

ILLUMINAZIONE STRADALE A LED – 1^ PARTE

Da diverso tempo ormai si sente parlare dei “miracolosi” apparecchi di illuminazione a LED, capaci di garantire enormi risparmi e bassissima manutenzione; nella pratica però (vedi il disastroso esempio di Torraca) questi apparecchi spesso si sono dimostrati tutt’altro che efficienti.

Nonostante molti professionisti abbiano posto il problema con estrema serietà e correttezza, ancora oggi diversi produttori cercano di “fare i furbi” raccontando mezze verità, sperando che gli interlocutori non siano ferrati sull’argomento. Ad aggravare la situazione concorrono diversi organi di stampa, interessati più all’aspetto sensazionistico che produce questa nuova tecnologia anziché valutare il risultato pratico di queste applicazioni.

Per questo motivo mi sono sentito in obbligo (da addetto ai lavori quale sono) di approfondire le problematiche inerenti l’illuminazione stradale a LED: si parte dalla spiegazione di cos’è un LED fino ad arrivare alle simulazioni vere e proprie, per dimostrare come ad oggi un apparecchio a LED può al massimo sostituire un apparecchio che monta lampade al sodio alta pressione di medesima potenza.

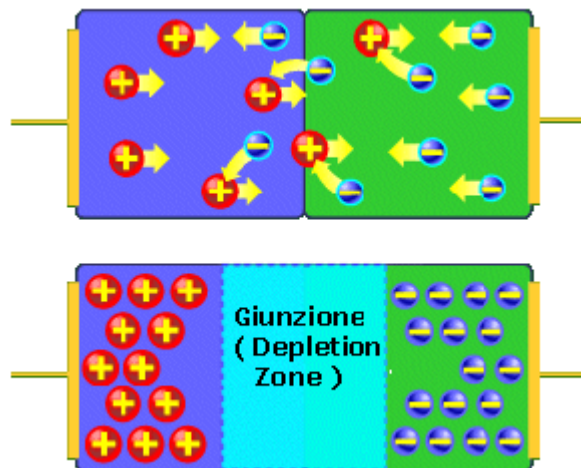
Visto che sono stato accusato di essere contro “*per principio*” con questo articolo mi rivolgo a chi veramente vuole conoscere i numeri: si presenta pertanto come una riedizione dell’articolo apparso l’anno scorso ma con una maggiore attenzione ai dati e agli aspetti tecnici.

1. La tecnologia LED

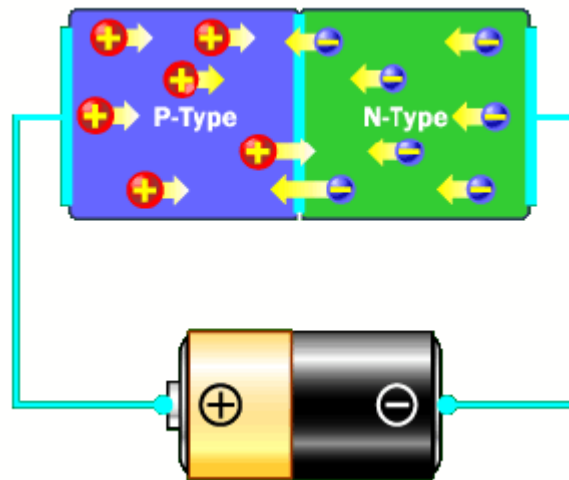
LED è l’acronimo di *Light Emitting Diode* (diodo ad emissione luminosa) ed è stato sviluppato nel 1962 da Nick Holonyak Jr. Un diodo è il più semplice tