e mantenendolo costante durante il ciclo di rettificazione del voltaggio di input. Il resistore R1 sente la corrente MOSFET, praticamente la stessa della corrente di input, e le componenti R2 e C2 estraggono la media di questo valore, e forniscono questa informazione al blocco MAX16834, che la mantiene costante con il suo sistema di controllo.

Come già detto, un driver LED compatibile con i dimmer triac ha bisogno di comportarsi come un carico resistivo per il dimmer durante la parte di spento del ciclo di voltaggio di input. In questo schema, le componenti R3, Q1 e il blocco di controllo start-up della corrente svolgono questa funzione, fornendo una resistenza di input in qualsiasi momento in cui la corrente di input del driver scende al di sotto di un certo livello.

Il blocco MAX16834 IC Bias Circuit fornisce un'alimentazione a 15V per il MAX16834 IC. Allo start-up, un circuito di regolazione generale produce questo voltaggio dall'alimentatore in corrente alternata. Una volta che l'IC inizia a trasmettere, un secondo circuito genera questo voltaggio con un traduttore di livello alimentato dal nodo di switch, e va a scavalcare il regolatore lineare. Questo secondo circuito di alimentazione consente un aumento nell'efficienza della soluzione, perché evita la dissipazione di corrente che ha luogo all'interno di un regolatore lineare.

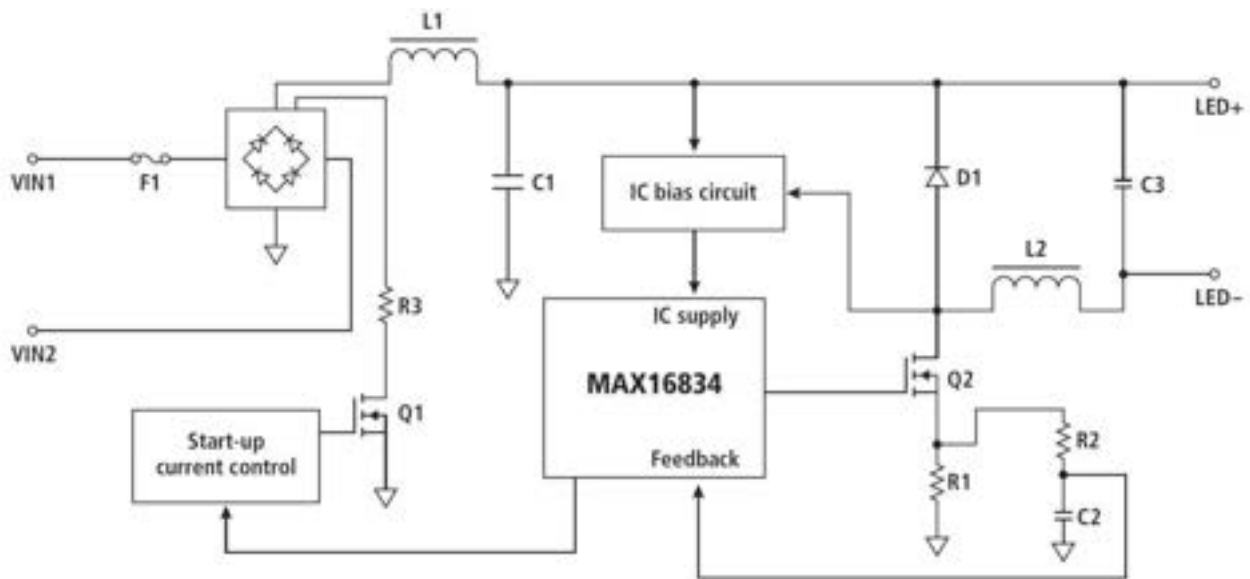


Figura 6.6. Diagramma a blocchi di un driver LED privo senza capacitore elettrolitico.

Questo sistema usa una topologia buck non isolata composta dall'induttore L2, dal diodo D1 e dal MOSFET Q2, è possibile progettare una soluzione simile che utilizzi una topologia isolata di tipo flyback, per cui questa soluzione funziona indipendentemente dal fatto che l'isolamento di sicurezza della lampada LED dal voltaggio di ingresso sia fatta all'interno del driver o nella capsula della lampada.

Il capacitore elettrolitico C3 è opzionale: se presente, la corrente nel LED assume un andamento leggermente curvilineo, con una frequenza pari al doppio del voltaggio di input. Se invece è presente un capacitore ceramico di valore inferiore, la corrente nel LED diventa una sinusoide rettificata, al doppio del voltaggio di input: in questo caso, la durata di vita della lampada può essere estesa oltre le 50000 ore perché non sono presenti capacitori elettrolitici nel circuito.

Il circuito in Fig. 5.6 è stato testato su una superficie di prova, con un input a 120V AC / 60Hz e 9 LED come output per una potenza totale di 12 W. E' inoltre in grado di lavorare con molti dimmer triac (Lutron, Panasonic, Leviton, Cooper, GE e altri). Con i capacitori elettrolitici di output, questo driver regola a zero l'intensità luminosa senza flicker. Senza capacitori elettrolitici, può dimmerare fino al 5% della massima intensità luminosa senza fenomeni di flicker. L'efficienza osservata è dell'83% e l'input power factor è di 0.93.

### Un esempio di retrofitting: la National Gallery a Londra

La National Gallery sarà la prima istituzione al mondo a utilizzare illuminazione LED combinata con un sistema automatico di schermature esterne che si modificano con l'angolo e la quantità di luce naturale: in questo modo le opere saranno illuminate solo da luce diffusa e priva di componente UV. Dopo test preliminari positivi, la galleria ha deciso di installare LED, con un risparmio dei

consumi energetici dell'85%: i dispositivi utilizzati sono lampade per retrofitting A19, che verranno installate al posto delle comuni lampade ad incandescenza da 60W.

La Tab. 6.1 illustra una varietà di approcci alla progettazione di tale tipo di lampada, molto richiesta, ma dal prezzo ancora troppo elevato per essere impiegata in grandi quantità e dal flusso luminoso ancora troppo ridotto.

Tabella 6.1. Parametri principali di alcune lampade per retrofitting di sorgenti ad incandescenza da 60W, al variare del numero di LED. Fonte: Philips Lumileds.

Consumo del bulbo	13,9W	13,0W	12,1W	11,2W
Numero di LED	6	8	11	16
Corrente di alimentazione del LED (mA)	670	480	330	215
Consumo dei LED (W)	11,8	11,1	10,3	9,6
Efficienza dei LED (lm/W)	68	73	78	84
Temperatura del LED (25°C/45°C)	106/125	96/115	87/106	79/98
Temperatura della giunzione (25°C/45°C)	94/113	88/107	81/100	75/95
Temperatura del dissipatore (25°C/45°C)	90/109	85/104	79/99	74/93
Efficienza del bulbo (lm/W)	58	62	66	71

### Retroilluminazione per monitor LCD

Il mercato globale dei LED HB dal 2009 al 2010 è cresciuto del 93%: la maggiore crescita è stata osservata nel settore della retroilluminazione per le tv LCD e i monitor LED, quasi 10 volte rispetto al 2009, raggiungendo il 33% di tutto il mercato HB-LED nel 2010. Si prevede inoltre che nei prossimi 2 anni tale settore continuerà a costituire il motore della crescita del mercato LED, stabilizzandosi poi nel 2013, quando l'illuminazione diventerà il settore predominante, come risultato dell'interesse globale verso l'efficienza energetica e della dismissione delle lampade a incandescenza. Per quanto riguarda la tecnologia impiegata in questo settore di mercato, si stima che entro il 2012 il 70% dei monitor LCD avrà retroilluminazione LED al posto dell'illuminazione fluorescente a catodo freddo tradizionale. Il fatto che il programma Energy Star abbia fornito delle specifiche per le TV, indicando la corrente massima a TV accesa, contribuirà a mettere in secondo piano altre tecnologie come il plasma, che consumano più del doppio dell'LCD con retroilluminazione LED.

Una delle problematiche principali nella progettazione dei monitor per visione 3D è il circuito di alimentazione della retroilluminazione LED: i dispositivi di retroilluminazione hanno infatti bisogno di essere accesi e spenti con elevatissima previsione temporale e, negli schermi 3D, anche con correnti di picco relativamente alte, per cui la regolazione della corrente deve essere molto accurata. Oltre al risparmio energetico, la retroilluminazione LED fornisce superiore resa del colore e saturazione e una durata di vita oltre le 100000 h.

Esistono due tecnologie per la retroilluminazione LED (Fig. 6.7):

- retroilluminazione indiretta, quando i LED sono posti ai bordi dello schermo, con una guida che distribuisce la luce uniformemente su tutto l'LCD. Questo tipo di tecnologia può essere sviluppata con una buona uniformità degli schermi fino a 40 pollici e consente spessori molto ridotti (5-10mm);
- retroilluminazione diretta, quando i LED sono posizionati direttamente dietro l'LCD, consentendo basso consumo, buona gestione termica e pressoché infinita scalabilità, con nessun limite alla dimensione dello schermo. I pannelli in questo caso sono più spessi (10-25mm). Uno dei vantaggi principali è che la retroilluminazione diretta consente il dimmeraggio a livello locale, che riduce il consumo elettrico e aumenta il contrasto dinamico.

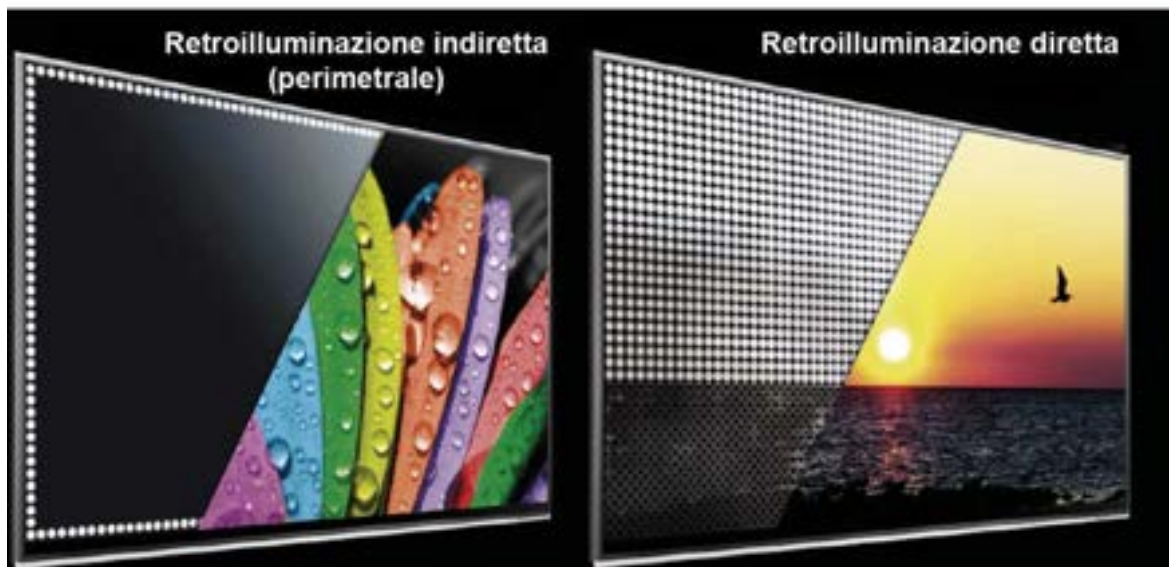


Figura 6.7. Le due principali tecniche di retroilluminazione LED: retroilluminazione indiretta, con diodi posizionati sui bordi dello schermo e guida di luce che distribuisce il flusso e retroilluminazione diretta, con diodi posizionati dietro lo schermo.

Per la visualizzazione 3D stereoscopica, sono impiegati occhiali con vetri speciali, chiamati "shutter", per influenzare l'elaborazione delle immagini dell'occhio sinistro e destro: tali vetri sono superiori a quelli polarizzati perché offrono una migliore risoluzione 3D e una visione 2D

eccezionale. A differenza degli occhiali con lenti polarizzate, che presentano delle scanalature orizzontali per un occhio e verticali per l'altro, in modo da far cogliere fotogrammi alternati, le lenti shutter si oscurano alternativamente in seguito a ricezione wireless di un impulso radio.

Negli schermi a retroilluminazione LED di ultima generazione la sfida, rispetto al funzionamento dei vetri shutter tradizionali, è quella di evitare il flicker e il cross talk: per evitare lo sfarfallamento è stato deciso di duplicare la velocità di refresh del display da 120Hz a 240Hz. Il cross-talk, che è la presenza dell'immagine del canale sinistro all'interno della vista dell'occhio destro e viceversa, è un problema più complesso da risolvere. La percezione del cross-talk è un'immagine fantasma a lato all'immagine che si dovrebbe percepire (Fig. 6.8). Evitare il cross-talk richiede una sincronizzazione estremamente precisa dell'LCD, della retroilluminazione LED e del vetro shutter.



Figura 6.8. Immagine da televisore LED dove è evidente il fenomeno delle immagini fantasma dovute al cross-talk.

Gli shutter a cristalli liquidi (*Liquid-Crystal Shutter, LCS*) hanno due problemi che devono essere presi in considerazione: il primo è che hanno bisogno di un tempo significativo per passare da opachi a trasparenti; il secondo è che la trasparenza non è mai completa, per cui c'è una diminuzione di luminosità.

Anche il tempo di risposta dell'LCD deve essere preso in considerazione: in modalità 3D, devono essere applicate ai LED correnti elevate per periodi di tempo molto brevi e con un controllo della sincronizzazione estremamente preciso.

L'accuratezza del driver LED deve essere minore o uguale all'1,5%. Questa accuratezza deve includere tutte le deviazioni introdotte dal driver LED stesso e dai resistori che stabilizzano la corrente in ingresso al driver. Il valore è molto difficile da raggiungere, se si pensa che la corrente

di alimentazione è normalmente settata tramite un resistore esterno che ha un'accuratezza dell'1%. Dal punto di vista del sistema, c'è solo una tolleranza dello 0,5% che può essere utilizzata dal driver.

La domanda per sistemi di retroilluminazione diretta, rispetto a quelli a illuminazione perimetrale, è destinata a crescere perché supporta il dimmeraggio locale che aiuta a ridurre i consumi energetici.

Implementare una modalità 3D in una TV LED porta agli estremi il bisogno di un controllo accurato della corrente, di una corrente di picco elevata, di un elevato numero di canali, di una velocità di risposta e accuratezza all'interno del driver LED. Allo stesso tempo, le esigenze di risparmio energetico forzano i produttori ad utilizzare schemi di risparmio avanzati con soluzioni di dimmeraggio intelligenti in entrambe le tipologie di retroilluminazione.

### **Illuminazione per la crescita vegetale**

Ricerche recenti hanno dimostrato che l'illuminazione LED può essere estremamente benefica per la salute e lo sviluppo delle piante: quando le lunghezze d'onda dei diodi sono impostate per corrispondere in modo preciso ai picchi di assorbimento della clorofilla, i risultati possono essere incredibili, producendo prodotti privi di pesticidi e con lo stesso sapore e contenuto nutritivo di quelli cresciuti all'aria aperta. La ricerca sta progredendo rapidamente nel settore dell'agricoltura industriale e si sta rivolgendo all'illuminazione LED per potenziare la produttività nelle serre e nell'agricoltura in spazi chiusi, sia per ragioni di risparmio energetico che per altri motivi, come la possibilità di evitare pesticidi, di utilizzare spazi in ambienti urbani e di ottenere più di un raccolto l'anno. Le sorgenti LED possono produrre luce a lunghezze d'onda specifiche che ottimizzano la crescita vegetale, e un gran numero di enti di ricerca ed imprese commerciali nel mondo stanno svolgendo ulteriori approfondimenti sull'argomento. L'illuminazione LED può inoltre permettere altri vantaggi in orticoltura, legati alla "coltivazione multistrato" e all'"inter-illuminazione", in cui le sorgenti luminose si estendono verticalmente tra le piante.

Due sono gli scenari principali in cui l'illuminazione LED può essere utilizzata in orticoltura: il primo è nelle coltivazioni indoor che non ricevono luce naturale e in cui si utilizza la stratificazione su ripiani per stipare il maggior numero di vegetali possibili nello spazio a disposizione. Questo tipo di agricoltura è sempre più diffuso in Giappone dove, complice la carenza di terreni coltivabili, sono nate centinaia di queste industrie ortofrutticole. L'uso dei LED in questo settore è relativamente nuovo: la maggior parte utilizza infatti lampade a scarica ad alta intensità oppure sorgenti fluorescenti. Le piantagioni al chiuso offrono alcuni vantaggi aggiuntivi, come il fatto che le malattie non possono raggiungere le piante e quindi non c'è bisogno di utilizzare composti chimici durante la crescita: i vegetali sono commestibili anche senza essere lavati. Inoltre, è possibile controllare molti parametri ambientali come l'umidità e la temperatura.

In Europa, invece, i LED sono impiegati in un altro modo, cioè per fornire illuminazione aggiuntiva all'interno di serre illuminate naturalmente. In entrambe le applicazioni, i LED forniscono un'alternativa a risparmio energetico rispetto alle altre sorgenti luminose artificiali.

La chiave per l'impiego dei LED in agricoltura risiede nella conformazione dello spettro di assorbimento della clorofilla. La clorofilla è una molecola organica presente nelle foglie delle piante che assorbono la luce. E' una sostanza fondamentale per il processo di fotosintesi in cui le piante utilizzano l'energia proveniente dalla radiazione luminosa solare per convertire l'anidride carbonica in composti organici come gli zuccheri, che forniscono il nutrimento alla pianta. I ricercatori hanno scoperto che la clorofilla ha due picchi di assorbimento, uno nella regione blu e uno nella regione rossa dello spettro, e che assorbe poco nella regione verde. La maggior parte delle coltivazioni che utilizzano luce artificiale fanno uso di sorgenti ad ampio spettro, come le lampade ai vapori di sodio ad alta pressione: la distribuzione spettrale di queste sorgenti, però, non è centrata sui picchi di assorbimento della clorofilla, e quindi gran parte dell'emissione risulta sprecata, con conseguenti spreco energetico e crescita non ottimale dei vegetali.

In effetti, il grafico della potenza relativa di una sorgente ai vapori di sodio ad alta pressione (Fig. 6.9) mostra più energia concentrata nelle lunghezze d'onda del verde, rispetto a quelle del rosso e del blu.

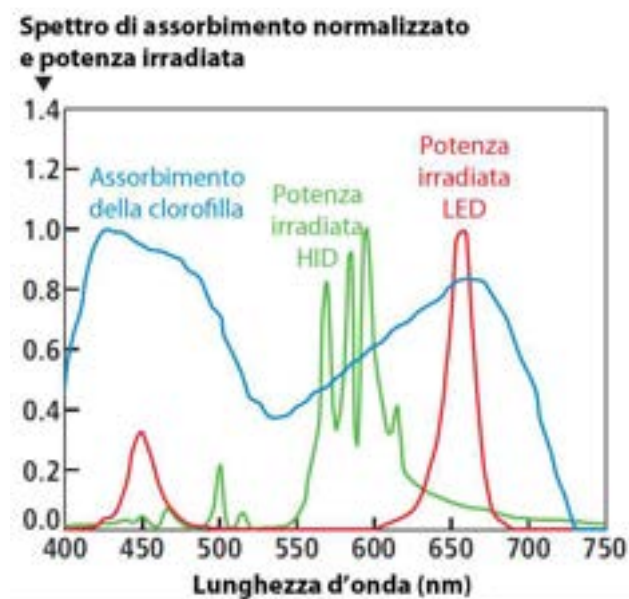


Figura 6.9. I LED possono essere scelti per corrispondere esattamente alla curva di assorbimento della clorofilla.

La ricerca sulla clorofilla sta portando il mercato dell'illuminazione a focalizzare l'attenzione sulla luce rossa e blu e più in particolare sulle lunghezze d'onda di 455nm e 660nm, che mescolate riescono a coprire in modo ottimale i picchi di assorbimento. In realtà, i prodotti LED ottimizzati per l'agricoltura sono per la maggior parte in fase di sviluppo. LED blu efficienti sono già a



disposizione, mentre i LED rossi sono generalmente meno efficienti, specie alla lunghezza d'onda necessaria per l'agricoltura.

I ricercatori stanno ancora sperimentando i mix di lunghezze d'onda ottimali per la crescita di diversi tipi di piante nelle loro diverse fasi di crescita (Fig. 6.10): la composizione spettrale ottimale è risultata solitamente quella composta da un numero variabile tra 4 e 10 LED rossi per ogni LED blu. Gli studi effettuati dalla Philips, ad esempio, hanno rivelato che l'esposizione ad una maggiore quantità di radiazione rossa porta alla crescita di piante di forma più allungata, mentre una maggiore quantità di luce blu porta alla crescita di piante compatte: per questo motivo i ricercatori definiscono i LED come uno strumento per "guidare la crescita delle coltivazioni".

La Fiona Lighting ha realizzato un sito di prova in Danimarca (Fig. 6.10b), dove sono stati utilizzati un totale di 50000 LED Osram Golden Dragon Plus per illuminare diverse migliaia di metri quadri di coltivazione di campanula: tale progetto pilota ha evidenziato i risparmi energetici dovuti all'impiego dei LED, con un consumo pari al 40% in meno rispetto all'equivalente ai vapori di sodio ad alta pressione. Per quanto riguarda l'effetto sulle piante, è più difficile da stabilire perché i fiori si sono sviluppati con la stessa velocità sotto le due sorgenti, anche se con i LED si è ottenuto un maggiore numero di boccioli, ed è stato necessario utilizzare meno composti chimici.



a)



b)

Figura 6.10.

- a) Strati di vegetali illuminati dagli apparecchi GL-Flora di Everlight.
- b) la Fiona Lighting utilizza LED Osram per un sito di prova in Danimarca.

Il sito di prova della Fiona ha impiegato lampade montate a soffitto: in realtà, grazie alla loro flessibilità d'uso, i LED possono offrire benefici maggiori in nuovi scenari di crescita come ad esempio l'illuminazione stratificata utilizzata in coltivazioni indoor e serre (Fig. 6.10b).

Un altro scenario è l'inter-illuminazione, il cui scopo è massimizzare la quantità di luce che raggiunge le foglie della pianta sistemando apparecchi lineari in verticale tra le piante. La Purdue University ha individuato l'inter-illuminazione come strumento ottimale all'interno di un sito di prova dove sono stati piantati pomodori ad alto fusto. I pomodori cresciuti in serra possono raggiungere altezze di 6m: né le lampade a soffitto né la luce solare possono raggiungere in modo efficace le foglie inferiori della pianta: l'inter-illuminazione invece può aumentare la fotosintesi e la fioritura e quindi, in ultima istanza, il raccolto. La Purdue University lavorerà con la Rutgers, l'Università dell'Arizona, la Michigan State University e la Orbital Technologies Corp per un progetto di durata quadriennale.

Un altro approccio per l'inserimento di LED tra le piante in posizioni insolite è stato sviluppato in Finlandia per le serre, dove la Netled Oy, in collaborazione con la Osram, ha sviluppato un sistema di tipo continuo caratterizzato da strisce orizzontali di LED. Tale sistema è stato testato in una serra a Honkajoki, in Finlandia (Fig. 6.11).



Figura 6.11. La Nestled Oy ha sviluppato un sistema tipo tenda a LED.

## Illuminazione e salute umana

La relazione fisica tra luce e salute umana è nota da pochi anni: solo nel 2002, infatti, due gruppi di ricerca scoprirono contemporaneamente l'esistenza di un terzo fotoricettore posto all'interno della retina umana. Tale fotoricettore, chiamato melanosina, ha lo scopo di sincronizzare l'orologio biologico con il ciclo naturale giorno/notte dando l'input per l'inibizione alla produzione di melatonina, nota come l'"ormone dell'oscurità" e secreta durante le ore notturne. La sempre maggiore esposizione notturna a livelli di illuminamento elevati, abbinata alla permanenza diurna in ambienti poco illuminati ha portato però gli esseri umani a sperimentare tutta una serie di patologie prima sconosciute, dovute alla desincronizzazione dell'orologio biologico con i ritmi naturali e con quelli di vita. Le conseguenze di tali disturbi, transitori o permanenti, possono essere anche molto gravi: sembra infatti che esista una relazione causale tra un'esposizione inappropriata alla luce e la maggiore probabilità di sviluppare alcune neoplasie, prime tra tutte il cancro al seno e al colon-retto. La ricerca sul sistema circadiano, che è appunto il sistema che regola i ritmi biologici, ha portato alla scoperta delle principali caratteristiche dello stimolo luminoso che lo influenza: tali dati sono riportati nella Tab. 6.1. In linea generale, il sistema circadiano viene stimolato solo in presenza di livelli di illuminamento abbastanza elevati, a volte non raggiunti all'interno di spazi chiusi poco illuminati; la massima sensibilità della melanosina è nelle lunghezze d'onda del blu, e la parte inferiore della retina contiene un maggior numero di fotoricettori, il che risulta in una maggiore sensibilità della luce proveniente dalla metà superiore del campo visivo.

Tab. 6.1. Confronto tra le modalità di stimolazione del sistema visivo e di quello circadiano.

	<b>Sistema visivo</b>	<b>Sistema circadiano</b>
<b>Quantità</b>	Soglia di attivazione bassa	Soglia di attivazione alta
<b>Spettro</b>	Picco di sensibilità nel giallo-verde (555nm)	Picco di sensibilità nel blu-verde (480nm)
<b>Distribuzione spaziale</b>	Sensibilità costante in tutta la retina	Maggiore sensibilità nella parte inferiore della retina
<b>Durata dell'esposizione</b>	Esposizione breve, risposta immediata (centesimi di secondo)	Esposizione prolungata, risposta lenta (minuti)
<b>Orario di esposizione</b>	Sensibilità costante nel tempo	Sensibilità variabile con l'ora soggettiva

La differenza di sensibilità tra il sistema circadiano e quello visivo, Fig. 6.12, risulta in una differente efficienza delle varie sorgenti luminose: ciò vuol dire che una sorgente che offre buoni livelli di illuminamento fotopico può non fornire sufficiente stimolazione circadiana e viceversa. In

questo contesto, la possibilità di conformare accuratamente l'emissione spettrale LED risulta essere un grande vantaggio.

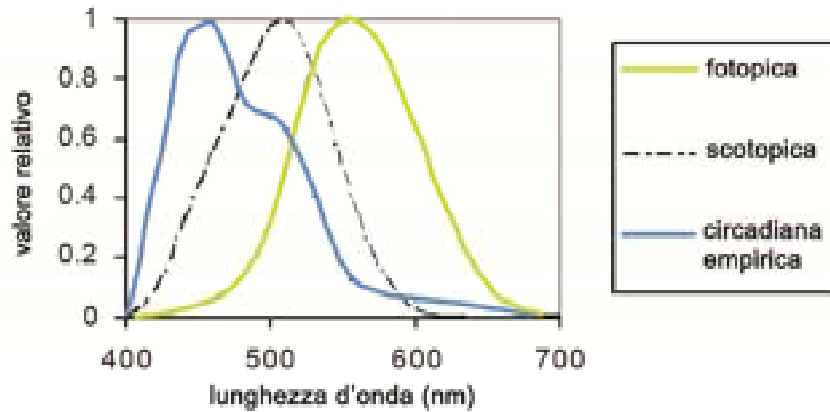


Figura 6.12. Curva di sensibilità fotopica e circadiana empirica a confronto.

Un'ultima nota riguarda la soggettività della risposta circadiana alla medesima esposizione luminosa: come mostrato in Fig. 6.13, la risposta del sistema circadiano varia al variare dell'ora soggettiva, ossia della fase di secrezione della melatonina. A titolo esemplificativo, se una persona che si trova in fase con il ritmo giorno notte viene esposta alla luce nelle prime ore del giorno, la sua fase circadiana avanza, portandola quindi ad avvertire sonnolenza prima alla sera. Se la stessa persona viene esposta alla luce in tarda serata, l'effetto sarà che resterà sveglia più a lungo. La soggettività risiede nel fatto che esponendo invece un lavoratore che si è adattato al lavoro notturno agli stessi stimoli luminosi la reazione dell'orologio biologico sarà completamente diversa.

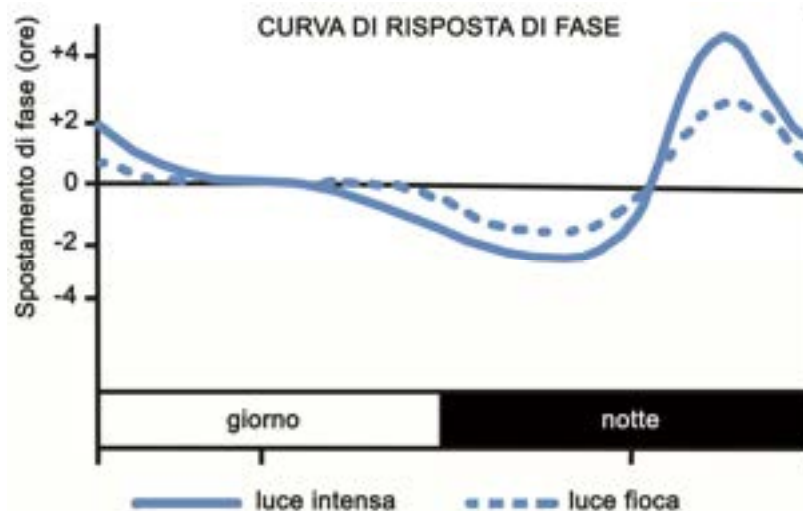


Figura 6.13. Curva di risposta di fase circadiana.

Nel corso del 2009, il dibattito sulla luce artificiale e il suo impatto sui ritmi circadiani e sulla salute umana si è intensificato. A ottobre dello stesso anno l'IDA (*Dark Sky Association*) ha pubblicato un manifesto il cui incipit recitava "La rapida espansione nell'uso dell'illuminazione per esterni di colore bianco bluastrò minaccia la visibilità notturna e mette a repentaglio l'ambiente naturale in tutto il mondo": l'organizzazione no-profit, che si dedica alla protezione dell'ambiente notturno, suggerisce che le luci con temperature di colore correlate (CCT) sopra 3000K non dovrebbero essere utilizzate per l'illuminazione di esterni.

Solo quest'anno, oltre agli studi portati avanti dai vari enti di ricerca, sono stati pubblicati due report rispettivamente dell'ASSIST (*Alliance for Solid-State Illumination and Technologies*) e del DOE, entrambe finalizzate all'analisi dell'impatto della luce artificiale di notte sugli esseri umani.

Il report dell'ASSIST, redatto dall'LRC (*Lighting Research Center*) e intitolato "Il potenziale dell'illuminazione di esterni nella stimolazione del sistema circadiano" non si indirizza verso i potenziali rischi della salute, ma piuttosto sull'analisi di una serie di casi studio per meglio comprendere gli aspetti relativi all'effettiva stimolazione del sistema circadiano. La ricerca ha studiato l'impatto della luce sui livelli di melatonina: il documento presenta i risultati di una serie di test svolti nel 2010, e conclude che scenari di illuminazione notturna realistici hanno un impatto scarso o inesistente sugli esseri umani, impatto misurato per mezzo della soppressione della melatonina. I test si sono basati sulla misura del potenziale impatto circadiano di quattro sorgenti luminose: due apparecchi LED a luce fredda attualmente in commercio, una lampada a ioduri metallici, e una lampada ai vapori di sodio ad alta pressione (HPS). Il report presenta un caso di riferimento supportato da precedenti ricerche di laboratorio in ambiente controllato, in cui persone ventenni sono state esposte per un'ora ad una sorgente luminosa. Il caso di riferimento è equivalente ad una persona che guarda in alto direttamente sotto un lampione con illuminamento di 95 lux sulla cornea.

La ricerca presenta poi due scenari più realistici:

- Scenario 1: l'equivalente di una persona che si trova in piedi a 3 metri dal lampione e guarda la strada. Questo produce un illuminamento massimo sulla cornea di 27 lux.
- Scenario 2: l'equivalente di una persona che si trova a 10m dal palo e guarda direttamente l'apparecchio. Questa situazione produce un illuminamento massimo sulla cornea di 18 lux.

Nei risultati, la soppressione della melatonina in seguito all'esposizione alla luce è espressa come impatto percentuale sui livelli normali di melatonina: nella condizione di riferimento, tutte le sorgenti analizzate hanno portato un certo livello di soppressione, che varia dal 6% della lampada HPS al 30% della sorgente LED con CCT di 6900K. Negli Scenari 1 e 2, solo la sorgente a 6900K ha causato nei soggetti una soppressione variabile dal 3 al 10%. Il report sottolinea poi il fatto che precedenti ricerche hanno rivelato che la soppressione notturna di melatonina deve essere

maggiore del 15% perché la misura possa essere considerata affidabile: secondo il direttore dell'LRC, Dott. M. Rea, i valori trovati non sono pertanto attendibili come indicazione della effettiva soppressione notturna della melatonina dovuta all'esposizione alla luce.

Elemento di debolezza del protocollo sperimentale adottato è sicuramente la scarsa durata del test: un'esposizione di un'ora probabilmente non è una durata realistica di esposizione alla luce artificiale durante le ore di buio. Se poi si pensa che, a causa di un'illuminazione stradale che non ha un flusso luminoso ben direzionato, spesso le finestre dei secondi piani degli edifici sono più illuminate del piano stradale, è facile intuire la dimensione reale del fenomeno. Va inoltre sottolineato che esistono scenari anche peggiori di quelli testati nelle prove di laboratorio: è questo il caso dei lavoratori notturni: questa categoria, che comprende tra gli altri anche personale ospedaliero e personale di volo, richiede con urgenza studi sull'impatto dell'esposizione alla luce nell'arco delle 24 ore sul sistema circadiano.

Il report del DOE, intitolato "Light at night: the last science", discute invece le possibili implicazioni per la salute dell'esposizione alla luce di notte, al fine di provare a fornire delle indicazioni ai cittadini sull'uso consapevole dell'illuminazione. Dopo aver fornito una sintesi dello stato dell'arte su questo settore di ricerca, vengono fornite delle indicazioni per la ricerca futura, elencando per ogni ambito le azioni da intraprendere. Nel settore relativo alla salute umana, anche in questo caso spicca la necessità di acquisire dati nell'arco delle 24 ore.

### Trattamento luminoso per patologie

Molte malattie possono essere inoltre curate con i LED, prima tra tutte la SAD (*Seasonal Affective Disorder*): tale patologia, di cui soffrono circa il 20% delle persone che abitano a latitudini elevate, si manifesta d'inverno come forma depressiva di entità variabile, direttamente legata alla carenza di esposizione all'illuminazione naturale. La terapia prevede l'esposizione giornaliera per intervalli di tempo compresi tra 30 minuti ed un'ora, alla luce blu proveniente da dispositivi chiamati light box, di cui è visibile un esempio in Fig. 6.14: attraverso l'uso di tali dispositivi si inibisce la produzione diurna di melatonina, riallineando così l'orologio biologico.

Altre applicazioni terapeutiche sono invece basate sulla capacità della radiazione dei diodi di influire sul funzionamento dei mitocondri all'interno delle cellule, facendo comportare le cellule "vecchie" come se fossero "nuove": in dermatologia sono impiegati con successo nell'accelerazione dei processi di cicatrizzazione delle ferite, nella riduzione dei processi infiammatori, e nel miglioramento dei danni solari, in quanto sono in grado di accelerare la crescita di nuovo collagene (Fig. 6.15).

Alcune lunghezze d'onda sono poi impiegate in modo specifico nel trattamento di alcune patologie:

- la luce blu nell'intervallo 405-420 nm per curare l'acne;

- la luce rossa e l'IR nell'intervallo 600-950nm per trattare acne, rosacea e rughe;
- luce verde e gialla nell'intervallo 532-595nm per ridurre il rossore e i capillari.



Figura 6.14. Apparecchio goLITE di Philips per il trattamento della SAD.



## Illuminazione di uffici

I sistemi di illuminazione a LED possono essere controllati elettronicamente, e possono essere integrati all'interno dei sistemi di controllo degli edifici intelligenti. Il settore dell'illuminazione architettonica per gli uffici è sicuramente quello dove tali potenzialità possono trovare espressione, migliorando al contempo la vita dei lavoratori; d'altra parte, l'adozione di tali sistemi potrebbe risultare ostacolata dalla necessità di maggiori conoscenze su come le persone percepiscono gli spazi illuminati con i LED, su come li utilizzerebbero se ne avessero il controllo, e su come essi influenzino la loro performance e la loro salute. Si riporta nel seguito a titolo di esempio uno studio dell'NRC-IRC.

Gli effetti dell'illuminazione degli uffici sulla percezione, sulla performance e sulla soddisfazione degli occupanti, così come l'efficienza energetica, sono da trenta anni oggetto di ricerca del programma sull'illuminazione dell'IRC (*Institute for Research in Construction*), sottoprogramma dell'NRC (*National Research Council*) del Canada. L'ente ha iniziato nel 2008 l'attività di ricerca sui LED con due filoni principali di indagine: lo sviluppo di nuove idee per l'illuminazione degli uffici da un lato, e gli esperimenti di laboratorio volti alla comprensione delle preferenze cromatiche umane relativamente all'illuminazione dall'altro. Poiché la tecnologia LED è totalmente diversa dalle sorgenti tradizionali e in grado di aprire nuove strade nella progettazione illuminotecnica, il gruppo di ricerca dell'NRC-IRC è costituito da persone con formazioni diverse, provenienti dall'industria e dall'università: scopo del lavoro è lo studio di sistema di illuminazione LED, così come potrebbe essere presente, in un prossimo futuro, negli uffici.

*Esperimento con un modello in scala.* Con un modello in scala è stato esaminato il ventaglio di temperature di colore e distribuzioni spettrali preferite dai partecipanti. Il modello in scala ha costituito un'opzione economica per creare e testare gli scenari desiderati: i partecipanti hanno osservato ogni condizione luminosa su un modello realistico 1:6 di un ufficio tipico, completo di tutti gli accessori comunemente presenti in tale ambiente, posizionato all'interno di una cabina illuminata (Fig.6.16). Il colore predominante dell'ambiente modello era un grigio monocromatico, per evitare che i partecipanti avessero un qualunque tipo di pregiudizio sul colore, anche se alcuni degli accessori inseriti nel modello, come ad esempio i raccoglitori e le immagini sul muro e del monitor del computer, sono stati colorati con tinte sature per fornire degli accenti cromatici.

I partecipanti hanno dapprima valutato l'aspetto del modello in termini di colore, piacevolezza e luminosità sotto sei illuminanti diversi: una sorgente fluorescente a 4100K e cinque spettri LED creati utilizzando varie combinazioni di cinque canali (rosso, verde, blu, bianco freddo e bianco caldo).

Lo scenario A (2855K) e lo scenario D (6507K) riprendevano rispettivamente l'illuminante A e l'illuminante D65 della CIE. Gli altri tre scenari LED – E (3728K), B (4751K) e C (5769K) sono stati distribuiti per CCT su una scala tra lo scenario A e lo scenario D. Lo scenario E è stato posto a 3728K per corrispondere esattamente alla CCT della lampada fluorescente (Fig. 6.17).





Figura 6.16. Il modello in scala di un ufficio utilizzato nell'esperimento presso l'NRC-IRC.

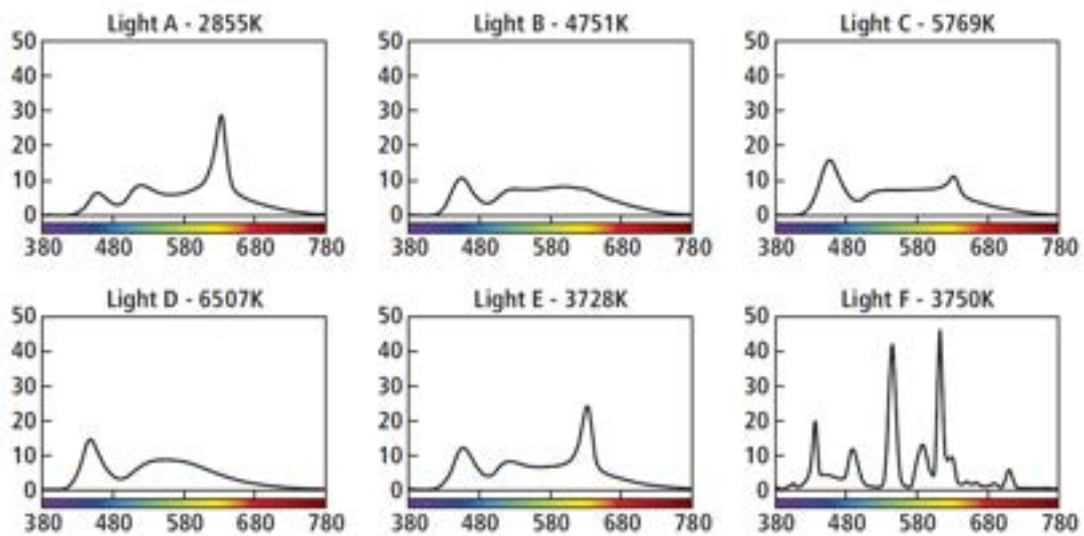


Figura 6.17. Gli spettri delle sei condizioni luminose testate.

Nella seconda fase, ogni partecipante era libero di bilanciare i cinque canali dei LED per creare la propria illuminazione preferita: una prima volta senza limitazioni, una seconda volta con l'obbligo di mantenere 500 lux sul piano di lavoro.

I risultati preliminari di questo secondo test hanno mostrato una vasta preferenza per la possibilità di regolare la distribuzione spettrale della sorgente, e grande variabilità per quanto riguarda invece le condizioni luminose, anche quando i partecipanti avevano il controllo sulle coordinate cromatiche della luce emessa dalle sorgenti. Questi risultati (Fig. 6.18) confermano l'importanza

del controllo individuale e personale sulla luce. I LED con canali multipli possono offrire il controllo individuale sullo spettro della sorgente, cosa che sarebbe impossibile con le altre tecnologie.

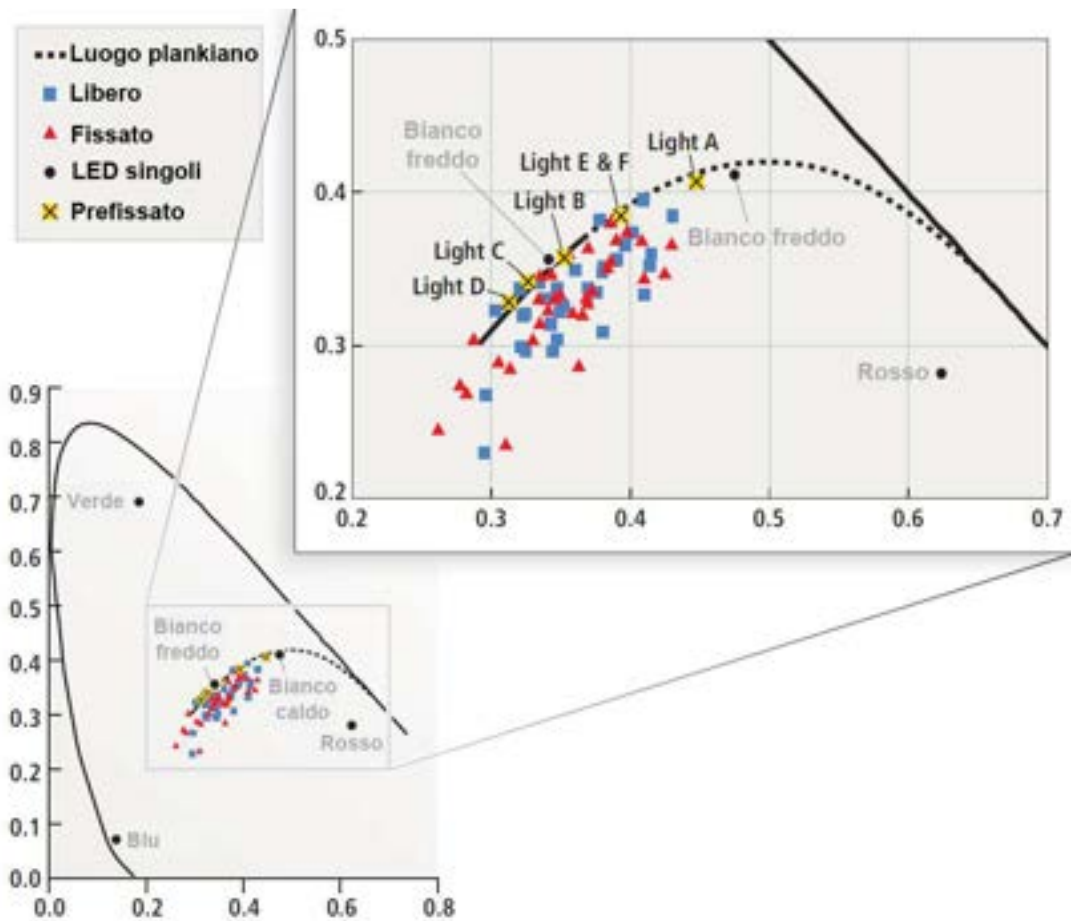


Figura 6.18. Il range di libere scelte dei partecipanti riguardo la composizione spettrale della luce, trasferito su un diagramma di Cromaticità della CIE.

*Esperimento a scala reale.* Successivamente è stato sviluppato un esperimento a scala reale. Uno dei laboratori dell’NRC-IRC è stato riprogettato ed equipaggiato con otto apparecchi LED disegnati dal centro stesso (Fig. 6.19) Ogni apparecchio ha 8 LED engines RGBW che possono essere controllati ciascuno con un protocollo DMX: il flusso luminoso emesso globalmente da ogni apparecchio è circa 3500lm. Gli utenti possono creare la luce bianca che preferiscono utilizzando un software per il controllo dei LED. L’interfaccia utilizza il mouse come puntatore su una palette di colori accuratamente progettata. Il software legge i valori RGB dall’immagine sullo schermo e li converte in segnali digitali.

In questo esperimento, i partecipanti lavorano nell’ufficio per una giornata intera, completando un lavoro d’ufficio simulato e dei questionari relativi alle loro opinioni sullo spazio, al loro umore e alla loro soddisfazione. La giornata inizia con uno spettro fisso (3000K o 6500K), e la metà dei partecipanti ha l’opportunità di controllare lo spettro a partire da dopo pranzo. L’esperimento è ancora in corso, per cui i dati saranno disponibili in futuro.



Figura 6.19. Lo scenario per i test alla dimensione reale.

## Capitolo 7

### Evoluzione nelle normative e nelle certificazioni

*Mentre la necessità e la richiesta di efficienza energetica continuano a crescere, i programmi e le regolamentazioni si moltiplicano e si perfezionano: lo scopo di tali documenti è quello di consentire agli acquirenti di tutti i settori del mercato LED di scegliere i prodotti con sicurezza sia per quanto riguarda la qualità della luce che l'efficienza energetica. L'impatto che tali certificazioni stanno avendo sull'adozione dei LED è positivo, specialmente nel settore residenziale e commerciale; ciononostante, sia gli enti nazionali che i produttori di LED sono consapevoli che ancora molto c'è da fare per la tecnologia SSL in termini normativi.*

*Nel settore della regolamentazione, gli Stati Uniti sono ad uno stadio più avanzato, mentre l'Europa non si è ancora interessata estensivamente alla questione SSL: per recuperare lo stato di arretramento nella ricerca e nella normativa, a dicembre 2010 è stato siglato un accordo tra i due continenti per la mutua collaborazione a fini di ricerca sul tema del risparmio energetico, con lo scopo di produrre delle normative valide a livello globale.*

*Negli USA prosegue in particolare lo sviluppo dell'etichetta di efficienza energetica denominata Energy Star: sono state introdotte modifiche sostanziali nelle modalità di accreditamento, passando da una autodichiarazione del produttore, a seguito di test svolti nei laboratori aziendali, a una procedura di test standardizzata, che si svolge in laboratori accreditati; sono inoltre stati modificati i valori limite accettabili per i vari parametri, divenuti più restrittivi a seguito dei miglioramenti tecnologici avvenuti. Il programma sta prendendo quota a livello commerciale, con diverse centinaia di prodotti testati e certificati.*

*Ancora non è risolto il problema della previsione del decadimento del flusso dei LED: dopo la pubblicazione dello standard IES LM-80 nel 2008, che si proponeva come modello per la previsione della durata di vita utile sulla base di test di 6000 ore, è stato istituito il TM-21 allo scopo di migliorare l'attendibilità dei modelli: tale comitato tecnico non ha, però, ancora pubblicato la specifica, per via delle molteplici questioni irrisolte legate all'argomento.*

*Settore di ricerca più legato allo sviluppo industriale è invece quello relativo alla codifica di un nuovo metodo per la determinazione della resa cromatica delle sorgenti LED: nessuna novità rispetto allo scorso anno, in quanto né il CQS né il GAI hanno ancora ottenuto l'approvazione ufficiale del TC 1-69 della CIE, comitato tecnico preposto alla ricerca di un nuovo metodo di valutazione della resa cromatica.*

*Contemporaneamente ai maggiori settori di ricerca, sono stati pubblicate norme riguardanti aspetti specifici, come la sicurezza dell'apparecchiatura elettronica di alimentazione e l'intercambiabilità dei componenti.*

## L'EPA /DOE e il programma Energy Star

L'etichetta Energy Star è stata ideata dall'EPA (*Environmental Protection Agency*), con il supporto del DOE (*Department of Energy*) allo scopo di fornire agli utenti la garanzia che il prodotto di illuminazione che la riporta fornirà esattamente il flusso luminoso e i livelli di colore riportati sulla confezione.

Sotto il nome Energy Star ricadono due specifiche: una per gli apparecchi, l'altra per le lampade. Per quanto riguarda la prima, denominata "Requisiti per gli apparecchi illuminanti", la prima bozza (versione 1.0) identifica due categorie di apparecchi: quelli per applicazioni direzionali e quelli per applicazioni non direzionali. La bozza contiene le caratteristiche degli apparecchi illuminanti per ottenere la certificazione Energy Star e si prevede che sostituirà due specifiche precedenti:

- "Apparecchi illuminanti residenziali" (*Residential Light Fixtures, RLF*) versione 4.2
- "Apparecchi con illuminazione allo stato solido" (*Solid State Lighting, SSL*) versione 1.3.

I requisiti di efficienza per gli apparecchi non direzionali sono stati aumentati a 70lm/W, il 40% in più rispetto a quanto prescritto nella RFL, da applicare alle misure della fotometria della sorgente sia per un "LED engine", sia per una combinazione di lampade e ballast nel caso di lampade fluorescenti o a scarica ad alta frequenza. Per gli apparecchi non direzionali, inoltre, ogni LED engine o combinazione lampada-ballast, deve fornire minimo 850lm. I valori sono riferiti alla sorgente, non all'apparecchio.

L'EPA propone inoltre un indice di resa cromatica minimo di 80 per gli apparecchi da interni, da applicare a tutti i tipi di apparecchi e a tutte le tecnologie, ponendo particolare attenzione alla resa delle tonalità del rosso, espressa dal valore R9, elemento su cui porre ulteriori limitazioni.

Per quanto riguarda la seconda, invece, essa contiene delle limitazioni sui parametri caratteristici delle sorgenti luminose: tali valori sono stati adeguati all'avanzamento tecnologico avvenuto negli ultimi dodici mesi.

Prima di proseguire con l'evoluzione normative, è però necessario fornire alcuni concetti di base.

Light engine. Secondo lo standard ANSI "Nomenclatura e definizioni per l'ingegneria dell'illuminazione" (ANSI/IESNA RP-16 Addendum B) il light engine LED è "un assemblato integrato che comprende al suo interno le sorgenti LED (singoli o in stringhe) e i loro involucri, i driver e altri componenti ottici, termici, meccanici ed elettrici. Il dispositivo è progettato per connettersi direttamente al circuito derivato attraverso un connettore compatibile con l'apparecchio LED per cui è stato progettato e non usa una base standard ANSI." Da questa definizione appare evidente

che un LED light engine non è una lampada LED: sebbene il light engine possa essere sostituito, esso non ha un attacco standard.

Fotometria assoluta e fotometria relativa. Quando un chip LED viene posto all'interno di un apparecchio o di una stringa, la somma dei flussi dei singoli diodi (come modificata dai componenti dell'apparecchio) diviene il flusso totale emesso da quell'apparecchio. La fotometria relativa divide proporzionalmente i risultati dei test per il flusso autocertificato del diodo privo di apparecchio e, tramite calcoli, rimuove le differenze nell'output delle lampade nude. La fotometria assoluta registra i livelli di intensità reali durante il test, in modo tale che le differenze di produzione tra i LED sono testate mentre sono in funzione il giorno del test, nell'apparecchio campione.

Per ottenere il marchio Energy Star, un apparecchio non direzionale deve essere testato a livello della sorgente (cioè del LED light engine) piuttosto che come apparecchio intero. Questo nuovo requisito ha messo l'industria dell'illuminazione nella posizione di acquisire una migliore comprensione dei light engines.

La fotometria degli apparecchi LED è stata oggetto di accesa discussione, con le due specifiche che hanno avuto approcci opposti (la RLF e SSL). La proposta è che gli apparecchi direzionali dovrebbero essere soggetti alla fotometria dell'apparecchio, mentre gli apparecchi non direzionali dovrebbero essere valutati a livello della sorgente luminosa; questo, perché l'estetica ha un ruolo fondamentale nella scelta per l'acquisto, almeno quanto l'efficienza luminosa globale dell'apparecchio. Se il programma Energy Star costringesse i produttori a concentrare l'attenzione sull'efficienza dell'apparecchio, il risultato sarebbe una relativamente ridotta competitività dal punto di vista estetico e di conseguenza un ridotto impatto sul mercato e quindi minor risparmio energetico complessivo.

Numerose applicazioni hanno comunque natura direzionale (faretti incassati, binari luminosi) e sono progettate e scelte con minore enfasi sugli aspetti estetici. Tali elementi potrebbero e dovrebbero essere valutati sulla base della fotometria dell'apparecchio, misurando il flusso luminoso prodotto. Gli apparecchi LED basati su componenti integrate che non possono essere sostituite dovrebbero essere anch'essi soggetti alla fotometria dell'apparecchio.

La "neutralità tecnologica" è altro aspetto chiave della normativa prodotta dell'EPA: secondo questo principio, le specifiche dell'apparecchio devono essere espresse tramite criteri omogenei, indipendentemente dalla tecnologia impiegata per creare l'emissione luminosa. Solo in questo modo, infatti, è possibile anche per i consumatori il confronto diretto tra apparecchi di produttori diversi e tecnologie diverse, con la garanzia ulteriore che il marchio Energy Star fornisce relativamente ai risparmi energetici.

Lo standard IES LM-79 afferma in maniera definitiva che il flusso luminoso e i problemi termici nell'illuminazione allo stato solido (SSL) sono gestiti in modo migliore attraverso l'uso della fotometria assoluta con un goniofotometro di tipo C.

Nella maggior parte dei casi, un LED non può essere rimosso dall'apparecchio per testarlo come sorgente isolata dal suo apparecchio e, anche quando questo è possibile, la produzione di LED ha una gamma talmente ampia di flussi luminosi per cui è comunque necessario un test assoluto per determinare se il flusso complessivo dell'apparecchio è qualificato o no per l'etichetta Energy Star.

E' inoltre fondamentale che la temperatura della stringa rimanga stabile per tutta la durata del test, di modo tale che il flusso luminoso non vari. Se l'apparecchio è spostato o ruotato durante il test, la temperatura e il risultato varieranno. Con il goniofotometro di tipo A, tipicamente utilizzato per misurare le lampade incandescenti per i mezzi di trasporto, l'apparecchio è ripetutamente ruotato di differenti angoli durante il test. Per i prodotti SSL, queste rotazioni causano una significativa instabilità termica che rende l'intero procedimento inaccurato. Un goniofotometro di tipo C mantiene l'apparecchio fermo mentre uno specchio si muove attorno ad esso. Per queste ragioni, la IES (*Illuminating Engineering Society*) ha stabilito che l'unico modo accurato di testare un apparecchio a LED è la fotometria assoluta con un goniofotometro di tipo C (Fig. 7.1).



a)



b)

Figura 7.1. Strumenti necessari per le misurazioni LM-79, LM-80 e per l'etichetta Energy Star.

a) goniofotometro di tipo C.

b) sfera di integrazione.

I test effettuati riportano la performance dell'apparecchio: se le lampade, ad esempio i LED, producono un flusso minore di quello dichiarato dal produttore, la fotometria assoluta lo evidenzia.

### Innovazioni introdotte all'interno del programma Energy Star

Nel 2011 il programma ha virato da un modello basato sull'autocertificazione dei produttori alla certificazione da parte di laboratori esterni certificati: i produttori non possono più spedire i dati relativi alle misure effettuate presso i loro laboratori a un CB (*Certification Body*) riconosciuto



dall'EPA e ricevere l'approvazione se la documentazione risponde ai requisiti, bensì devono spedire l'apparecchio illuminante, che verrà testato direttamente dai laboratori accreditati dai CB e certificati ISO 17025. Dopo la raccolta dei dati, il CB procederà all'analisi di conformità, rilasciando o meno la certificazione Energy Star.

Nonostante il cambiamento introdotto nelle modalità di gestione e analisi dati, nell'ambito dei programmi denominati SMT (*Supervised Manufacturer Testing*) e WMTL (*Witness Manufacturer Testing*) i produttori possono ancora avere la possibilità di condurre i test all'interno dei propri spazi attraverso la supervisione di un CB. Secondo il programma SMT, ai produttori è consentito fare test con un controllo iniziale e annuale del CB, mentre il programma WMTL permette loro di fare test presso le strutture del CB e prendere insieme la decisione sulla certificazione.

Tre sono gli elementi fondamentali per completare i test fotometrici per l'Energy Star:

- laboratorio: è necessaria una certificazione ISO 17025, anche se i laboratori per l'SMTL e il WMTL devono semplicemente essere qualificati attraverso un CB. Il laboratorio dovrebbe avere un buon controllo dell'ambiente di misura, con controllo della temperatura, dell'umidità, del flusso d'aria e dell'alimentazione;
- attrezzatura: deve essere calibrata da un laboratorio accreditato e dovrebbe essere conforme agli standard in uso (la IESNA LM-79 prevede l'uso di un goniometro di tipo C);
- procedure di test, documentazione e qualificazione del personale: è necessario attuare delle procedure standard ed avere personale qualificato per eseguirle.

Non ci sono al momento programmi Energy Star per l'illuminazione stradale, ma si può utilizzare la IESNA LM-79 per avere i dati sulla performance elettrica e fotometrica delle lampade e degli apparecchi LED.

#### Dall'autocertificazione alla certificazione fatta da terzi

Il passaggio dall'autocertificazione, basata su test fatti all'interno dei laboratori delle industrie, a test redatti e valutati da laboratori specializzati è processo complesso, ma sicuramente vincente ai fini della qualità e della veridicità dei dati dichiarati.

I laboratori attualmente impegnati nei test di laboratorio finalizzati all'ottenimento del marchio Energy Star sono accreditati dall'EPA/DOE e in possesso della strumentazione necessaria per svolgere i test previsti dalla IES-LM-79. Tale normativa richiede l'impiego di un goniometro di tipo C, strumento che necessita di una fase di riscaldamento e stabilizzazione e, durante il test, la gestione manuale dell'amplificatore di sensibilità. I laboratori accreditati sono inoltre provvisti di camere di preriscaldamento e stabilizzazione per cui gli apparecchi LED sono preriscaldati prima di

essere posizionati sul goniometro. Una volta completato il periodo di riscaldamento in un'area adiacente al laboratorio, l'apparecchio viene velocemente posizionato sullo strumento.

Nonostante la capacità di ridurre al minimo i tempi di riscaldamento e stabilizzazione, alcune parti del test richiedono ancora tempi prolungati, come l'amplificazione dei livelli di sensibilità. Dopo aver stabilizzato l'apparecchio, lo specchio ruota una prima volta per determinare la massima intensità dell'apparecchio. Impostato il livello dell'amplificatore su quel valore di massimo, in modo che quei livelli di intensità non siano superati, viene svolto l'intero test.

Questa modalità di svolgimento, essendo regolata sulla base del valore massimo raggiunto, offre scarsa accuratezza nella misurazione del range di intensità minori: se fosse necessario ottenere dati dettagliati per questo intervallo di valori, il test si dovrebbe svolgere una seconda volta, con un valore di massimo molto più basso.

Per arrivare a un sistema automatico di amplificazione della sensibilità, è stata sviluppata una nuova generazione di goniometri di tipo C a specchio mobile, che riduce in maniera consistente il tempo richiesto per i test. Il Goniometro a specchio mobile LSI Serie 6400T è il primo sul mercato ad offrire più canali elettronici di amplificazione: l'amplificatore triplo ottimizza automaticamente la sensibilità per tutti gli intervalli di intensità durante un test, mentre la raccolta dei dati avviene ad una velocità di 18000 letture al secondo, consentendo allo specchio di fare 4 rotazioni al minuto o anche di più per l'intero test. Il test fotometrico completo dura in questo modo tre minuti perché tutte le diverse scale di intensità sono lette automaticamente e simultaneamente dal goniometro.

### Test sui light engines nell'ambito del programma Energy Star

Recentemente, i light engines LED sono stati utilizzati per svariati prodotti SSL, in particolare per apparecchi per illuminazione residenziale e apparecchi con funzioni decorative. Il programma Energy Star classifica questi apparecchi come applicazioni non direzionali. Poiché gli apparecchi non direzionali non sono realizzati esclusivamente per fornire illuminazione per lo svolgimento del compito visivo, l'estetica dell'apparecchio spento e acceso sono fattori importanti per il gradimento di tali dispositivi da parte dei consumatori. La performance desiderata può includere:

- l'uniformità di illuminazione, che è spesso raggiunta tramite diffusori;
- effetti speciali, che possono essere realizzati utilizzando prismi per la diffusione della luce. Tradizionalmente, i produttori di apparecchi illuminanti non direzionali non forniscono dati fotometrici a livello dell'apparecchio, ma specificano solo il tipo di lampada e la massima potenza consentita. Lo scopo del programma Energy Star è di riconoscere i risparmi energetici mantenendo contemporaneamente il gradimento e l'adottabilità da parte del consumatore, che tipicamente per l'acquisto tiene in maggiore considerazione l'estetica rispetto ai criteri tecnici come il flusso luminoso e l'efficienza energetica. Il criterio dell'efficienza luminosa può

non essere appropriato in caso di illuminazione decorativa, perché si può sacrificarlo a favore dell'estetica, generalmente non quantificabile. I requisiti Energy Star mirano a valutare la performance dell'apparecchio esclusivamente in quanto emettitore di luce, di modo tale che i benefici del risparmio energetico siano misurabili, mentre le caratteristiche estetiche rimangano a discrezione del consumatore.

La nuova specifica Energy Star manifesta un bisogno impellente di metodi standardizzati per la verifica dei light engines LED cui, al momento, i gruppi di lavoro della IESNA TPC (Testing Procedure Committee) stanno lavorando. Il primo standard è relativo alla misurazione del comportamento fotopico dei light engine LED, o più semplicemente del loro output in funzione della temperatura (come noto, il flusso diminuisce all'aumentare della temperatura). Se un light engine LED è assemblato all'interno di diversi apparecchi non direzionali, ognuno può avere un differente impatto termico, con performance differenti.

Gli standard che sono attualmente allo studio forniranno inoltre raccomandazioni per le procedure relative all'esecuzione di misure di light engines a diverse temperature. Queste misure includono la temperatura, il flusso luminoso totale, la corrente elettrica e gli aspetti cromatici. Lo standard attualmente in uso, lo IESNA LM-79, riguarda la procedura per testare le caratteristiche fotometriche, colorimetriche ed ottiche dei light engines a temperatura ambiente. Il nuovo standard per testare i light engine richiede che il test LM-79 misuri le caratteristiche degli apparecchi anche a due temperature superiori: in questo modo, sarà identificabile in maniera più chiara la dipendenza dalla temperatura.

Un altro standard IESNA attualmente in fase di sviluppo è una procedura raccomandata per testare il mantenimento del flusso per i light engines. Lo standard attuale, IESNA LM-80, riguarda gli involucri LED, le stringhe e i moduli, ma non prende in considerazione i drivers e i dissipatori di calore. Poiché il light engine è una sorgente luminosa integrata, le sue caratteristiche di mantenimento del flusso potrebbero non essere le stesse dei pacchetti LD utilizzati al suo interno.

#### Standard di calcolo per il decadimento del flusso: LM-80 e TM-21

Quando progettisti illuminotecnici, costruttori e altri professionisti valutano l'impiego di prodotti LED per l'illuminazione, hanno la necessità di sapere la loro durata di vita: essa rappresenta il periodo di tempo (in ore o anni) in cui tali dispositivi potranno essere utilizzati prima che la diminuzione del flusso luminoso emesso cessi di assicurare i livelli di illuminamento medio richiesti.

Il mantenimento del flusso luminoso è una proprietà importante per i power LED, e nel 2008 la Illuminating Engineering Society (IES) ha pubblicato lo standard chiamato "LM-80\_08" Metodo approvato: misurazione del mantenimento del flusso delle sorgenti LED". La LM-80 rappresenta un tentativo di stabilire un'omogeneità di metodo nel misurare il decadimento del flusso delle

sorgenti LED e per permettere un confronto delle performance tra vari produttori. Il Governo americano e il programma Energy Star usano questi standard come riferimento per la loro certificazione degli apparecchi illuminanti. L'LM-80 non fornisce però una guida per l'estrapolazione del decadimento del flusso al di là della reale durata delle misurazioni: per questo, è allo studio un metodo, il TM21, sviluppato dalle industrie; parallelamente, la guida del produttore del programma Energy Star prevede un minimo di 6000 ore di test per stabilire il decadimento del flusso.

Negli ultimi due anni è progressivamente aumentata la pressione da parte degli utilizzatori di LED per sviluppare standard di previsione per il mantenimento del flusso, ma ideare un metodo standardizzato di previsione a lungo termine di tale parametro per apparecchi e moduli LED non è cosa facile.

In assenza di standard industriali, i programmi di risparmio energetico negli USA, come l'Energy Star o il *Design Light Consortium* (DLC) hanno stabilito delle soglie limite basate su un semplice modello di previsione matematico. Questi programmi hanno inoltre predeterminato la durata dei test (il numero di ore di funzionamento) in cui è necessario raccogliere i dati per nuovi prodotti. La durata del test è relativamente breve rispetto alla vita dichiarata dei LED.

Il TM-21 non è stato ancora redatto per via della difficoltà di analisi contemporanea della molteplicità di parametri coinvolti nei diversi meccanismi di decadimento del flusso e per via della durata troppo ridotta dei test rispetto alla vita stimata dei diodi. Se infatti la durata di test richiesta dalla LM-80 è di 6000 ore, la durata di vita stimata dei diodi si aggira intorno alle 50000: i modelli matematici derivati dai dati raccolti all'interno di questo breve lasso di tempo non possano essere impiegati in maniera affidabile per fare previsioni a lungo termine sul decadimento del flusso.

Tutti gli standard pubblicati e in fase di sviluppo per l'illuminazione LED sono raggruppati in due livelli: quello dei componenti e quello del sistema. Analogamente all'LM-80, il documento che verrà prodotto dal TM-21 riguarderà il livello dei componenti e le previsioni di decadimento del flusso per gli apparecchi LED (o per i moduli LED, se testati secondo l'LM-80). Come dichiarato nelle intenzioni, questo documento fornirà raccomandazioni per "fornire proiezioni a lungo termine sul decadimento del flusso degli apparecchi LED utilizzando i dati ottenuti durante i test per lo IES LM-80": in tale dichiarazione d'intenti risiede la debolezza del documento, in quanto limita implicitamente a 6000 ore la durata dei test necessari per ottenere i dati di calcolo. A questo proposito, i dati raccolti per tale lasso di tempo dal gruppo di lavoro TM-21 mostrano grandi variazioni nel comportamento dei diodi: sono queste a creare problemi nello sviluppo di un metodo matematico standardizzato di previsione del decadimento del flusso dei LED.

*Tipologie di approccio al problema.* Sono due le tipologie di approccio che possono essere seguite per prevedere il decadimento del flusso sulla base dei dati raccolti. L'approccio ingegneristico è in gran parte basato sulla conoscenza e comprensione da parte degli esperti delle tecnologie e dei

processi utilizzati nella produzione dei LED, mentre l'approccio statistico è basato sulle regole e sui criteri che rendono affidabile l'applicazione di formule matematiche.

Nell'approccio ingegneristico, inizialmente si analizzano le cause della degradazione del flusso dei LED per identificare se la perdita di flusso nel tempo sia causata dall'invecchiamento del chip LED, dal decadimento materiale (capsula, lenti e fosfori) o da mutamenti strutturali (substrati, riflettore, ecc). Queste degradazioni possono essere verificate o individuate testando i LED in condizioni di stress come ad esempio ad alte temperature, con elevata umidità o con elevata corrente. Sulla base dell'esperienza ingegneristica e dei risultati dei test si possono quindi definire modelli matematici che, una volta verificati, possono essere impiegati per prevedere il decadimento del flusso.

Il secondo approccio è di tipo statistico ed è basato esclusivamente sui dati sperimentali: ad ogni set di misure vengono applicate diverse equazioni matematiche, estrapolando le tendenze all'interno della serie di dati. Dopo averle estrapolate, sulla base di alcune regole matematiche si sceglie il modello previsionale che meglio approssima la distribuzione dei dati.

Richiedere un periodo di test più lungo rispetto alle 6000 ore richieste dall'LM-80 e che si stanno rivelando insufficienti per fare previsioni attendibili, può comportare una serie di problemi: se da un lato portare la durata dei test a 10000 ore potrebbe infatti rallentare l'introduzione di nuovi prodotti sul mercato, dall'altro proporre modelli previsionali sbagliati potrebbe penalizzare prodotti di buona qualità e di lunga durata. Il gruppo di lavoro TM-21 continua a lavorare su questo tema, consapevole del fatto che i metodi impiegati per fare previsioni sulla base delle 6000 ore di test dell'LM-80 vanno verificati e validati con test ulteriori di durata maggiore.

Publicare il documento TM-21 non risolverà completamente i problemi relativi alla previsione del decadimento del flusso al livello dell'apparecchio, perché i dati dell'LM-80 sono dati relativi al componente: non vengono considerati i driver LED e i componenti ottici e termici impiegati all'interno dell'apparecchio possono influenzare la vita L70 degli apparecchi LED, ma non saranno presi in considerazione all'interno del TM-21. Per questa ragione, la IESNA ha creato un altro TPC (*Testing Procedure Committee*), focalizzato sullo sviluppo degli standard per testare il decadimento del flusso al livello di sistema, cioè di lampade, engine e apparecchi LED.

### Lighting facts

La nuova etichetta "Lighting Facts" (Fig. 7.2), promossa dal DOE, è stata introdotta a luglio 2011 per permettere ai consumatori di valutare le lampade per retrofitting: contando su un database di oltre 500 prodotti già approvati, si avvia a diventare una certificazione importante.

Il DLC (*Design Lighting Consortium*), organizzazione composta da enti erogatori energia elettrica e organizzazioni regionali statunitensi per l'efficienza energetica, ha lo scopo di assicurare l'alta qualità e l'efficienza energetica dell'illuminazione d'esterni. Le valutazioni per il programma DLC richiedono i test IESNA LM-79 e IESNA LM-80. Inoltre i dati relativi ai test devono essere prodotti

da un NVLAP (*National Voluntary Laboratory Accreditation Program*) accreditato oppure da un laboratorio approvato Caliper.

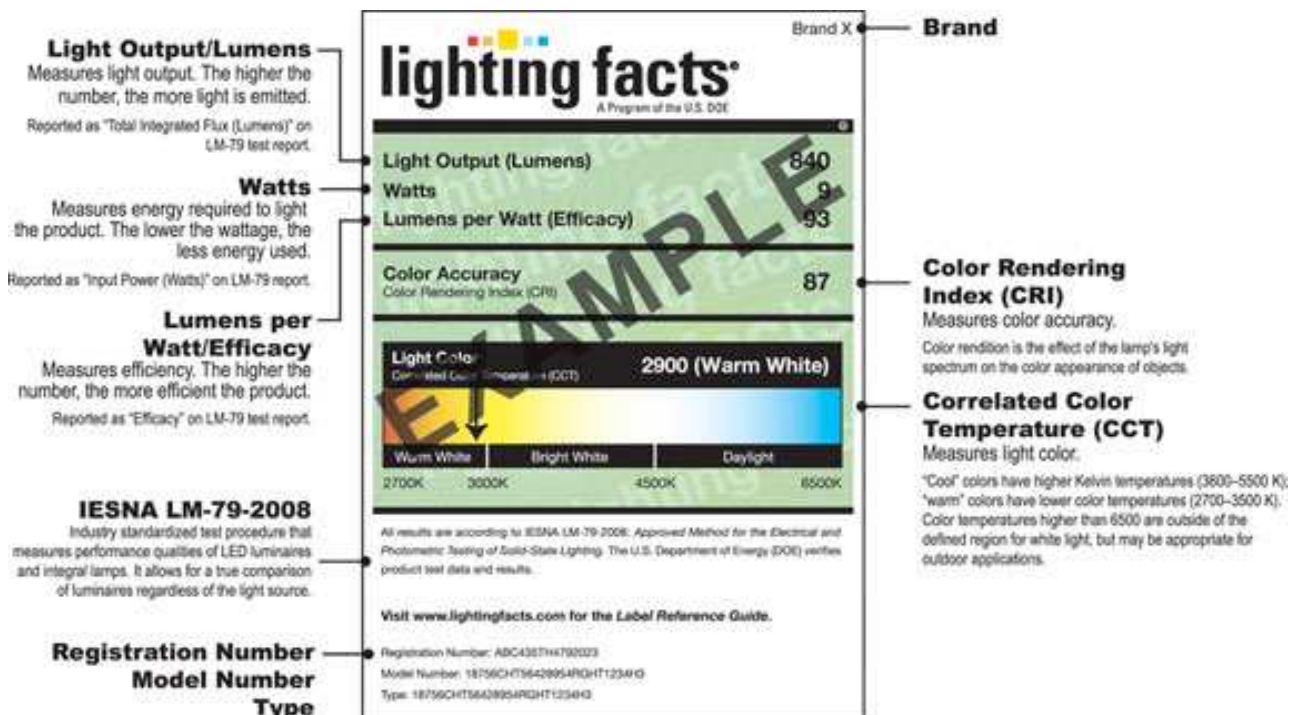


Fig. 7.2. Etichetta lighting Facts.

### Standard sulla sicurezza degli apparecchi LED

A novembre 2009, i Laboratori Underwriters (UL) hanno pubblicato un nuovo standard sulla sicurezza dei LED, l'UL 8750, intitolato "Attrezzatura per l'uso dei LED nei prodotti per l'illuminazione". Questo standard è basato sulla ricerca descritta nel report "Linee guida per l'investigazione", frutto di due anni di ricerca dell'UL. Il report contiene dati da 45 membri dell'STP (*Standard Technical Panel*) dell'UL 8750.

Lo standard di sicurezza UL 8750 definisce un insieme di requisiti per i prodotti di illuminazione a LED e per i componenti necessari al loro uso. Mantenere aggiornato tale standard in un periodo di evoluzione tecnologica così rapido è, però, particolarmente difficile.

Gli standard di sicurezza per i prodotti di illuminazione negli USA sono tra i più aggiornati, con cambiamenti frequenti e radicali basati sulle novità tecnologiche.

### Standard sull'intercambiabilità delle parti

Gli standard dell'*American National Standards Lighting Group* (ANSI/ANSLG) forniscono le specifiche industriali per assicurare l'intercambiabilità delle parti: ne sono esempi la serie

ANSI/ANSLG C2 per i ballast delle lampade fluorescenti e HID, La serie ANSI/ANSLG C78 per le lampade incandescenti, fluorescenti e HDI, e la serie ANSI/ANSLG C81 per i portalampada. Il controllo dell'intercambiabilità delle lampade e dei portalampada è fondamentale perché assicura una buona connessione elettrica tra i differenti elementi.

A partire dal gennaio 2007, sono stati pubblicati diversi documenti dell'UL sulle ricerche nell'ambito "Attrezzatura LED da utilizzare per prodotti di illuminazione (soggetto 8750)", fino a quando, a maggio 2009, è stata pubblicata la prima bozza della normativa "Attrezzatura LED da utilizzare per prodotti di illuminazione, UL 8750. Tale standard è stato approvato e pubblicato come standard ANSI nel novembre 2009, dopo essere stato pubblicato in forma di bozza sullo *Standards Technical Panel (STP)* dell'UL8750.

La UL8750 ha riconosciuto che, a causa del costo e dello sforzo per cambiare le basi degli apparecchi illuminanti attualmente in uso, le tecnologie di retrofitting saranno impiegate ancora a lungo. Per questo ha iniziato il processo di sviluppo e documentazione dei requisiti per questo approccio e per i componenti necessari al funzionamento, tra cui i driver (alimentatori elettrici) e altri componenti circuitali a cui globalmente ci si riferisce con il termine controllers.

Il gruppo di lavoro che ha pubblicato la normativa dovrà, nei prossimi mesi, valutare le modalità di implementazione della standardizzazione per il supporto al mercato della riparazione e sostituzione di apparecchi LED. In particolare, si affronterà la questione del funzionamento e della valutazione standardizzata per facilitare la sostituzione delle componenti, così come è già stato fatto per i ballast delle lampade fluorescenti. Altro ambito di ricerca sarà poi costituito dall'analisi della compatibilità delle tecnologie di dimming, delle smart grids e di altre forme di gestione dell'energia con i LED.

Una delle necessità più complesse da gestire riguarda gli apparecchi con sorgenti luminose estese, come gli OLED, che possono assumere qualsiasi forma e dimensione immaginabile consentita dalla tecnologia di produzione. Gli standard per questi apparecchi inglobano l'illuminazione su binari elettrificati e paesaggistica, ed è stata pubblicata l'"*Outline for Investigation for Suspended Ceiling Grid Low-Voltage Lighting Systems (Subject 2577)*", che prende in considerazione l'alimentazione di apparecchi al di fuori delle reti elettriche convenzionali. Ad ogni modo, l'alimentazione di un muro luminoso, di un soffitto o di un corrimano richiede un nuovo modo di pensare la progettazione, la realizzazione e l'ambito normativo.

### Standard NEMA

Nel 2010 la NEMA (National Electrical Manufacturers Association) ha pubblicato due nuovi standard sui prodotti per l'illuminazione LED.

Il NEMA SSL 1-2010 ([www.nema.org/stds/ssl1.cfm](http://www.nema.org/stds/ssl1.cfm)), denominato "Driver elettronici per dispositivi, stringhe o sistemi LED" riguarda la valutazione e la performance. La SSL1 fornisce inoltre

specifiche-guida per i calcoli relativi all'immunità elettromagnetica, al rumore udibile e all'efficienza.

Il NEMA SSL 6-2010 ([www.nema.org/stds/ssl6.cfm](http://www.nema.org/stds/ssl6.cfm)), denominato "Illuminazione allo stato solido per sostituzione di lampade a incandescenza – dimming" riguarda l'interazione tra il dimmer e la lampada e introduce dei requisiti per aiutare ad assicurare una buona performance di dimmeraggio ed evitare danni ai componenti.

## **Indice di resa cromatica**

### CRI (Color Rendering Index)

Il CRI è una scala che quantifica l'effetto che le sorgenti luminose artificiali hanno sulla percezione del colore, in uso ormai da quarant'anni. Oggi il CRI è oggetto di discussione come indicatore della qualità del colore, specialmente se applicato ai LED bianchi, che presentano diversi picchi spettrali. Il CRI è basato solo su otto o quattordici campioni di riflessione, tutti di saturazione cromatica bassa o media: tale parametro quantifica la fedeltà del colore (ovvero l'accuratezza con cui i colori possono essere resi dalla sorgente), calcolando le differenze di colore di questo set di colori campione illuminati sotto la sorgente di riferimento e sotto la sorgente da valutare. I campioni standard non descrivono adeguatamente la gamma dei colori degli oggetti comuni per cui, alcune sorgenti che sono in grado di rendere accuratamente colori poco saturi, non fanno lo stesso con colori saturi.

Si è attualmente in attesa di un nuovo parametro per la valutazione cromatica delle sorgenti LED, in grado di riflettere meglio la gamma dei parametri coinvolti – resa cromatica, discriminazione del colore e simili: tra gli indicatori proposti, si riportano alcune informazioni sul CQS e sul GAI.

### CQS (Color Quality Scale)

Il NIST (*National Institute of Standards and Technology*) ha proposto la Color Quality Scale (CQS) (Fig. 7.3) in sostituzione del CRI, eliminandone uno dei difetti principali, cioè quello di penalizzare gli spostamenti in qualsiasi direzione delle coordinate cromatiche dei campioni di tinte pastello. Il CQS utilizza un set di colori più ampio, includendo colori saturi, ed è allo studio come una delle proposte nel comitato CIE (*Commission on Illumination*) TC-1-69, che sta valutando nuovi metodi di misura per la resa cromatica delle sorgenti a luce bianca.

Il punto di forza del CQS è che i test preliminari sembrano aver dimostrato una buona attinenza con la resa del colore sia per le sorgenti tradizionali che per la tecnologia LED.





Figura 7.3. Il NIST ha un laboratorio con un apparecchio illuminante a spettro variabile a 22 canali di colore che consente ai ricercatori di indagare le potenzialità del CQS.

### GAI (Gamut Area Index)

Poco dopo la pubblicazione del NIST, l'ASSIST (*Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies*) ha pubblicato una versione aggiornata delle sue "Raccomandazioni" basate sulla ricerca condotta dall'LRC (*Lighting Research Center*), in cui si focalizza l'attenzione sul colore delle sorgenti luminose per gli spazi di vendita. Il nuovo volume di raccomandazioni include due capitoli intitolati "Guida al colore negli spazi di vendita" e "Raccomandazioni per specificare le proprietà del colore delle sorgenti luminose per gli spazi di vendita": il primo fornisce un background sulla CCT e sul CRI, includendo i vantaggi e gli svantaggi di ognuno e alcune idee su come possono essere migliorati per le applicazioni legate alla vendita; il secondo raccomanda un nuovo approccio con due misure per specificare le caratteristiche delle sorgenti. In particolare, per raggiungere una buona resa cromatica, l'ASSIST raccomanda di utilizzare il CRI insieme a un nuovo indice chiamato GAI (*Gamut Area Index*). Un GAI elevato testimonia una elevata resa dei colori molto saturi. Secondo il dott. Rea, direttore dell'LRC, il CRI è una misura di quanto l'oggetto appaia "naturale", mentre il GAI è una misura di quanto esso appaia "vivido". Gli esperimenti dell'LRC mostrano che le sorgenti luminose che hanno un equilibrio di CRI e GAI sono generalmente preferite rispetto a quelle che presentano valori elevati di uno solo dei due parametri.

### **Il quadro europeo**

Rispetto allo stato di avanzamento della standardizzazione dell'illuminazione LED, l'Unione Europea è ancora all'inizio del percorso normativo: il programma di ritiro dal commercio nel corso del quadriennio 2009-2012 delle sorgenti luminose energeticamente inefficienti (lampade a incandescenza) non è stato infatti sufficiente alla diffusione dei LED, ancora posti in secondo piano dalle sorgenti fluorescenti e di uso limitato a pochi progetti pilota.

A dicembre 2010 è stato sottoscritto un accordo tra Stati Uniti ed Unione Europea per la collaborazione tra i rispettivi enti preposti al risparmio energetico, allo scopo di unificare le

normative in materia. Attualmente, il programma europeo per il risparmio energetico è regolato dalla direttiva 2009/125/EC, denominata “*Ecodesign of energy related products*”, mentre quello in vigore negli Stati Uniti è l’*Energy Policy and Conservation Act*, risalente al 1975, ma aggiornato nel 1992, 2005, 2007 e 2009. Entrambi i programmi stabiliscono procedure per i test per la determinazione dell’efficienza dei prodotti e analizzano costi, risparmi energetici e impatto delle nuove tecnologie.

Le aree di sviluppo di tale progetto di collaborazione internazionale sono tre:

- trasformatori di distribuzione del sistema elettrico;
- attrezzatura per la refrigerazione commerciale;
- prodotti per l’illuminazione ed in particolare tecnologie SSL e apparecchi direzionali (cioè forniti di riflettore).

A giugno 2011 è stato pubblicato un breve report sullo stato di avanzamento di tale collaborazione. Nella terza parte del report, relativa ai prodotti per l’illuminazione, è messo agli atti che il comitato tecnico statunitense ha portato come guida di riferimento sui prodotti per l’illuminazione i documenti del DOE, sintesi dello stato dell’arte sugli standard.

La direzione generale per l’energia (DG Energy, *Directorate General*) ha imposto dei requisiti minimi di efficienza energetica su tutti i tipi di lampade: tali limiti diverranno operativi entro il 2017, con l’eccezione degli apparecchi direzionali, per cui deve ancora essere completato lo studio preliminare: le normative su questo argomento saranno preparate secondo la direttiva “*Ecodesign of Energy Related products*”.

Attualmente, le specifiche utilizzate negli USA forniscono requisiti obbligatori per quanto riguarda le lampade fluorescenti, ma non per i LED: la funzionalità dei diodi per l’illuminazione residenziale e commerciale è regolata, come detto, dalle specifiche Energy Star, che non sono obbligatorie. Al contrario, il DG Energy intende introdurre per i LED requisiti di funzionalità obbligatori, per evitare una condizione di insoddisfazione dei consumatori, simile a quella che si verificò nei primi decenni di impiego delle lampade fluorescenti.

## **Il quadro internazionale**

Uno sforzo a livello globale è poi quello portato avanti sotto gli auspici della IEA (*International Energy Agency*) nell’annex Solid State Lighting, gestito sulla base dell’*Implementing Agreement* redatto dalla *Efficient Electrical End-Use Equipment* (4E). Lo scopo dell’Annex è di sviluppare misure per assicurare la qualità e armonizzare le procedure di misura della tecnologia SSL e

lavorare con i corpi di accreditamento esistenti per sviluppare strutture globali di valutazione dell'affidabilità. Sia l'Europa che gli Stati Uniti stanno prendendo parte a questo programma.

## Capitolo 8

### Elementi di progettazione, software e dati fotometrici

Fino allo scorso anno erano molto pochi i produttori di LED che mettevano a disposizione degli utenti i dati fotometrici relativi ai propri apparecchi. Oggi, la situazione risulta significativamente migliorata grazie, da un lato, all'attenzione normativa verso la caratterizzazione standardizzata di tali sorgenti, dall'altro alla loro sempre maggiore diffusione.

Poiché gli apparecchi LED presentano distribuzioni spettrali e curve fotometriche molto diverse rispetto alle sorgenti tradizionali, non è possibile progettare "alla cieca", basandosi sulle regole base della progettazione con sorgenti alogene o HPS. E' per questo che attualmente diversi produttori, come la ERCO o la BetaLED (Fig. 8.1-2), forniscono dati fotometrici sotto forma di files .ies dando all'utente la possibilità di scegliere la propria combinazione di diodi, ottiche primarie e ottiche secondarie (ed eventualmente riflettori ecc.).

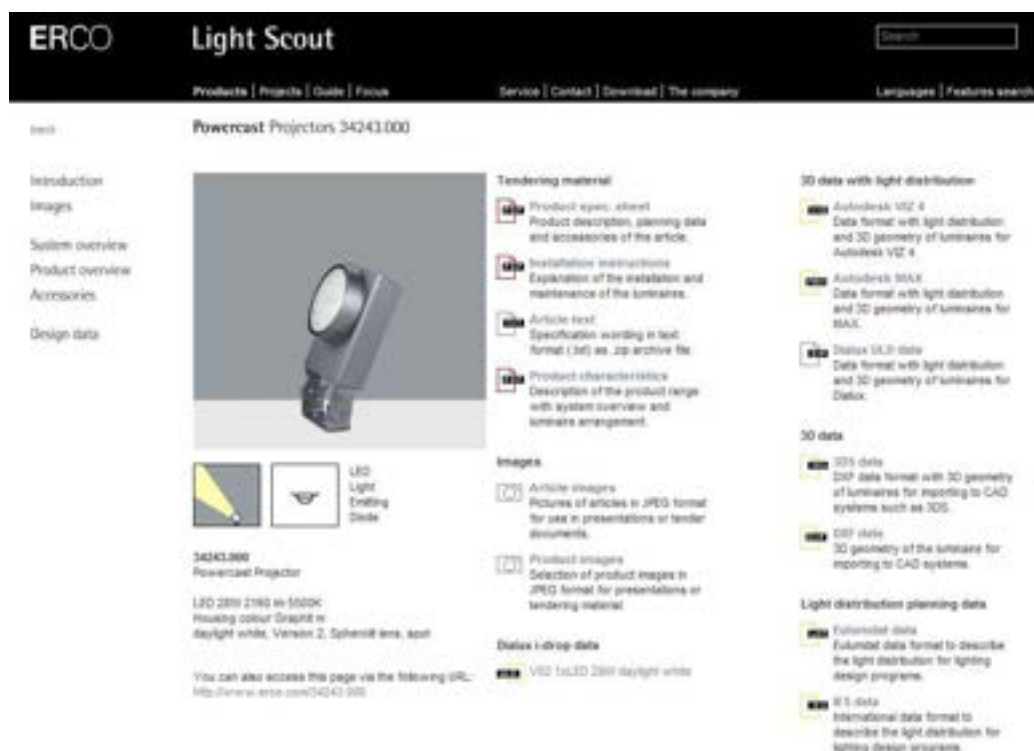


Figura 8.1. Esempio di pagina dati per LED a marchio ERCO: compaiono, oltre al file .ies, molti altri file contenenti informazioni, tra cui un formato di utilizzo veloce in Dialux e il file Eulumdat, anch'esso comunemente utilizzato dai programmi di simulazione illuminotecnica. (fonte: www.erco.com)

Home > Technical Library > IES Configurator



## IES Configurator Tool

BetaLED offers the versatility of more than 20 different optical selections, multiple drive currents and scalable LED modules providing flexibility to fine-tune lighting performance for unique applications. To provide accurate photometric testing data on our wide range of optic and LED combinations, we have developed an online IES file configurator using information derived from IFL, an independent testing laboratory, ensuring all tests are conducted to IESNA LM-79-08 standards.

The IES file configurator on is a photometric file builder designed to assist you in finding or creating an IES file for the specific product you want to incorporate into your lighting layout. BetaLED conducts extensive photometric product testing including:

- Typical optics for each product type
- Thermal characteristic tests for multiple LED counts in each product type
- CCT, CRI, electrical characteristics and lumen scaling for each color and LED package
- Dimming product characterization

Building on our vast experience of hundreds of LM-79-08 photometric tests, the BetaLED IES File Configurator will provide the exact photometric file needed for your layout or specification. This tool will benefit anyone who uses software to create lighting layouts or specify product performance.

### IES Files

All published luminaire photometric testing performed to IESNA-79-08 standards

Product:

Family:

Optic:

Mounting:

Number Of LEDs:

Series:

Download Spec Sheet

Input Voltage:

Drive Current:

CCT:

Download IES File  
 Download IES Report  
 Download LM.79 Report  
[Download Lumen Maintenance](#)

### Third Party Reports

#### LED Equipment Evaluation Phase I Report

The City of Los Angeles has committed itself to the long-term testing and evaluation of new LED street lighting technology. [Read Report](#)

#### Solid-State Lighting GATEWAY Demonstrations

DOE GATEWAY Demonstrations showcase high-performance LED products for general illumination in a variety of commercial and residential applications.

[Read Oakland Report](#)

[Read San Francisco Report](#)

#### LED Street Lighting Test Project Report

Progress Energy Carolina (PEC) installed nine LED test fixtures in October, 2008 on the 160 block of East Duke Street in downtown Raleigh in front of the Two Progress Plaza building and other businesses on this block. [Read about the results of the installation.](#) [Read Report](#)

[View All Third-Party Reports >>>](#)

Figura 8.2. Screenshot dello IES Configurator Tool creato dalla BetaLED per gli apparecchi stradali LEDWay. Una volta selezionata la propria combinazione di ottiche, il numero di LED, il voltaggio, la corrente e la CCT è possibile scaricare il file IES e le informazioni relative alle misurazioni dello standard IESNA LM-79, oltre alle informazioni sul decadimento del flusso. (Fonte: <http://www.ledway.com/Technical-Library/IES-Configurator-Tool.aspx>)

I files .ies sono poi importabili in tutti i principali software di calcolo illuminotecnico: Radiance, Relux, Dialux.

Un altro aspetto importante per la progettazione dell'illuminazione LED è la possibilità di creare degli apparecchi speciali. Rispetto alla realizzazione di pezzi unici (inediti) con l'impiego di sorgenti tradizionali, i LED hanno il problema della gestione termica e del dissipatore di calore, oltre alla gestione elettrica. Alcuni grandi produttori di LED, hanno messo a disposizione su internet dei fogli di calcolo per le caratteristiche di una determinata combinazione di diodi, alimentatori e altre principali componenti dell'apparecchio di illuminazione LED. In questo modo è possibile conoscere, prima ancora della realizzazione del prototipo, il comportamento dell'apparecchio progettato.

#### WEBENCH LED Designer

Gli ingegneri che lavorano agli apparecchi SSL possono utilizzare l'applicazione WeBench LED Architect, tool gratuito (Fig. 8.3) disponibile online e sviluppato da National Semiconductors: lo strumento consente di valutare rapidamente LED, driver, cooler e componenti passivi di un apparecchio SSL, fornendo confronti immediati in aree chiave come il consumo elettrico, la performance luminosa e il costo. Il tool online può analizzare 350 LED diversi di 12 produttori, 30 tipi di dissipatori di calore, 35 tipi di driver, 210000 componenti passive che possono essere mescolati e combinati nei progetti. Una volta creato il design ottimizzato per l'applicazione, WeBench genera un report completo sul progetto inclusi schemi, costo dei materiali e performance dell'apparecchio.

La progettazione richiede l'inserimento delle specifiche per l'applicazione e le caratteristiche dei LED come ad esempio colore, flusso luminoso, corrente di alimentazione e passo dei LED. Poi si seleziona il driver ottimale. Una volta inseriti questi dati, l'applicazione consente di analizzare le proprietà elettriche, come la dissipazione elettrica, l'efficienza o la corrente nei LED al variare di altri parametri. Infine, il simulatore elettrico verifica la stabilità del circuito e il suo funzionamento, permettendo di visualizzare il comportamento del circuito in diverse condizioni dinamiche come la modulazione a impulsi (PWM, Pulse-Width Modulation).



Figura 8.3. Schermata iniziale dell'applicazione online "WEBENCH® Designer", messo a punto dalla National Semiconductors e disponibile all'indirizzo <http://www.national.com/en/webench/>

## Capitolo 9

### Considerazioni finali

*Dopo circa un ventennio di evoluzione dei LED come sorgenti luminose per l'illuminazione, l'anno 2011 ha visto finalmente la maturazione di tale tecnologia e una maggiore consapevolezza degli utenti delle potenzialità di questo tipo di illuminazione. Ad oggi si può pertanto affermare che la tecnologia LED è ormai pronta per una vasta applicabilità, sebbene i produttori di componentistica stiano ancora cercando di potenziare il flusso luminoso e la qualità della luce emessa. Mentre la tecnologia SSL sta penetrando il mercato dell'illuminazione generale, stanno sorgendo altre opportunità come le applicazioni in campo biologico: l'illuminazione per l'agricoltura e quella per la salute e il benessere umani prime tra tutte.*

*Rispetto al Report ENEA 2010, sono stati riportati tutti i passi avanti compiuti nei diversi settori, a partire dalla tecnologia di generazione della luce, per passare alla gestione termica ed elettrica, fino ad arrivare all'evoluzione nelle applicazioni e nella normativa di riferimento.*

*Stante la rapida evoluzione, alcune delle informazioni presentate in questo report potrebbero essere già state superate al momento della pubblicazione.*

*Sul fronte della qualità, sono ancora necessari dei passi avanti rispetto alla standardizzazione dei componenti e dei moduli, al binning, alla resa cromatica.*

*Sul fronte della conformazione, l'obiettivo è quello di arrivare a poter sostituire con i LED tutti i tipi di sorgenti illuminanti, comprese quelle all'interno degli autoveicoli. Nel prossimo futuro arriveranno a coprire tutto il range di fattori di forma e flussi luminosi emessi dalle sorgenti attualmente in uso, e introdurranno nuove conformazioni con flussi sempre maggiori.*

*L'importanza dei sistemi di controllo è sempre maggiore per questioni di risparmio energetico associato anche all'illuminazione naturale.*



## Appendice 1

### Illuminazione a LED in galleria: approccio alla progettazione

L'illuminazione delle gallerie stradali ha lo scopo di garantire agli utenti condizioni di comfort e di sicurezza pari a quelle dei tratti all'aperto che precedono e seguono la galleria. Ai soli fini della loro illuminazione, le gallerie si distinguono in lunghe e corte. Le gallerie lunghe, differiscono dalle corte, per il fatto che il guidatore posto ad una distanza dall'imbocco pari alla distanza d'arresto non vede il portale d'uscita.

Non essendo possibile, né conveniente tecnicamente ed economicamente, realizzare in una galleria un'illuminazione pari a quella esterna, è almeno necessario individuare i livelli minimi di cui dotare ogni tratto caratteristico in cui viene divisa la galleria (Fig. A1.1-2):

- 1) tratto di rinforzo (dopo l'imbocco);
- 2) tratto di transizione;
- 3) tratto interno;
- 4) tratto terminale.



Figura A1.1. Suddivisione longitudinale della galleria per livelli di pericolosità

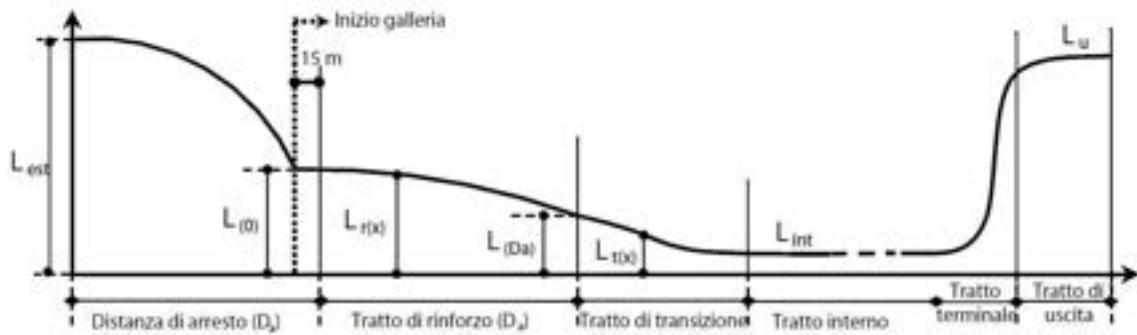


Figura A1.2. Livello di luminanza per tratti.

I primi due tratti sono critici; in essi, infatti, attraverso la determinazione del livello di luminanza ( $\text{cd}/\text{mq}$ ) da realizzare nel tratto iniziale (e per quale lunghezza) e, successivamente, di quello necessario ad adattare gradualmente la vista nel passaggio dall'ambiente esterno a quello interno, si può garantire al guidatore la percezione della presenza di eventuali ostacoli all'interno del tunnel, evitando l'effetto buco nero (Fig. A1.3) con luminosità troppo bassa rispetto all'esterno (che diventa effetto abbagliamento all'uscita).



a)



b)

Figura A1.3. Effetto buco nero (a) e effetto abbagliamento (b).

Le possibili soluzioni illuminotecniche sono classificabili in tre gruppi (Fig. A1.4):

- longitudinale a flusso contrario;
- longitudinale a flusso simmetrico;
- trasversale a flusso simmetrico.

Il sistema longitudinale a flusso contrario è costituito da proiettori installati sul soffitto della galleria in corrispondenza dell'asse di mezz'ora delle corsie di marcia. L'inclinazione del fascio

luminoso genera, incidendo sulla pavimentazione, una superficie verticale rischiarata che funge da sfondo luminoso per gli ostacoli, percepiti per contrasto scuro su chiaro. Il problema di questo sistema d'illuminazione è che l'ombra di un veicolo viene proiettata su quello che lo segue: nel caso di un mezzo pesante, la sua ombra può completamente inglobare l'auto che lo segue. Per ridurre tale effetto negativo è necessario che una parte del fascio luminoso sia direzionata contro le pareti.

Il sistema longitudinale a flusso simmetrico è di diretta derivazione stradale e si realizza con proiettori che diffondono la luce lateralmente alla perpendicolare all'asse stradale e comporta, causa il mancato illuminamento delle pareti, il suddetto problema delle ombre dei veicoli. Il privilegio, infine, dell'illuminazione delle pareti laterali si ha con il sistema trasversale a flusso simmetrico.

Le gallerie corte, se non illuminate in maniera adeguata all'esterno possono apparire non come un buco nero ma come una cornice nera (Fig. A1.5).


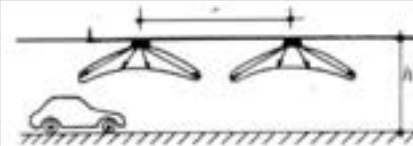
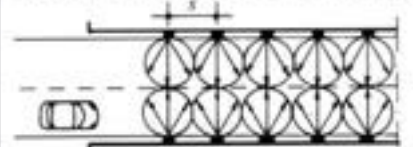
Soluzioni illuminotecniche		Rapporto max interdistanza (s) ed altezza (h) di sospensione: s/h	Lampade impiegate	Efficienza: cd/W
Longitudinale a flusso contrario		2 - 2.5	Vapori di sodio ad alta pressione con bulbo trasparente	4.5
Longitudinale a flusso simmetrico		3.5	Vapori di sodio a bassa pressione	4.5
		4	Vapori di sodio ad alta pressione	3.5 - 4
Trasversale a flusso simmetrico		1.5	Tubi fluorescenti Vapori di sodio a bassa pressione	2 4
		2	Vapori di sodio ad alta pressione	2.8

Figura A1.4. Soluzioni di illuminazione per gallerie

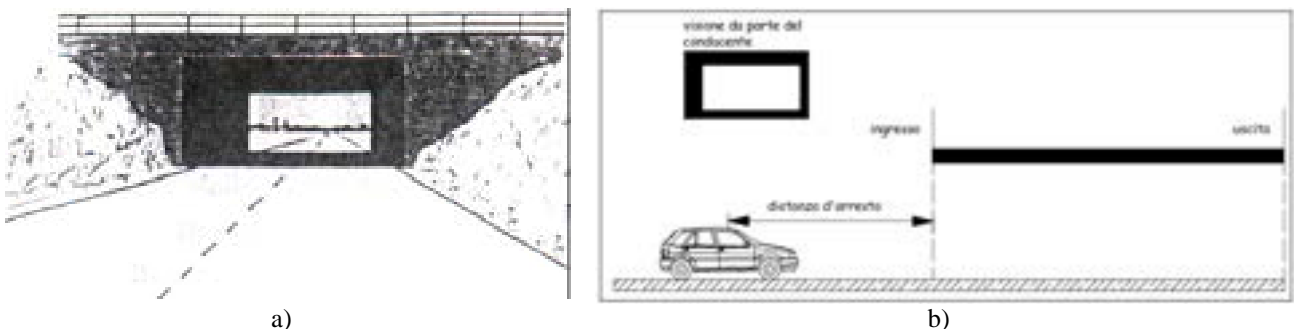


Figura A1.5. Galleria corta visione d'ingresso (a) e sezione (b).

## 1.1 Caratteristiche geometriche e funzionali di una galleria tipo

In merito alle caratteristiche geometriche e funzionali delle gallerie, l'Anas SpA - Direzione Centrale Progettazione, ha stabilito le norme di seguito sintetizzate.

### Colore delle pareti della galleria

Per le colorazioni delle pareti (Fig. A1.6), si devono adottare i seguenti R.A.L., tenendo conto dell'impiego di lampade al sodio ad alta pressione:

- colore bianco RAL 9010
- colore arancio RAL 2002.

In caso di impiego di altri tipi di lampade, le colorazioni devono essere opportunamente verificate ed adeguate per ottenere le stesse rese cromatiche di cui sopra.

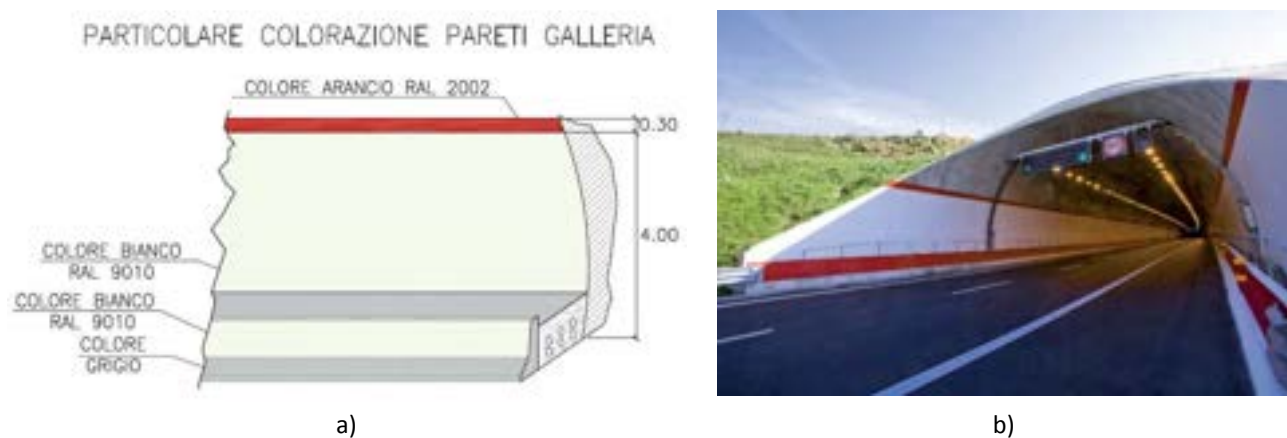


Figura A1.6. Colorazione della superficie interna di una galleria tipo.

### Illuminazione ordinaria

Nei tratti di imbocco delle gallerie, devono essere previste delle zone di rinforzo (zone di entrata e di transizione) in cui la luminanza varia secondo la curva delle luminanze di adattamento, ricavata in conformità a quanto previsto dalla norma UNI 11095 (Fig. A1.7).

L'illuminazione delle zone di entrata e di transizione della galleria deve essere correlata con la luminanza di velo esterna. Qualora la regolazione del livello di luminanza sia discontinua, non sono ammesse variazioni di luminanza con rapporti maggiori di 3.

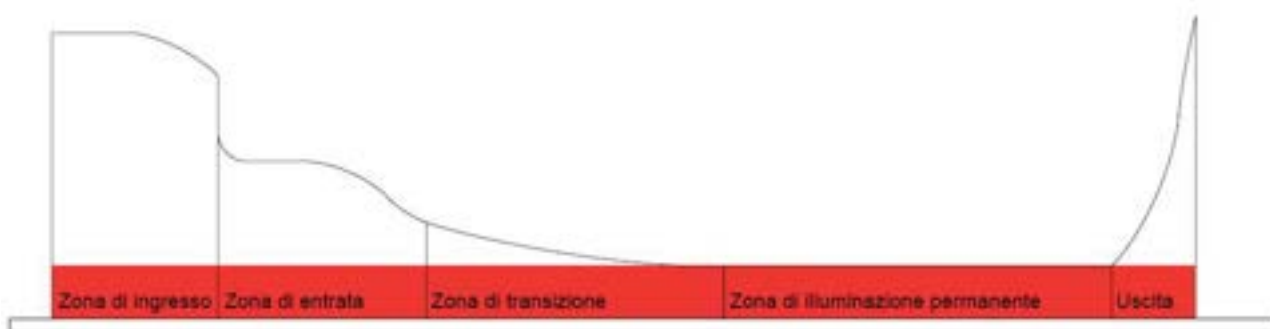


Figura A1.7. Livelli di luminanza

Le lampade dell'impianto di illuminazione devono essere ad alta efficienza luminosa, per consentire un elevato risparmio energetico.

I corpi illuminanti devono essere di norma posizionati su file continue sulle corsie di marcia ed avere un indice di protezione IP 65. Tutti gli accessori metallici, le armature, i proiettori dei corpi illuminanti, gli ancoraggi al rivestimento, devono garantire la massima resistenza alla corrosione. I corpi illuminanti devono essere facilmente sostituibili, ovvero dotati di dispositivi che consentano lo sgancio e l'aggancio rapido (Fig. A1.8).

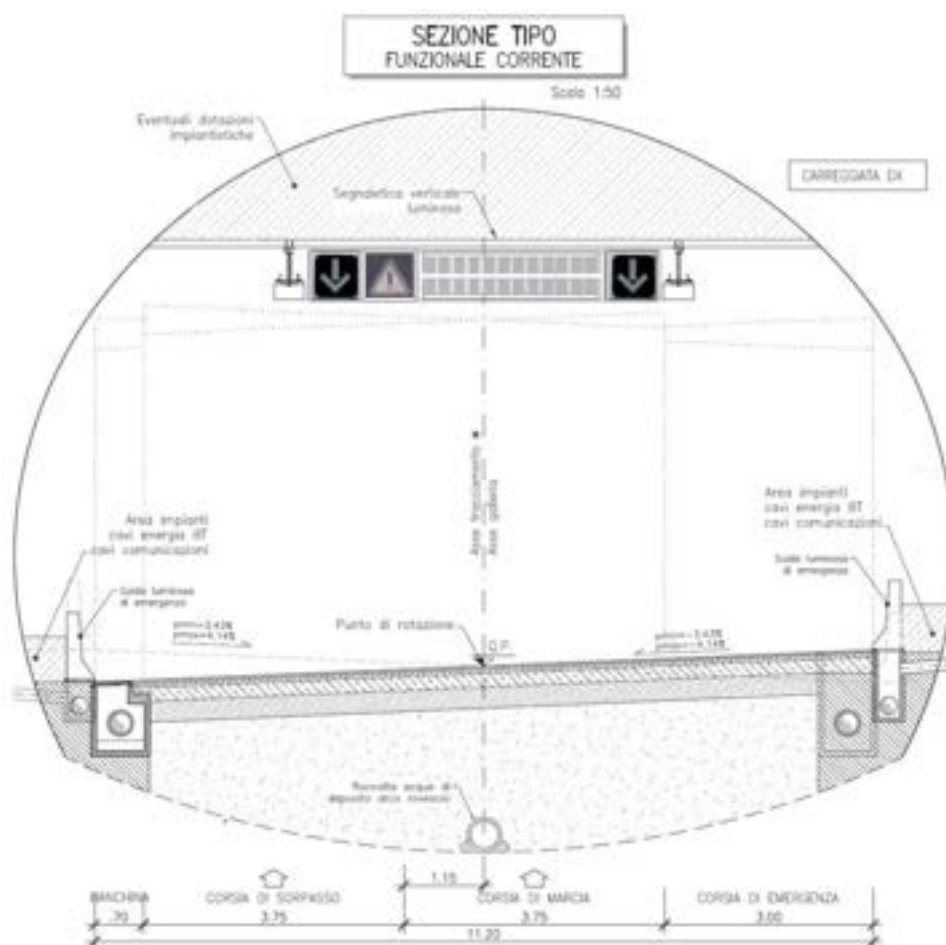


Figura I.8. Sezione tipo di una galleria stradale

### Illuminazione di emergenza

L'illuminazione d'emergenza deve garantire nelle zone interne e nelle piazzole di sosta una luminanza non inferiore a 1 cd/mq. Le caratteristiche tecniche dei corpi illuminanti dell'illuminazione di emergenza sono le stesse della illuminazione ordinaria.

Nelle gallerie di lunghezza superiore a 500m, l'illuminazione di emergenza dovrà essere alimentata da un gruppo elettrogeno, comune eventualmente ad altri impianti, con autonomia di almeno 24 ore; dovrà essere inoltre prevista una alimentazione elettrica in continuità assoluta dedicata, possibilmente costituita da un sistema UPS che sostenga per almeno 30 minuti l'impianto di illuminazione.

Nelle gallerie di lunghezza inferiore a 500m, in cui è prevista l'illuminazione, dovrà essere prevista l'illuminazione di emergenza alimentata mediante un sistema UPS con autonomia pari ad almeno 30 minuti. Sono preferibili soluzioni di massima integrazione tra UPS e dispositivi di regolazione del flusso luminoso.

Il pannello a messaggio variabile prima dell'ingresso della galleria deve indicare agli utenti lo stato di malfunzionamento dell'impianto di illuminazione interno alla galleria ed eventuali provvedimenti temporanei di esercizio degradato.

### Illuminazione di sicurezza

In generale dovrà essere previsto un elemento luminoso a led su entrambi i lati della galleria, con la duplice funzione di illuminare il camminamento in prossimità della barriera stessa e di segnalare il verso di percorrenza della galleria in caso di emergenza.

I corpi illuminanti a LED saranno idonei per montaggio sulla parete della galleria, in caso di sezioni con marciapiedi, ovvero per montaggio all'interno della barriera re direttiva (Fig. A1.9-10), in caso di sezioni con tali elementi marginali.

Dovranno essere impiegate le tipologie ANAS di seguito descritte.

L'illuminazione di sicurezza deve essere in grado di assicurare:

- l'indicazione chiara e non ambigua delle vie di fuga, garantita anche dalla guida fisica e luminosa del corpo illuminante,
- l'illuminazione delle vie di fuga,
- individuazione delle dotazioni di sicurezza a servizio degli utenti,
- l'indicazione del verso di percorrenza, in allontanamento dal luogo di incendio.

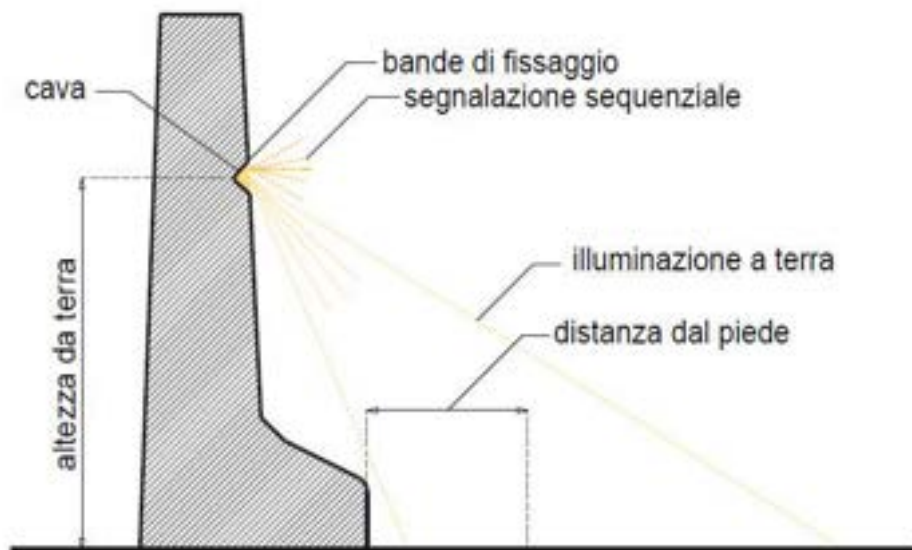


Figura A1.9. Barriera redirettiva a LED

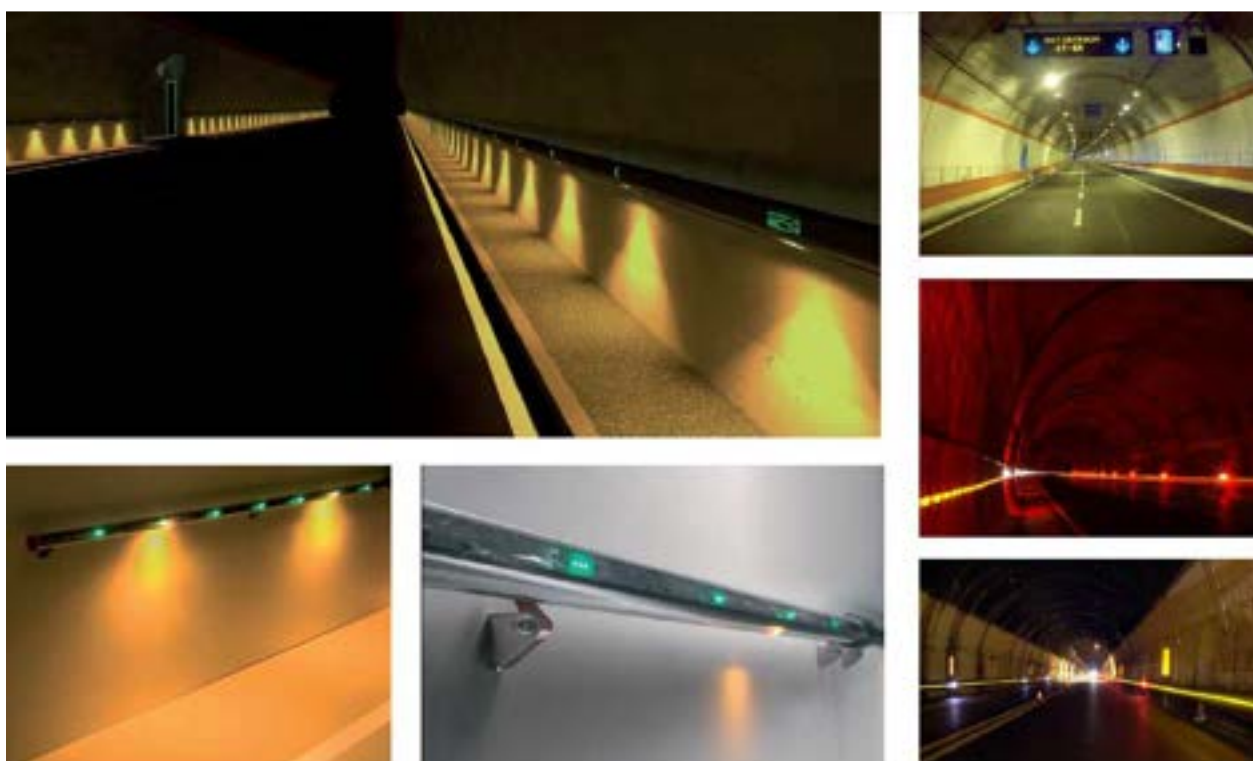


Figura A1.10. Esempi di barriere redirettive a LED.

## 1.2 Casi studio

### a) Galleria Crocina - Arezzo

La galleria Crocina, con una lunghezza complessiva di 160 m, era dotata di impianto monofilare con lampade installate ad una interdistanza variabile fra 9 e 11 m, per un totale complessivo di 21 apparecchi di illuminazione.

Il nuovo progetto ha previsto la sostituzione degli apparecchi esistenti corredati di lampade al sodio da 100 W per l'illuminazione permanente, con apparecchi a luce LED (tipo Ledway Tunnel, di Ruud Lighting) da 60W, dotati di ottica stradale asimmetrica.

Ognuno degli apparecchi installati è costituito da n. 60 LED con temperatura colore di circa 6000 K, resa cromatica 75 e rendimento di 86 lm/W. I nuovi apparecchi a LED sono stati installati ad un'altezza dal suolo di 5 m.

Da un confronto tra le immagini delle due installazioni (Fig. A1.11), prima e dopo risalta con evidenza la diversità nella distribuzione della luce e nell'uniformità generale di illuminamento. Si può vedere come nel caso dell'impianto a LED la distribuzione della luce sulle pareti risulti essere uniforme con quella a terra; mentre nell'impianto al sodio il livello di illuminamento delle pareti (si confronti la parete lato corsia di sorpasso con la parete lato corsia di marcia) è disuniforme e diverso da quello a terra.

### Apparecchio utilizzato

L'apparecchio scelto è il modello Ledway Tunnel, prodotto da Ruud Lighting, utilizzato per installazioni quali tunnel e sottopassaggi carrabili. Il prodotto ha una struttura centrale di forma rettangolare con lunghezza variabile secondo la quantità dei moduli luce utilizzati. Il sistema modulare permette di aggiungere o togliere le barre da 20W ciascuna per ottenere il flusso luminoso desiderato. LEDWAY Tunnel è disponibile da una potenza di 40W (2 Light Bars) fino a 80W (4 Light Bars).





Figura A1.11. Galleria Crocina ad Arezzo prima (in alto) e dopo (figure in basso) l'intervento.

*b) Galleria Vado - Autostrada del Sole A1*

Lunghezza galleria 1.128 m; 3 corsie di marcia. Sistema di illuminazione bifilare. Interdistanza apparecchi 10 m. Sono stati installati 185 apparecchi Ledway Tunnel da 60 LED e 70 apparecchi da 40 LED montati su impianto bifilare ad interdistanza (su ogni fila) di 10 m (Fig. A1.12-13). Nel rispetto della vigente normativa in materia di illuminazione di gallerie, è stato possibile raggiungere i livelli di illuminamento necessari installando apparecchi da 60 LED per l'ingresso della galleria e apparecchi da soli 40 LED per la parte finale.

Livelli di luminanza ottenuti con gli apparecchi da 40 LED: 2,26 cd/m<sup>2</sup> medi al suolo con uniformità generale  $U_0= 0,72$ . Anche i livelli di luminanza calcolati sulle pareti sono piuttosto interessanti, considerando l'utilizzo di apparecchi da soli 40 LED (potenza totale 55W). La luminanza media ottenuta sulle pareti è di 3,54 cd/m<sup>2</sup> con uniformità generale  $U_0= 0,86$ .



Figura A1.12. L'apparecchio LED Ledway Tunnel, impiegato nella galleria Crocina e nella galleria Vado.

Caratteristiche apparecchio per galleria Crocina

- n° 60 LED per apparecchio
- temperatura di colore 6000 K
  - resa cromatica 75
  - rendimento 86 lm/W

Caratteristiche apparecchio per galleria Vado

- n° 40 e 60 LED per apparecchio
- temperatura di colore 6000K
  - resa cromatica 75
  - rendimento 86lm/W



Figura A1.13. La galleria Vado dopo l'intervento.

c) Galleria Veilino - Autostrada A12 – Genova

Il progetto ha interessato il circuito di illuminazione permanente e l'imbocco della Galleria Monte Veilino, sull'Autostrada A12. Sono stati utilizzati 55 apparecchi Edge Tunnel con potenze comprese tra 40 a 120 LED (Fig. A1.14-15). Gli apparecchi, dotati di ottica TM, sono stati posizionati a varie interdistanze. L'impianto è stato inoltre integrato con un sistema di regolazione ad onde convogliate per la gestione dell'emissione luminosa che permette il funzionamento dei LED con amperaggi fino a 700mA.

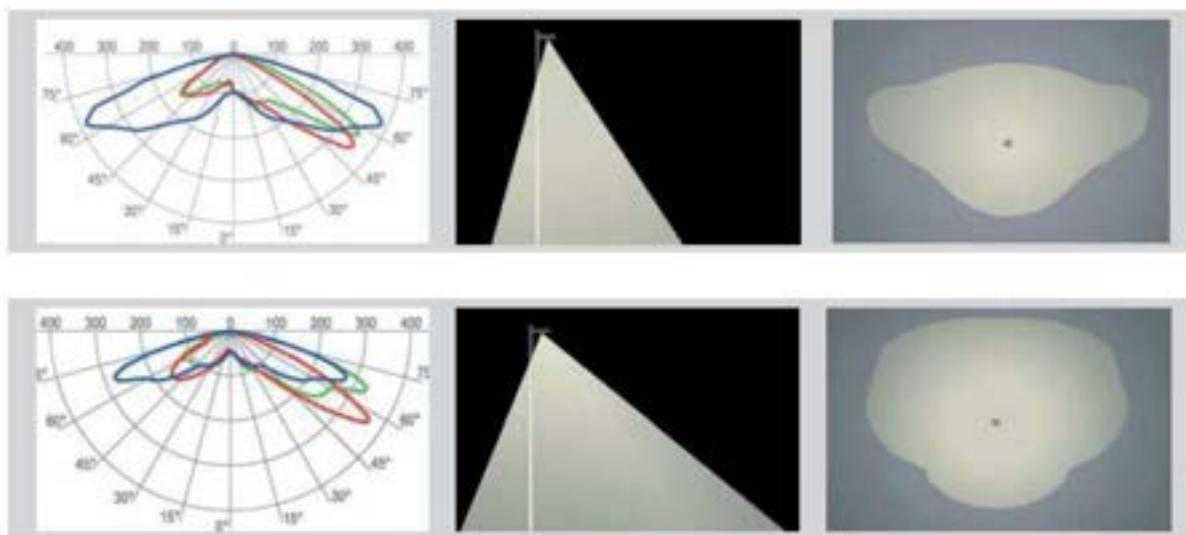


Figura A1.14. Apparecchio Edge Tunnel di Ruud Lighting impiegato per la Galleria Veilino e per la galleria Pregasina.

Caratteristiche apparecchio per galleria Veilino  
n.40 e 120 LED per apparecchio  
luminanza d'ingresso 68cd/m<sup>2</sup>

ottica TM, asimmetrica di tipo II Medium  
per illuminazione di strade, piste ciclabili e percorsi  
pedonali

Caratteristiche apparecchio per galleria Pregasina  
n. 80 LED per apparecchio  
luminanza d'ingresso 68cd/m<sup>2</sup>

ottica PR, asimmetrica di tipo III  
per illuminazione di strade e parcheggi



Figura A1.15 La galleria Veilino sulla A12 a Genova, dopo l'intervento.

*d) Galleria Pregasina, Trento*

Per questo progetto sono stati utilizzati n. 123 apparecchi EDGE Tunnel da 80 LED, dotati di ottica PR. Gli apparecchi sono stati installati a un'altezza di 5,45 metri, con un'interdistanza di 8 metri. L'impianto è stato inoltre integrato con un sistema di regolazione per la gestione del flusso luminoso (Fig. A1.16).



Figura A1.16. La galleria Veilino sulla A12 a Genova, dopo l'intervento.

e) *Galleria Ortisei (Bolzano)*

Questo impianto rappresenta il primo intervento pilota di progettazione integrata Eridio Tunnel, un sistema che prevede non solo la completa revisione dell'impianto illuminotecnico a favore di impianti a LED, ma anche una totale ristrutturazione di tutti gli altri apparati presenti in galleria (verniciatura dell'interno, asfalto, dispositivi catadiottrici ecc.) secondo le più avanzate tecniche del settore.

La verniciatura dell'interno è stata eseguita con un composto fotocatalitico a base diossido di titanio, che grazie a un processo di fotocatalisi è in grado di convertire le sostanze inquinanti emesse dalle auto in residui inerti lavabili. A terra è stato poi steso un nuovo manto stradale realizzato con bitume chiaro inerte che permette di ottenere un coefficiente di riflessione superiore al 13% (Fig.A1.17-19).



a)



b)

Figura A1.17. La galleria Ortisei (BZ) prima e dopo l'intervento.

## TRATTAMENTO DELLE PARETI

- VERNICIATURA

- Riduzione dei costi di manutenzione
- vernice acrilica a base di fosfati ad alta riflessione
- trattamento silossanico protettivo
- antigraffiti e antisale

- TRATTAMENTO AUTOPULENTE

- composto a base di biossido di titanio che raggiunge elevati livelli di fotocatalisi in presenza di radiazione luminosa visibile.

## ILLUMINAZIONE

- Installazione di apparecchi LED

- Risparmio: consumi ridotti anche del 40%
- Durabilità: manutenzione zero per almeno 6 anni
- Qualità: elevata resa cromatica

## TRATTAMENTO DELL'ASFALTO

Per rendere più chiaro il manto stradale e migliorare la luminosità della galleria:

- Abrasione nel caso di manto stradale preesistente conforme
- Bitume albino qualora ci sia la necessità di effettuare una nuova posa del manto stradale





a)

Figura A1.18. La galleria Ortisei (BZ) prima e dopo l'intervento.



a)



b)

Figura A1.19. L'apparecchio G-LED Tunnel utilizzato per l'illuminazione della Galleria Ortisei.

## Appendice 2

### Misure di laboratorio

*Nel corso dell'attività svolta nell'anno accademico 2010-2011 presso il laboratorio di illuminotecnica del dipartimento DIAEE, sono state effettuate misure su una serie di sorgenti luminose tradizionali (a incandescenza e fluorescenti) e innovative (LED), al fine di produrre una serie di considerazioni basate sul confronto degli spettri di emissione misurati.*

*Come si può vedere dai diagrammi delle pagine seguenti, che rappresentano un risultato di un'attività ancora in progress, dandosi che le misure sono ancora in corso, la composizione spettrale della luce emessa dalle varie sorgenti è fortemente variabile: si passa dall'emissione continua con forte prevalenza di lunghezze d'onda del rosso per quanto riguarda la sorgente a incandescenza, per spostarsi poi verso distribuzioni spettrali caratterizzate da picchi molto ristretti, propri delle comuni lampade fluorescenti, fino ad arrivare a distribuzioni molto variabili, caratterizzate da picchi più ampi e proprie delle sorgenti a LED con fosfori, le più comuni in commercio.*

*Poiché, come detto nel capitolo sulle applicazioni della tecnologia SSL, è stata ampiamente dimostrata l'interrelazione tra la composizione spettrale della luce a cui gli esseri umani sono esposti e le loro risposte psicofisiologiche, appare necessaria un'analisi spettrale esaustiva delle tipologie di sorgenti in commercio al fine di mettere in relazione la loro composizione spettrale con gli effetti che esse generano sull'essere umano. A tal proposito nelle ultime pagine sono stati riportati i diagrammi "circadiani" relativi ad alcuni degli spettri delle pagine precedenti e basati sulla curva di sensibilità circadiana empirica individuata da L. Thapan nel 2002: tali grafici rappresentano la stimolazione che la specifica composizione spettrale può teoricamente avere sull'orologio biologico umano.*

*Risulta necessario sottolineare, però, che a parità di distribuzione spettrale, gli effetti indotti nell'uomo variano con una molteplicità di parametri molto difficile da valutare a priori, come la conformazione del campo visivo, intesa sia dal punto di vista geometrico che della caratterizzazione ottica delle superfici ambiente, la direzione dello sguardo, la sensibilità individuale alla luce, ecc.*

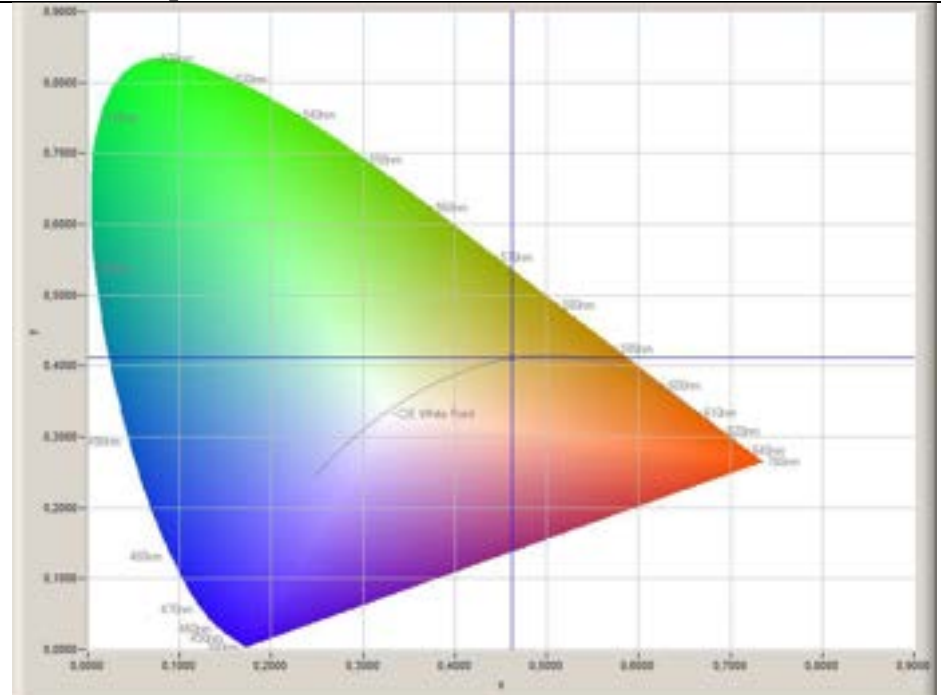
## Lampada a incandescenza

Specifiche tecniche:

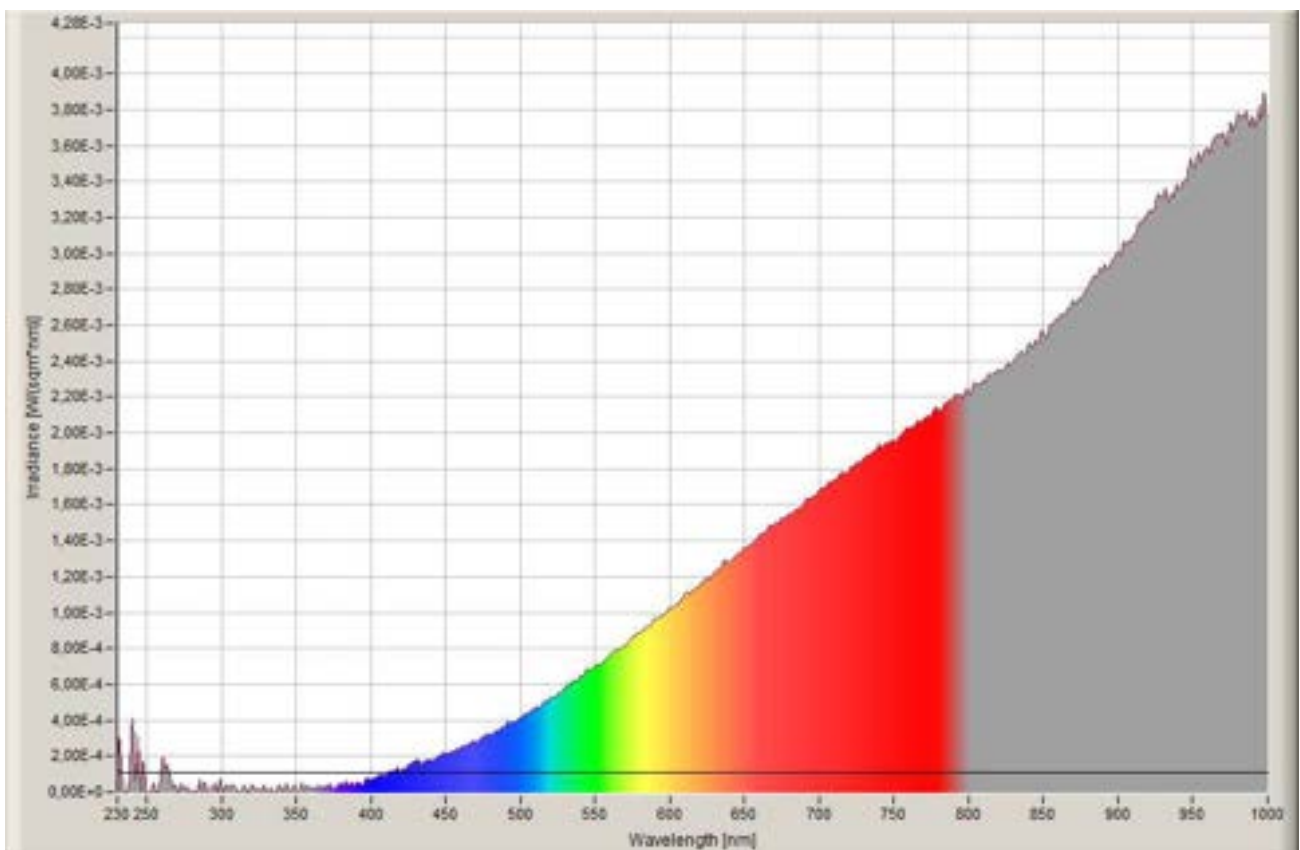
TC: 2676K

Potenza: 60W

Flusso: 710lm



Coordinate cromatiche CIE(x,y)



Spettro di emissione

Nota: laddove nelle specifiche tecniche manchino dei dati, essi non sono stati resi noti dal produttore dei dispositivi.

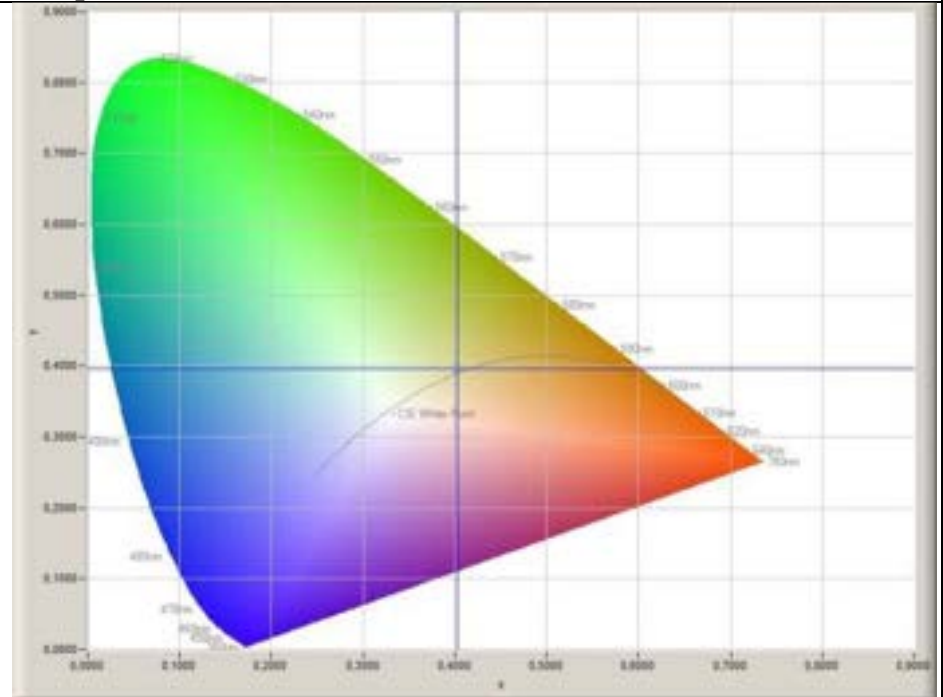
### Lampada a incandescenza con vetro blu

Specifiche tecniche:

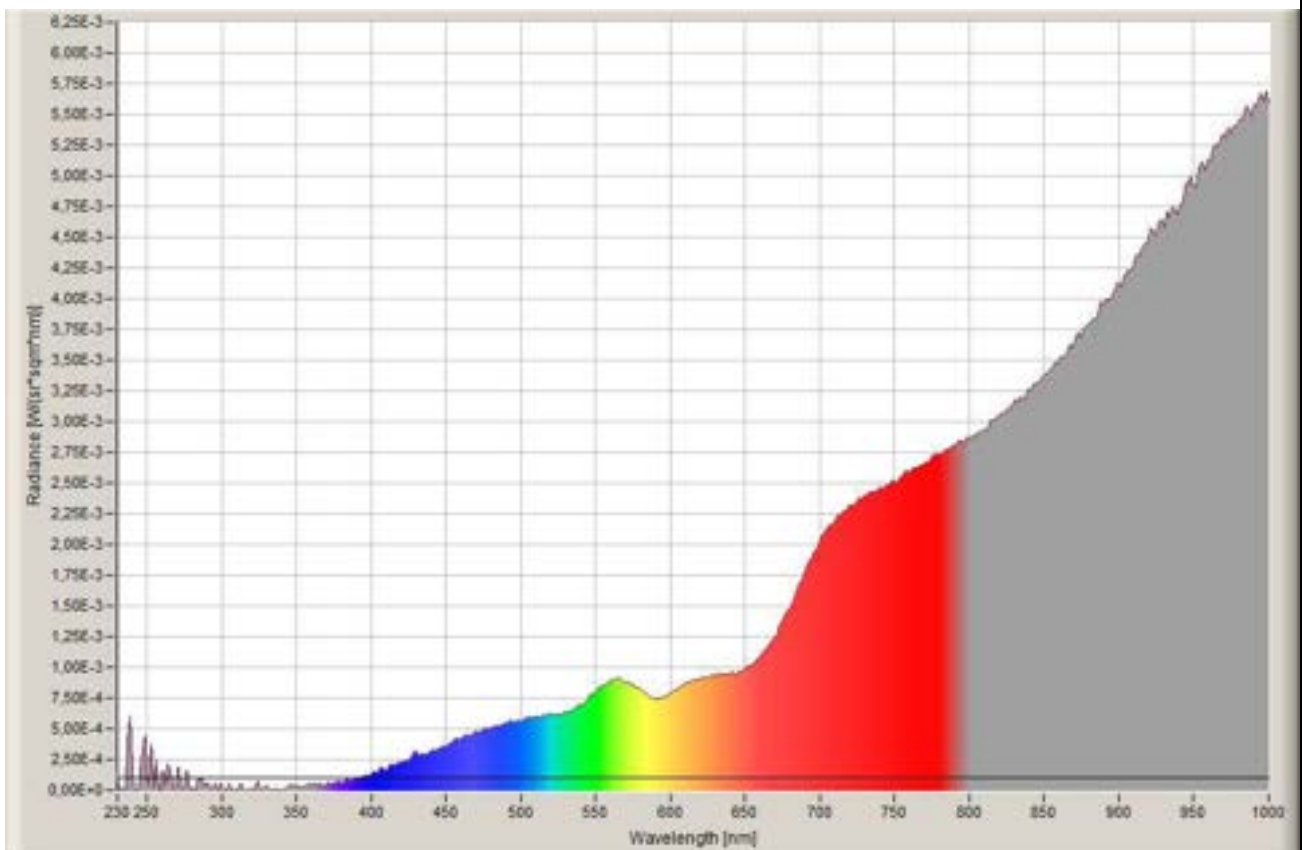
TC: 3593K

Potenza: 100W

Flusso: 700lm



Coordinate cromatiche CIE(x,y)



Spettro di emissione

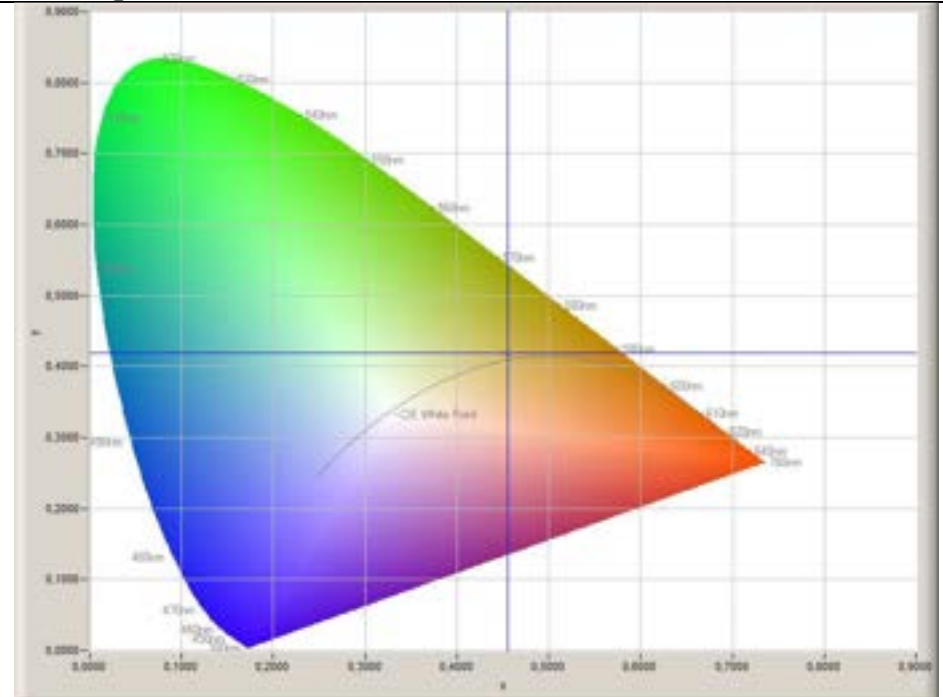
## Lampada fluorescente a luce calda

Specifiche tecniche:

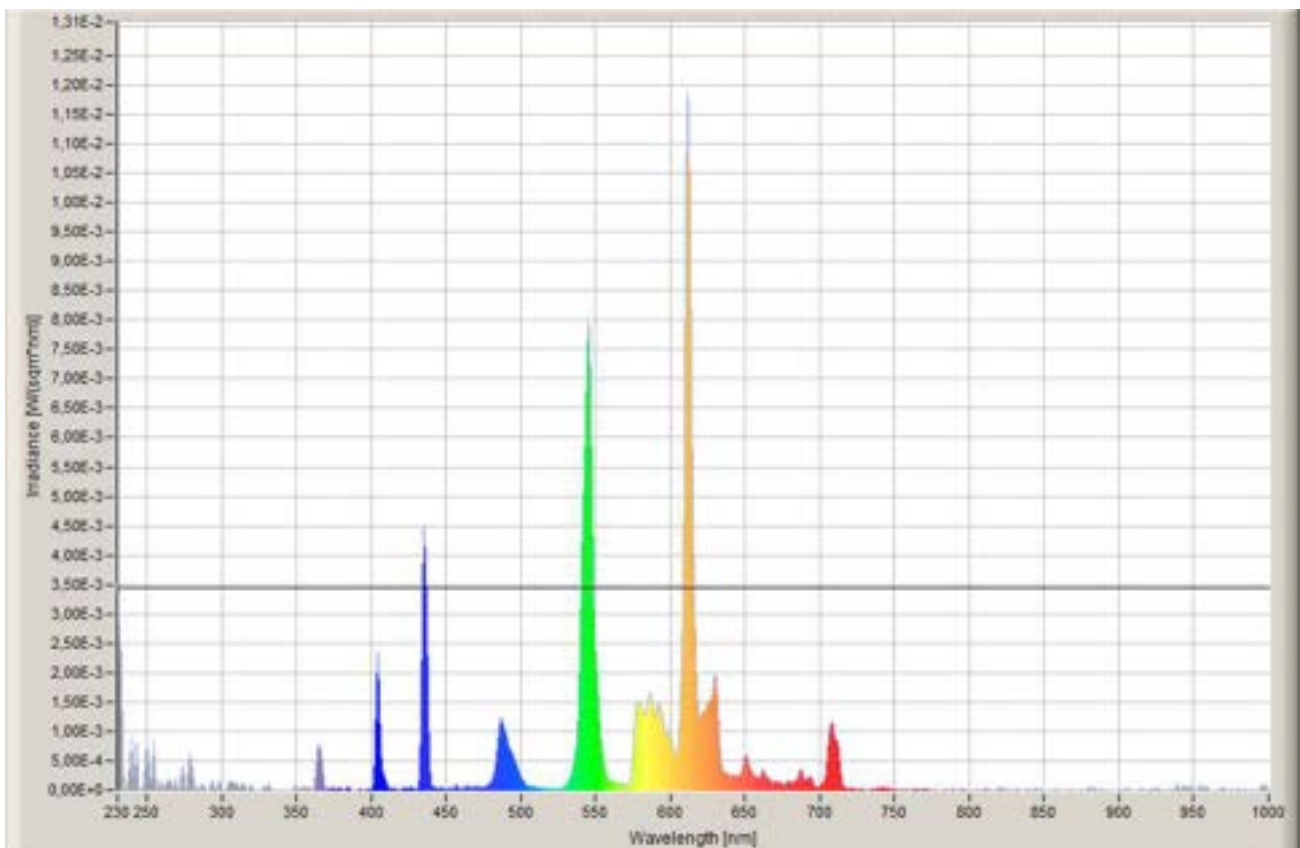
TC: 2824K

Potenza: 24W

Flusso: 1450lm



Coordinate cromatiche CIE(x,y)



Spettro di emissione

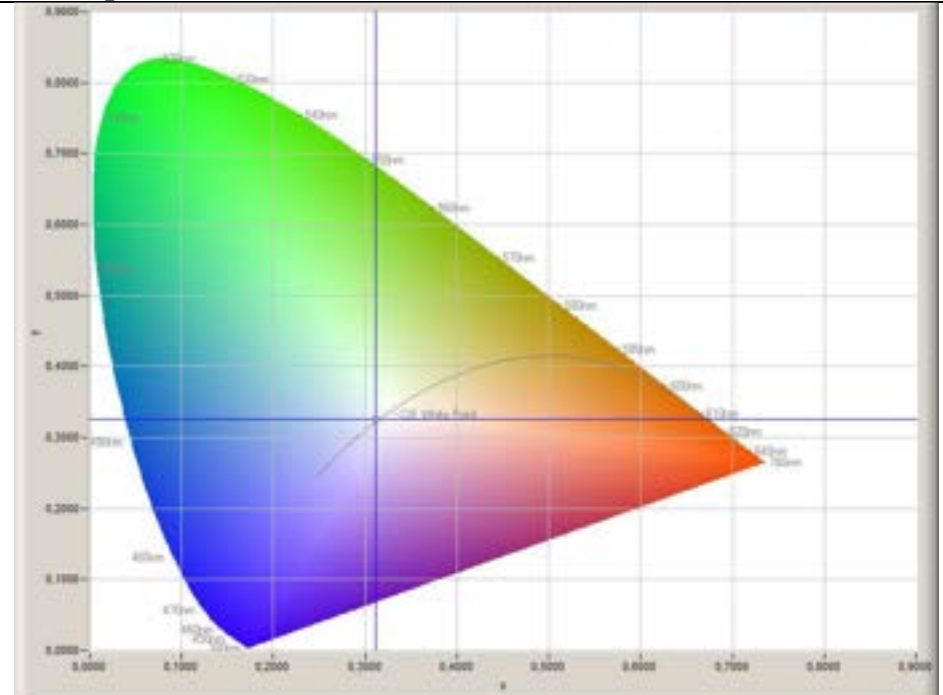
## Lampada fluorescente a luce fredda

Specifiche tecniche:

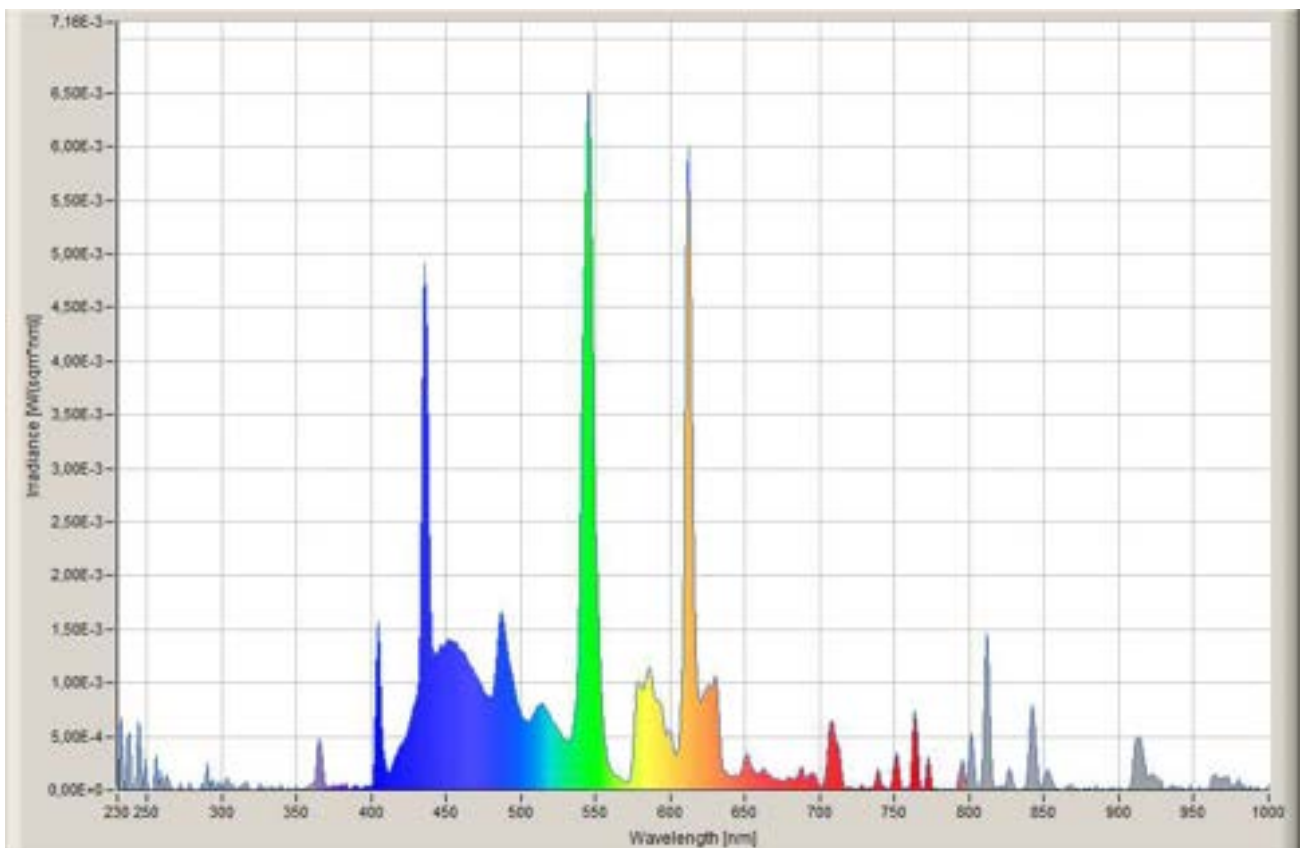
TC: 6586K

Potenza: 24W

Flusso: 1416lm



Coordinate cromatiche CIE(x,y)



Spettro di emissione

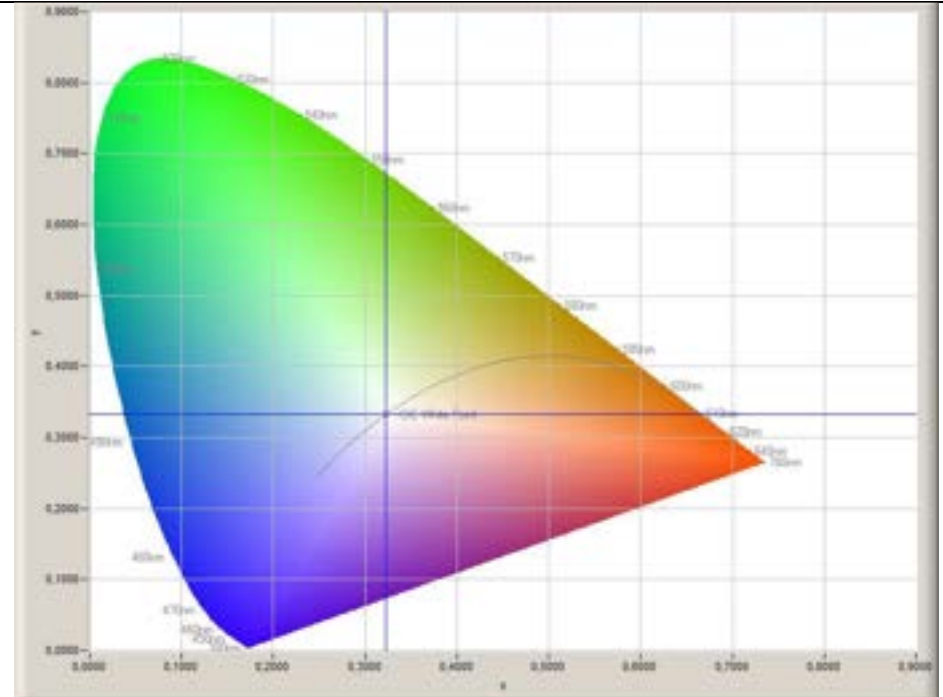
## Bulbo LED 1

Specifiche tecniche:

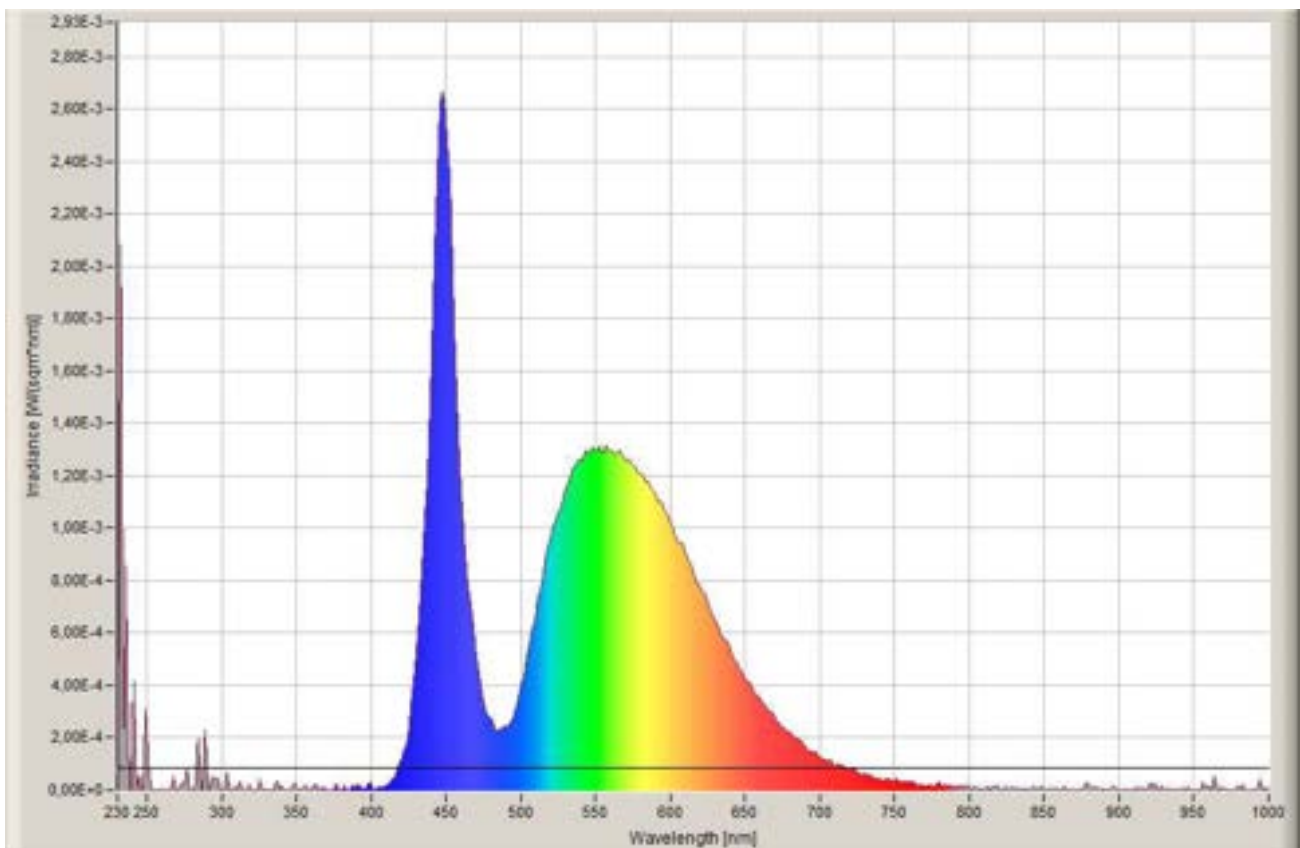
TC: 5590K

Potenza: 8W

Flusso: -



Coordinate cromatiche CIE(x,y)



Spettro di emissione

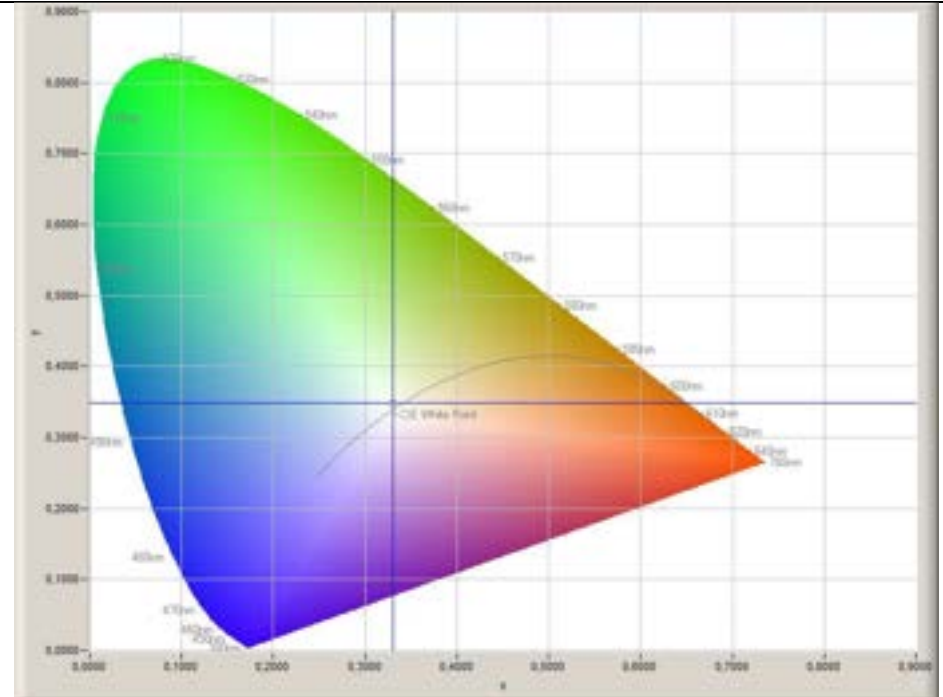
## Bulbo LED 2

Specifiche tecniche:

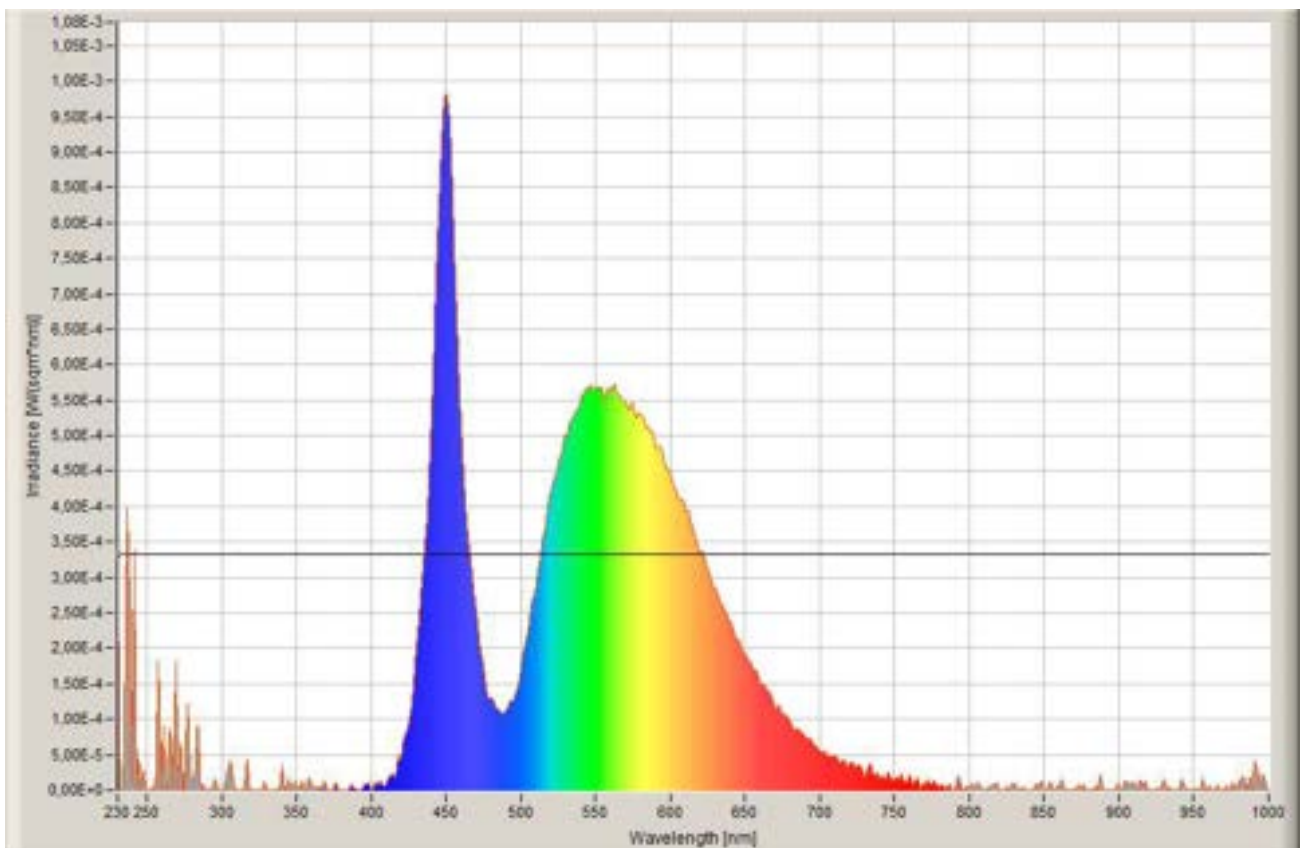
TC: 5598K

Potenza: 3W

Flusso: -



Coordinate cromatiche CIE(x,y)



Spettro di emissione



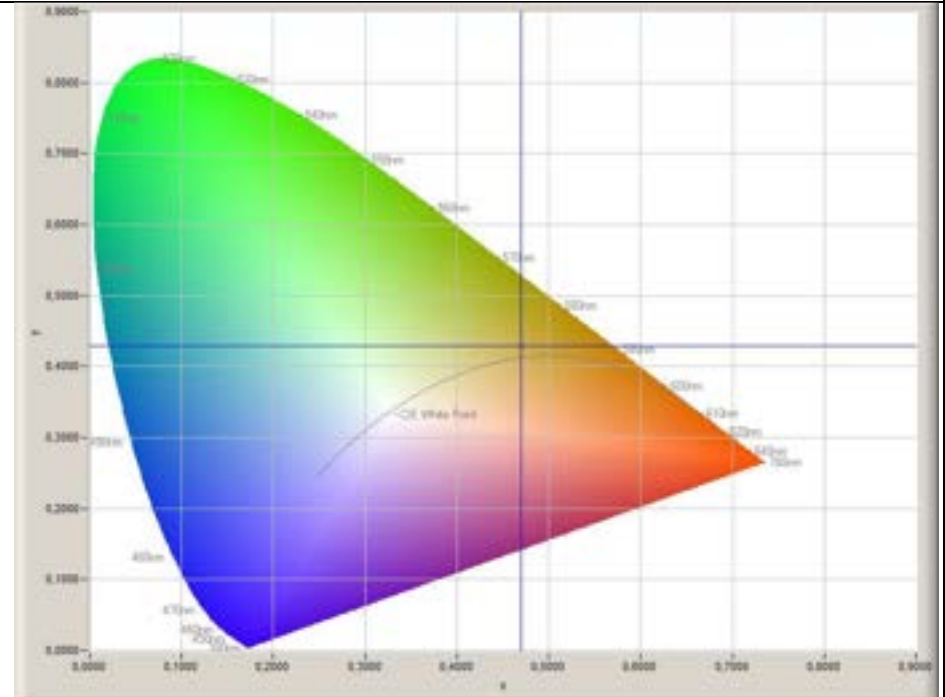
### Bulbo LED 3

Specifiche tecniche:

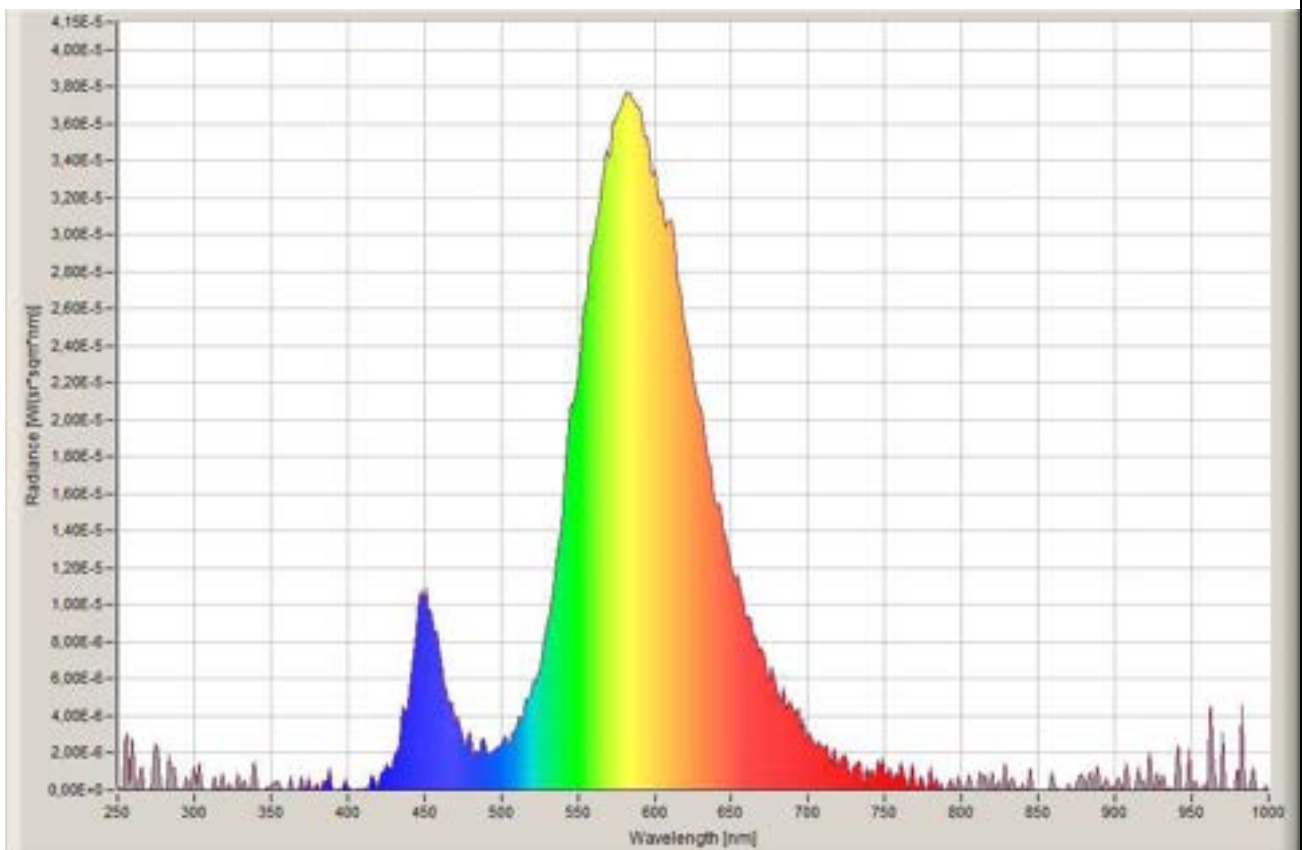
TC: 2703K

Potenza: 2,5W

Flusso: -



Coordinate cromatiche CIE(x,y)



Spettro di emissione

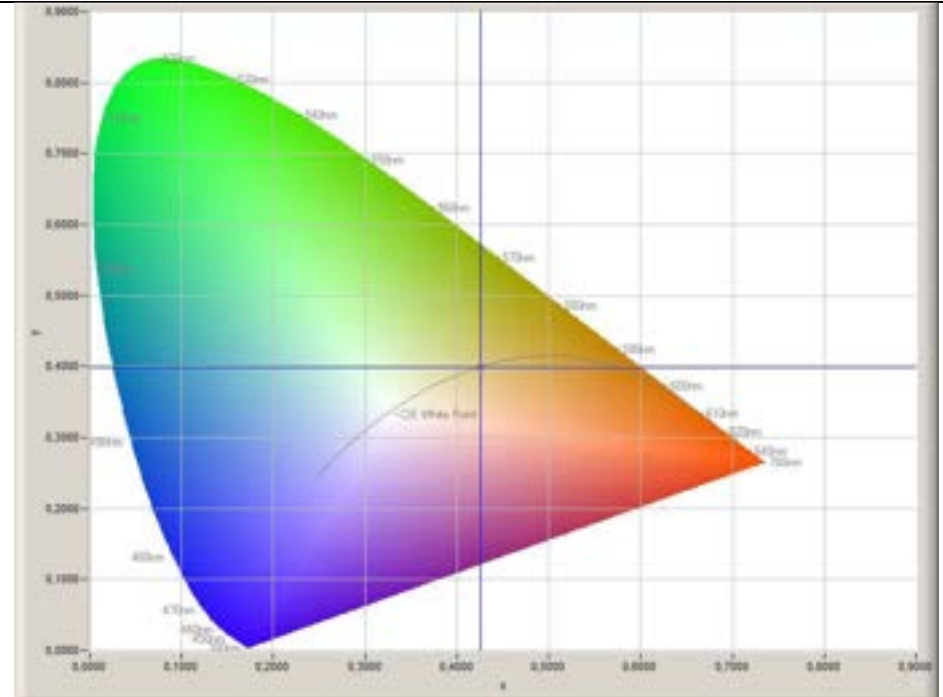
## Bulbo LED 4

Specifiche tecniche:

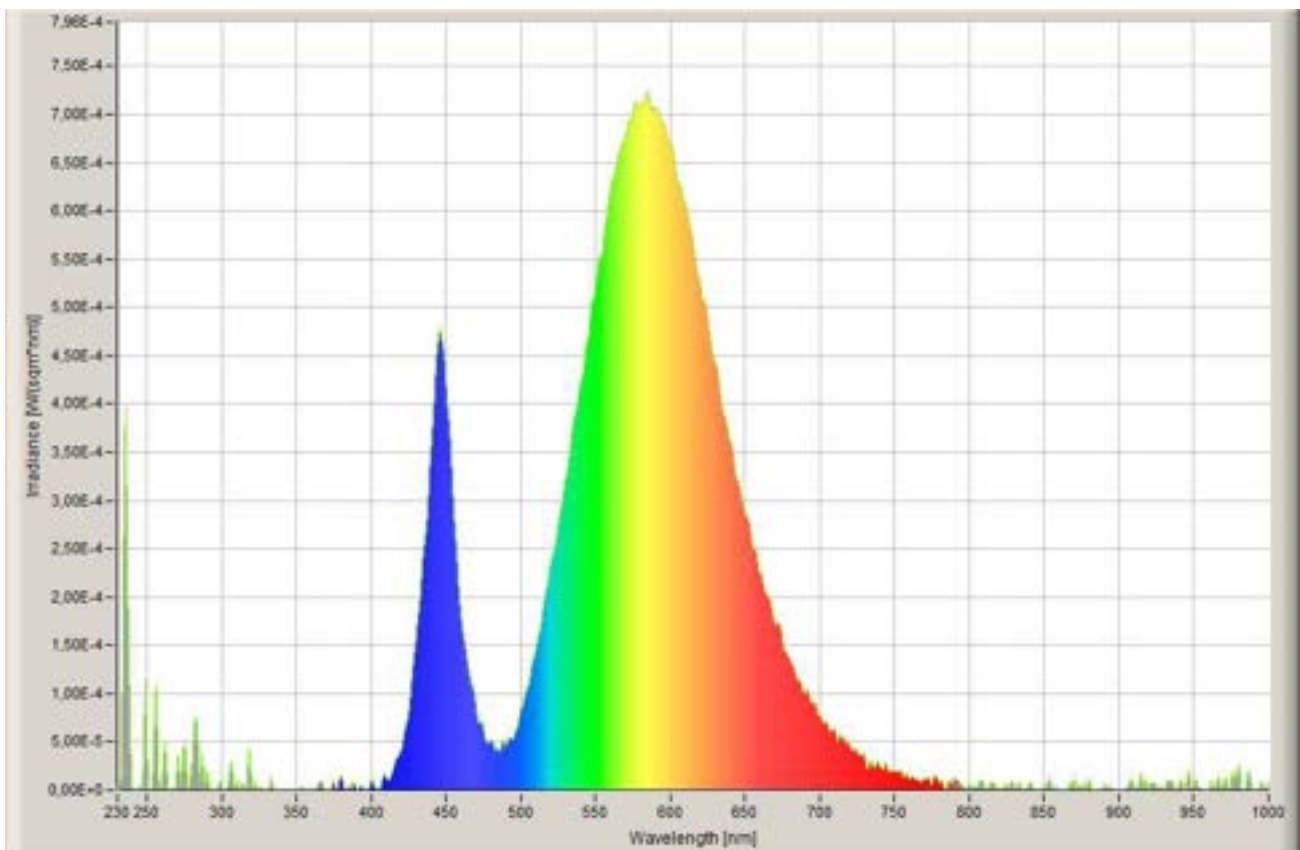
TC: 3175K

Potenza: -

Flusso: -



Coordinate cromatiche CIE(x,y)



Spettro di emissione

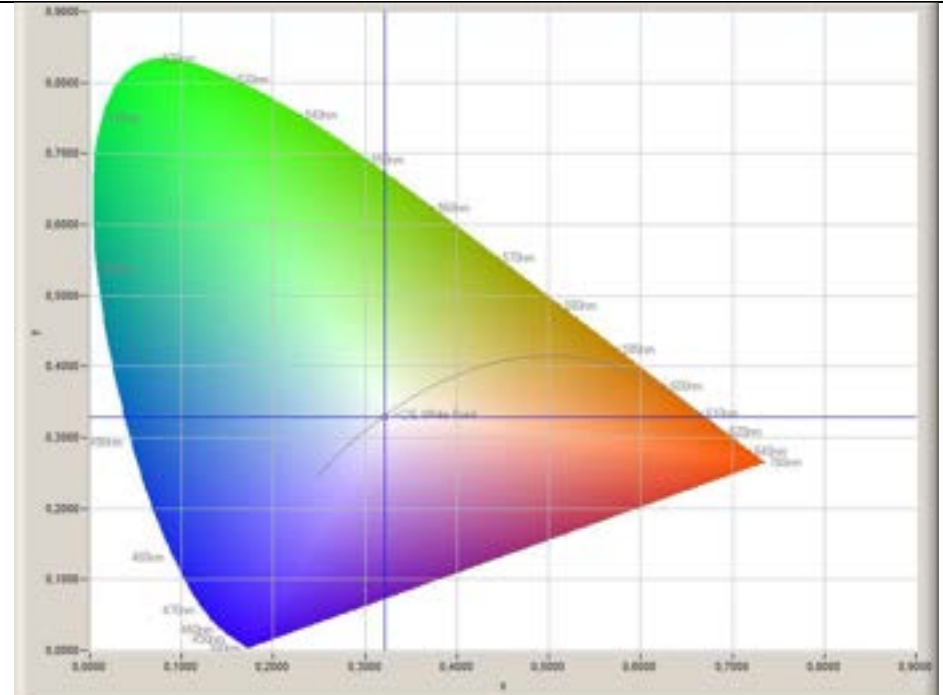
## Bulbo LED 5

Specifiche tecniche:

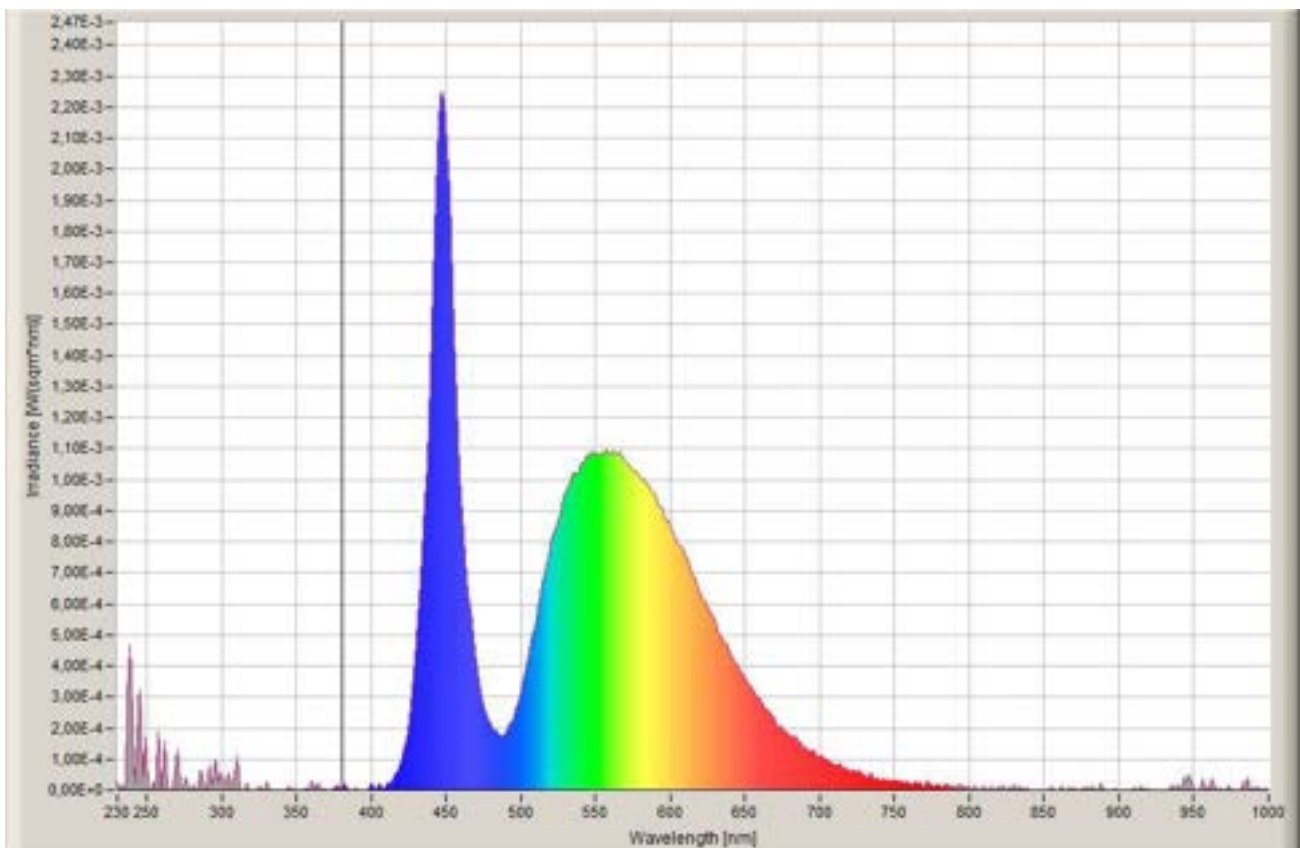
TC: 6035K

Potenza: 6W

Flusso: -



Coordinate cromatiche CIE(x,y)



Spettro di emissione

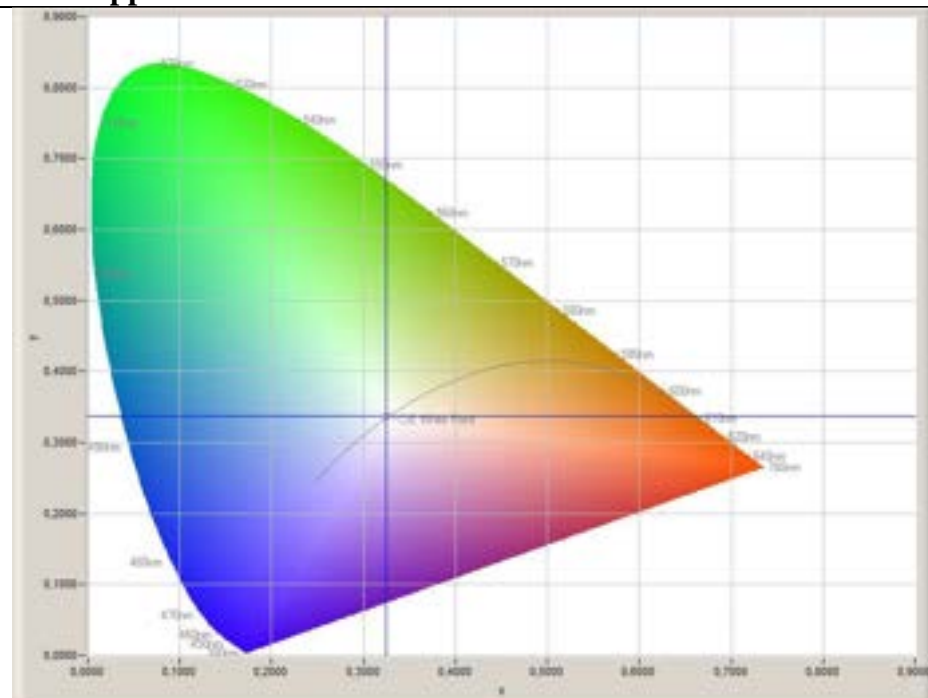
## Apparecchio LED da incasso

Specifiche tecniche:

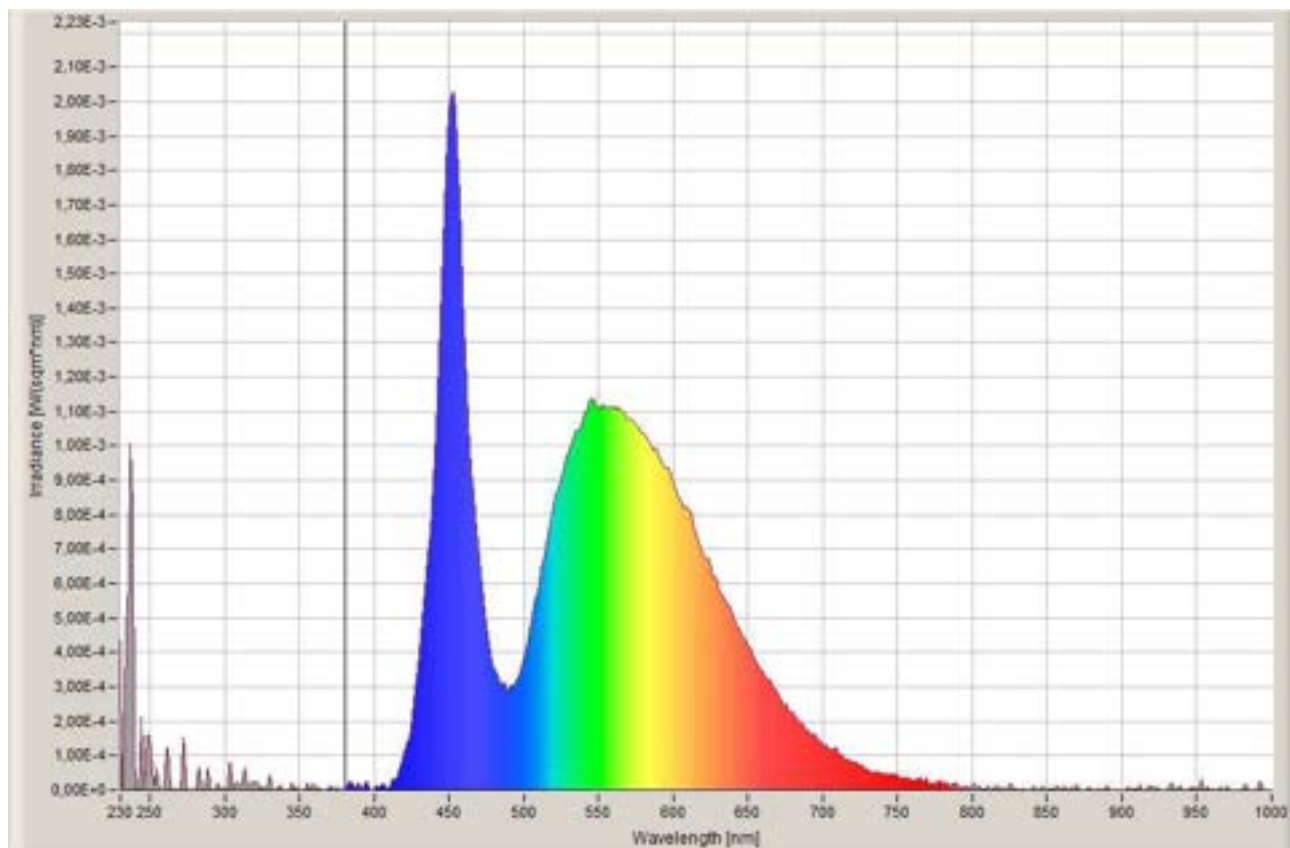
TC: 5896K

Potenza: -

Flusso: -

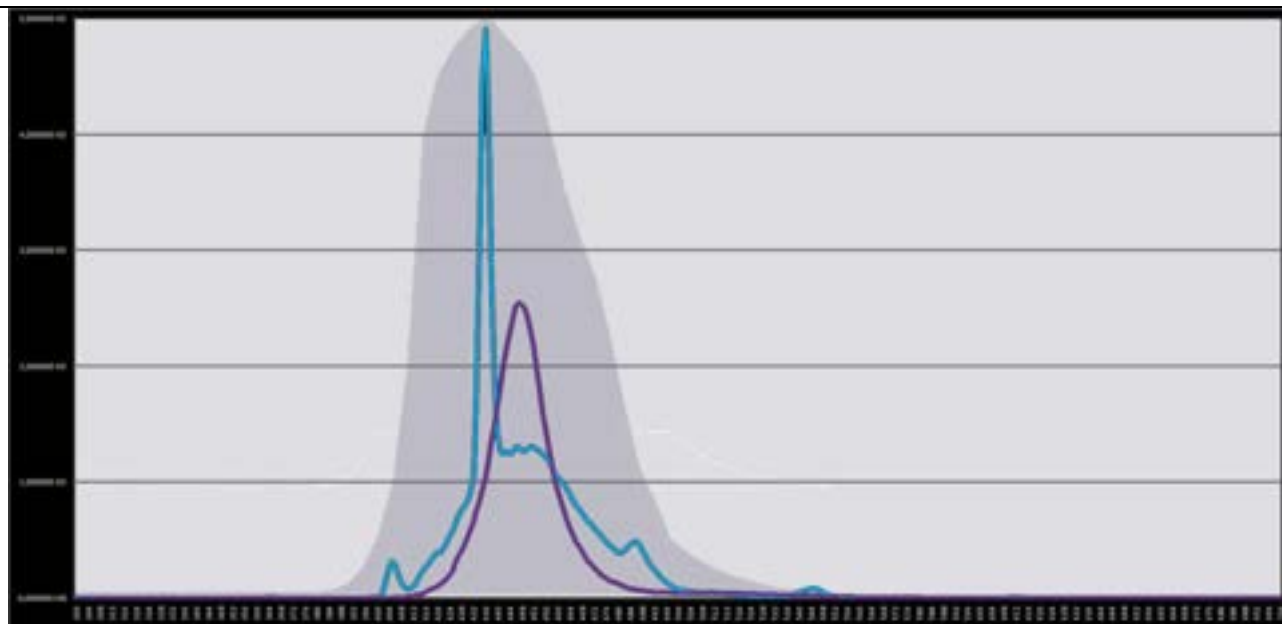


Coordinate cromatiche CIE(x,y)

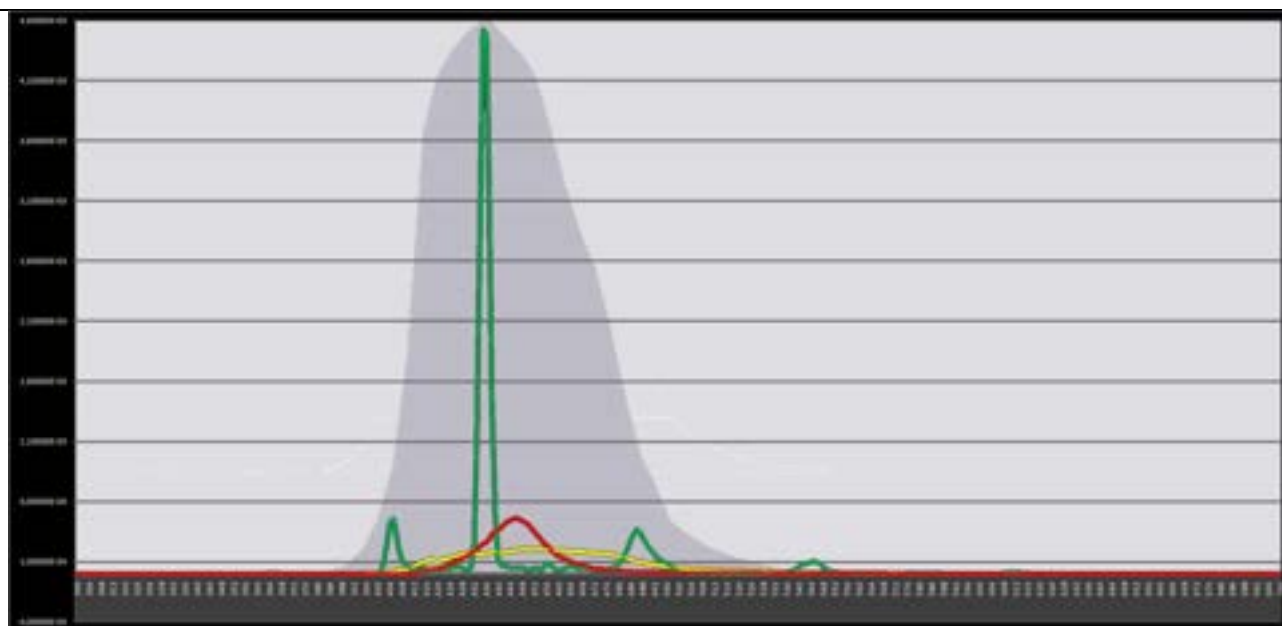


Spettro di emissione

### Diagrammi circadiani di alcune delle sorgenti delle pagine precedenti a confronto



Sovrapposizione degli spettri circadiani di alcune sorgenti a luce fredda (azzurro: lampada fluorescente a luce fredda, viola: bulbo LED 5) con la curva sensibilità circadiana (ombra grigia).



Sovrapposizione degli spettri circadiani delle sorgenti a luce calda (in rosso il bulbo LED 4, in verde la fluorescente a luce calda, e in giallo la lampada a incandescenza) con la curva sensibilità circadiana (ombra grigia).

NOTA: la sensibilità circadiana e l'irradianza spettrale hanno unità di misura diverse, ma sono riportate all'interno dello stesso diagramma per consentire una rapida lettura d'insieme dei fenomeni oggetto di studio.

## Appendice 3

### Valutazione della qualità dell'illuminazione LED

*Poiché la maggior parte dei metodi di valutazione della qualità dell'illuminazione sono derivati dalla ricerca relativa alle sorgenti luminose tradizionali, si pone la questione se essi siano adatti per valutare l'illuminazione LED o se sia necessario codificare ulteriori parametri e criteri.*

## **1. Impostazione metodologica**

Partendo dallo studio delle pubblicazioni e degli standard esistenti per la valutazione della qualità dell'illuminazione con sorgenti tradizionali, sono state valutate le eventuali limitazioni alla loro applicabilità ai sistemi LED. In letteratura è possibile che esistano uno o più criteri di valutazione che può o meno essere applicabile all'illuminazione LED così come è possibile che non ne esista alcuno. Lo scopo delle ricerche in questo ambito è quello di codificare metodi di valutazione della qualità dell'illuminazione intendendo il termine qualità non solo nella sua accezione tradizionale, legata allo svolgimento del compito visivo e alle situazioni di discomfort, ma anche in relazione all'aspetto dello spazio, degli ambienti e dei volti, che può essere influenzato in modo significativo dalle sorgenti LED.

## **2. Parametri rilevanti per la valutazione della qualità**

Alla luce dell'analisi bibliografica alcuni parametri sono stati evidenziati come rilevanti per la valutazione della qualità dei sistemi LED:

- la visibilità sul compito visivo;
- l'abbagliamento;
- la resa cromatica;
- lo sfarfallamento e l'effetto stroboscopico;
- l'aspetto dell'ambiente e dei volti;
- la stabilità del colore.

## **3. Criteri di valutazione dei vari parametri**

*Visibilità sul compito.* E' necessaria una buona uniformità della luce sul piano di lavoro, rispettando i limiti di proporzioni tra le diverse aree del campo visivo già utilizzati per l'illuminazione con sorgenti tradizionali.

*Abbagliamento:* esistono due principali tipi di abbagliamento, quello che causa discomfort all'interno del campo visivo, e quello causato da elementi che si trovano al di fuori di esso. Per quanto riguarda il primo tipo di abbagliamento, il metodo comunemente utilizzato, l'UGR, potrebbe essere applicabile anche per i LED. Per quanto riguarda il secondo tipo di abbagliamento,

esso è invece legato alla sensazione di discomfort visivo nella situazione in cui i soggetti si trovano direttamente sotto un apparecchio e guardano diritto davanti a loro. Questo tipo di abbagliamento aumenta all'aumentare della luminanza e delle dimensioni della sorgente, e diminuisce all'aumentare dell'illuminamento medio dell'ambiente. Poiché non esiste un metodo di valutazione per questo secondo tipo di abbagliamento, è necessario codificare un sistema unico per valutare l'abbagliamento in relazione ai sistemi di illuminazione LED, prendendo in considerazione tutte le variabili, comprese la luminanza e l'intensità luminosa.

*Resa cromatica.* La letteratura sull'argomento è concorde nell'affermare che l'IRC non è generalmente applicabile per prevedere la resa cromatica di sorgenti LED bianche e che il suo utilizzo può causare grossolani errori di valutazione per quanto riguarda la resa delle tonalità del rosso. Per questo motivo è necessario trovare un nuovo sistema di valutazione della resa cromatica adatto per i LED: il TC 1-69 della CIE si sta attualmente occupando di questo.

*Sfarfallamento ed effetto stroboscopico.* I driver LED, e in particolare modo quelli a corrente alternata, possono produrre sfarfallamento (flickering) come conseguenza della variazione nel tempo del flusso emesso: la percezione di tale fenomeno dipende da molti parametri, anche se i principali sono la frequenza e l'entità della variazione. Nel 2000 la IESNA ha fornito due metodi di valutazione dello sfarfallamento, uno tramite percentuale e l'altro tramite un indice, ma entrambi i metodi di calcolo non considerano tutti i parametri. Il dimming può inoltre accentuare la percezione dello sfarfallamento: per risolvere il problema nel 2010 l'IES ha raccomandato una frequenza di output del driver di minimo 120Hz, ma questa limitazione non basta da sola a garantire la qualità dell'illuminazione. Oltre allo sfarfallamento, i LED possono creare anche effetti stroboscopici, ossia effetti per cui oggetti in movimento sembrano muoversi a scatti piuttosto che in modo continuo. Poiché non sono attualmente disponibili per i LED metodi di valutazione per nessuno dei due problemi, sarà necessario provvedere a codificarli.

*Aspetto dell'ambiente e dei volti.* La forte direzionalità dei LED, che permette di dirigere il fascio luminoso esattamente sul piano di lavoro senza diffondere la luce al contorno e che è solitamente considerata un punto di forza, diviene un elemento di debolezza nel momento in cui si generano eccessivi contrasti di luminanza tra piani di lavoro e piani non illuminati (generalmente quelli verticali), per cui si generano forti contrasti all'interno del campo visivo, alterando la percezione dello spazio. Sebbene già nel 2004 la IESNA abbia stabilito un limite di illuminamento di 50lux sui piani verticali all'interno degli uffici, questa norma non è sufficiente a garantire la qualità dell'aspetto di uno spazio. Per una valutazione positiva dell'aspetto di un ambiente è importante considerare la fascia orizzontale di 40° attorno all'orizzontale e la luminanza del soffitto. A corollario del problema della percezione dello spazio e degli oggetti, si pone la questione del riconoscimento dei volti e della comunicazione facciale, compiti che implicano che i piani verticali



all'interno di un ambiente siano sufficientemente illuminati, e che l'illuminazione non sia né troppo diretta né troppo diffusa. Se per la valutazione della percezione dell'ambiente esistono e sono validi dei metodi di valutazione, per la resa dei volti è necessario introdurre un nuovo parametro, o revisionare i quelli esistenti.

*Stabilità del colore.* I LED nascono con lunghezza d'onda di picco variabile a causa dei processi produttivi e possono ulteriormente variarla quando sono dimmerati. Nel 2004 Narendran ha proposto delle differenze di colore massime, stabilendo che differenze maggiori sono visibili a oltre il 10% delle persone e quindi inaccettabili:

- un'ellisse di MacAdam a 2 step per le applicazioni dove i LED sono posizionati affiancati e direttamente alla vista o dove questi apparecchi servono per illuminare una scena bianca.
- un'ellisse di MacAdam a 4 step per le applicazioni dove i LED non sono direttamente visibili o dove si devono illuminare scene complesse e colorate.

Per quanto riguarda questo problema, il metodo appena esposto può essere considerato valido ed applicabile.

#### **4. Conclusioni**

Molte caratteristiche dei LED costituiscono elementi di novità rispetto alle sorgenti luminose tradizionali e perciò pongono limitazioni all'applicabilità dei metodi di valutazione dell'illuminazione tradizionalmente impiegati per lampade a incandescenza o fluorescenti. I metodi di valutazione dell'illuminazione LED, ancora in fase di studio, si basano solo in parte su quanto stabilito in precedenza per le sorgenti tradizionali, lasciando ampio spazio alla codificazione di nuovi criteri riguardanti specifici aspetti e parametri.

## Bibliografia

*Nota: Nel corso dell'ultimo anno i LED hanno acquisito una fetta rilevante del mercato dell'illuminazione e il loro sviluppo, ormai, è legato più ai settori R&D delle grandi ditte che li producono piuttosto che alla ricerca accademica, che si focalizza su aspetti particolari della questione.*

- [1] G. Held, Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications, CRC Press, Broken Sound Parkway (NW), 2009
- [2] E. F. Schubert, Light Emitting Diodes, II Edition, Cambridge University Press, Cambridge (UK), 2006
- [3] G. Forcolini, Illuminazione LED, Hoepli, Milano 2008
- [4] D. Scullino, Il LED e l'illuminazione, Sandit, Albino (BG) 2009
- [5] American National Standard 2008 Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products (ANSI C78.377) URL <http://www.nema.org/stds/ANSIANSLG-C78-377.cfm/>
- [6] Lighting Research Center ASSIST Recommends Publications 1 URL <http://www.lrc.rpi.edu/>
- [7] The Illuminating Engineering Society of North America URL <http://www.iesna.org/>
- [8] American National Standard 2008 Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products (ANSI C78.377) URL <http://www.nema.org/stds/ANSIANSLG-C78-377.cfm/>
- [9] American National Standard Specifications for the Chromaticity of Fluorescent Lamps (ANSI C78.376) URL <http://www.nema.org/stds/c78-376.cfm/> (30 March 2008)
- [10] D. S. Mehta, K. Saxena, S. K. Dubey, C. Shakher, Coherence characteristics of light-emitting diodes, Journal of Luminescence 130 (2010) 96–102
- [11] J.-M. Kang, J.-W. Kim, J.-H. Choi, D.-H. Kim, H.-K. Kwon, Life-time estimation of high-power blue light-emitting diode chips, Microelectronics Reliability 49 (2009) 1231–1235
- [12] Y.-C. Chang, C.-J. O, Y.-S. Tsai, F.-S. Juang, Nonspherical LED Packaging Lens for Uniformity Improvement, Optical Review Vol. 16, No. 3 (2009) 323–325

- [13] [C.T. Pan, M.F. Chen, P.J. Cheng, Y.M. Hwang, S.D. Tseng, J.C. Huang, Fabrication of gapless dual-curvature microlens as a diffuser for a LED package, *Sensors and Actuators A* 150 (2009) 156–167
- [14] E. M. Guttsait, analysis of the Illuminance Provided by LED Modules Placed at Large Distances from Illuminated Objects, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, Vol. 54, No. 1, pp. 107–118
- [15] G. Luoni, Lampade a LED e normative, Sandit, Albino (BG) 2009
- [16] sito del programma Energy Star: [www.ssl.energy.gov/energy\\_star.html](http://www.ssl.energy.gov/energy_star.html)
- [17] N. Yeh, J.-P. Chung, High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 2175–2180
- [18] E. M. Guttsait, analysis of the Illuminance Provided by LED Modules Placed at Large Distances from Illuminated Objects, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, Vol. 54, No. 1, pp. 107–118.
- [19] D. S. Mehta, K. Saxena , S. K. Dubey, C. Shakher, Coherence characteristics of light-emitting diodes, *Journal of Luminescence* 130 (2010) 96–102
- [20] Lianqiao Yang, Jianzheng Hu, Moo Whan Shin, Degradation of high power LEDs at dynamic working conditions, *Solid-State Electronics* 53 (2009) 567–570
- [21] M.S. Wu, H.H. Huang, B.J. Huang\*, C.W. Tang, C.W. Cheng, Economic feasibility of solar-powered led roadway lighting, *Renewable Energy* 34 (2009) 1934–1938
- [22] C.T. Pan, M.F. Chen, P.J. Cheng, Y.M. Hwang, S.D. Tseng, J.C. Huang, Fabrication of gapless dual-curvature microlens as a diffuser for a LED package, *Sensors and Actuators A* 150 (2009) 156–167
- [23] N. Yeh, J.-P. Chung, High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 2175–2180
- [24] J.-M. Kang, J.-W. Kim, J.-H. Choi, D.-H. Kim, H.-K. Kwon, Life-time estimation of high-power blue light-emitting diode chips, *Microelectronics Reliability* 49 (2009) 1231–1235
- [25] JIN Peng, WANG Yi-feng, ZHOU Qi-feng, John Rooymans, and YU Chun-yu, Luminous efficacy of white LED in the mesopic vision state, *Optoelectronics Letters*, 5 (2009) No.4, pp.269-271
- [26] Y.-C. Chang, C.-J. O, Y.-S. Tsai, F.-S. Juang, Nonspherical LED Packaging Lens for Uniformity Improvement, *Optical Review* Vol. 16, No. 3 (2009) 323–325
- [27] B.-J. Huang, C.-W. Tang, M.-S. Wu, System dynamics model of high-power LED luminaire, *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 609–616

- [28] B.-J. Huang, C.-W. Tang, Thermal–electrical–luminous model of multi-chip polychromatic LED luminaire, *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 3366–3373
- [29] F. Mirand, (2010) Navigating uncharted waters: new challenges in specifying LED luminaire lifetime, *LED Magazine* maggio/giugno 2010; pp: 25-30
- [30] I. Cohen, (2010) Efficient LED planar lighting begins at the light source, *LED Magazine* maggio/giugno 2010, pp. 47-49
- [31] M. Wright, (2010) Debate continues over the impact of light at night on human health, *LED Magazine* luglio/agosto 2010, pp. 25-26
- [32] A. Scheiber, J. Daly, (2010) Well-designed LED drivers are no longer the weakest link in the chain, *LED Magazine* luglio/agosto 2010, pp. 47-50
- [33] J. Lewin, (2010) Accurate third-party testing improves consumer confidence in Energy Star Program, *LED Magazine* luglio/agosto 2010, pp. 53-56
- [34] T. Whitaker, (2010) Search continues for replacement for Color Rendering Index, *LED Magazine* marzo/aprile 2010, pp. 59
- [35] M. Wright, (2010) Adaptive controls add to LED efficiency, *LED Magazine* luglio/agosto 2010, pp. 61-62
- [36] L. Muth, (2010) SMT assembly process requirements dictate choice of interconnects for LED-based PCBs, *LED Magazine* luglio/agosto 2010, pp. 65-66
- [37] P. Bianco, (2010) Active PFC driver design enables dimmable retrofit lamps, *LED Magazine* luglio/agosto 2010, pp. 69-75
- [38] G. Mao, M. Miles, (2010) LED driver lifetime and reliability hold the key to success in LED lighting projects, *LED Magazine* settembre/ottobre 2010, pp. 33-37
- [39] M. Wright, (2010) SSL luminaires must deliver reliable beam patterns in outdoor applications, *LED Magazine* settembre/ottobre 2010, pp. 45-50
- [40] K. Dong Lee, R. Sjodin, T. Eriksson, (2010) Nano-patterning boosts LED efficiency, *LED Magazine* settembre/ottobre 2010, pp. 51-54
- [41] P. Havens, J. Colby, T. To, (2010) Circuit-protection devices guard against electrical transient, *LED Magazine* settembre/ottobre 2010, pp. 61-66
- [42] P. Keebler, (2010) Compatibility and reliability are key factors in the design of LED lighting devices and systems, *LED Magazine* settembre/ottobre 2010, pp. 69-70
- [43] X. Jin, A. Peker, (2010) System-level approach yields optimized LED backlight design, *LED Magazine* settembre/ottobre 2010, pp. 73

- [44] F. Wunderlich, D. Wee, O. Vogler, (2010) LED lighting at the crossroads: country road or expressway?, *LED Magazine* novembre/dicembre 2010, pp. 31-34
- [45] S. Wong, (2010) A revolutionary design in LED heat sinks, *LED Magazine* novembre/dicembre 2010, pp. 41-44
- [46] J. Jiao, (2010) Non-directional luminaires require new testing procedures for LED light engines, *LED Magazine* novembre/dicembre 2010, pp. 47-48
- [47] T. Blewitt, (2010) LED product safety standard requires ongoing updates, *LED Magazine* novembre/dicembre 2010, pp. 51-52
- [48] M. Wright, (2010) Network layers pave the way to adaptive lighting controls, *LED Magazine* novembre/dicembre 2010, pp. 55-57
- [49] B. Chemel, (2010) Intelligent lighting systems drive radical energy-efficiency gains, *LED Magazine* novembre/dicembre 2010, pp. 59-61
- [50] J. Eichenholz, M. Snickers, D. Schulmerich, (2010) Miniature spectrometers address challenges of LED research and production, *LED Magazine* novembre/dicembre 2010, pp. 63-64
- [51] K. Chittim, D. Leighty, (2010) Merger of measurement companies brings integrating-sphere expertise under one roof, *LED Magazine* novembre/dicembre 2010, pp. 67-68
- [52] S. Roberts, (2010) Thermal protection in LED driver circuits boosts reliability, *LED Magazine* novembre/dicembre 2010, pp. 71-73
- [53] P. Keebler, (2010) System compatibility testing improves reliability of LED lighting devices and systems, *LED Magazine* novembre/dicembre 2010, pp. 75-78
- [54] J. Bocan, (2010) Seven drivers for outdoor LEDs, *LED Magazine* novembre/dicembre 2010, pp. 80
- [55] R. Gelten, (2010) Application requirements dictate best choice for outdoor-lighting technology, *LED Magazine* febbraio 2010, pp. 17-23
- [56] T. Whitaker, (2011) Sapphire wafer supply and demand remain in the balance, *LED Magazine* febbraio 2011, pp. 25-27
- [57] E. Virey, P. Roussel, P. Doe, T. Pearsall, (2011) HB-LED manufacturing technology looks on track to meet cost demands of general lighting market, *LED Magazine* febbraio 2011, pp. 29-31
- [58] T. Whitaker, (2011) LED phosphor suppliers are affected by China's rare-earth export quotas, *LED Magazine* febbraio 2011, pp. 35
- [59] J. Jiao, (2011) TM-21 seeks methods for lumen-maintenance prediction, *LED Magazine* febbraio 2011, pp. 37-39

- [60] M. Wright, (2011) Wireless networks enable city-wide control of LED street-light installations, *LED Magazine* febbraio 2011, pp. 41-45
- [61] M. Reynolds, (2011) High LED drive currents with low stack voltages create efficiency challenges, *LED Magazine* febbraio 2011, pp. 53-59
- [62] C. Israel, (2011) LED lighting begins to mature but must overcome early SSL problems, *LED Magazine* febbraio 2011, pp. 64
- [63] T. Whitaker, (2011) Backlighting applications drove massive 93% jump in HB-LED market during 2010, *LED Magazine* marzo 2011, pp. 15-16
- [64] M. Wright, (2011) SIL presentations chart LED advancements and application evolution, *LED Magazine* marzo 2011, pp. 19-25
- [65] M. Wright, (2011) DOE workshop covers SSL case studies and technology development, *LED Magazine* marzo 2011, pp. 29-33
- [66] T. Geist, (2011) Field trials collect performance data for LED outdoor-area lighting, *LED Magazine* marzo 2011, pp. 35-39
- [67] H.-O. Schlothauer, (2011) LED chill out with heat sinks molded from conductive compounds, *LED Magazine* marzo 2011, pp. 41-43
- [68] W. Schogler, M. Luidolt, M. Pauritsch, (2011) LED drivers for 3D-TV backlights require extreme accuracy, *LED Magazine* marzo 2011, pp. 47-51
- [69] T. Whitaker, (2011) LEDs promote health in plants and humans, *LED Magazine* aprile/maggio 2011, pp. 4
- [70] T. Whitaker, (2011) SIL 2011: Progress continues but challenges still remain for LED lighting, *LED Magazine* aprile/maggio 2011, pp. 33-36
- [71] M. Wright, (2011) SIL 2011: Lighting track spans color science, dimming, modules and retrofit lamps, *LED Magazine* aprile/maggio 2011, pp. 39-43
- [72] A. Wang, (2011) High-voltage LEDs offer optimum solution for indoor retrofit lamps, *LED Magazine* aprile/maggio 2011, pp. 47-49
- [73] M. Wright, (2011) Precise LED wavelenghts spur plant growth, *LED Magazine* aprile/maggio 2011, pp. 51-55
- [74] M. Sallee, (2011) Navigating the Energy Star maxe for maximum market success, *LED Magazine* aprile/maggio 2011, pp. 61-62
- [75] E. Dikel, J. Veitch, (2011) NRC-IRC imagines the future of solid-state lighting in offices, *LED Magazine* aprile/maggio 2011, pp. 65-67

- [76] J. Jiao, (2011) LED safety standard UL 8750 requires further clarification, *LED Magazine* aprile/maggio 2011, pp. 69-70
- [77] P. Walker, (2011) Manufacturing software is key as LED production volumes grow, *LED Magazine* aprile/maggio 2011, pp. 71-72
- [78] P. Keebler, (2011) Compatibility Part 5: who shares the responsibility for compatibility and reliability testing?, *LED Magazine* aprile/maggio 2011, pp. 79-80
- [79] D. Cooper, (2011) Designing reliable LED power supplies requires careful attention to detail, *LED Magazine* aprile/maggio 2011, pp. 83-86
- [80] P. Jessup, (2011) Field trials of LED outdoor lighting demonstrate benefits to potential adopters, *LED Magazine* giugno 2011, pp. 27-28
- [81] T. Uhrmann, T. Matthias, (2011) LED industry requires versatile equipment to suit different needs, *LED Magazine* giugno 2011, pp. 31-33
- [82] T. Schielke, (2011) Interchangeable lenses allow for differentiated light distribution in architectural lighting, *LED Magazine* giugno 2011, pp. 34-38
- [83] D. Cooper, (2011) LED lighting must work with legacy dimming technologies, *LED Magazine* giugno 2011, pp. 47-50
- [84] R. Ahearn, (2011) Active cooling can boost lumen output in LED lighting, *LED Magazine* giugno 2011, pp. 53-54
- [85] M. Wright, (2011) Raleigh LED lighting projects demonstrate durability and savings, *LED Magazine* giugno 2011, pp. 55-59
- [86] B. Brents, D. Neal, (2011) Coordinated circuit protection enhances AC-LED luminaires and lamps, *LED Magazine* giugno 2011, pp. 65-67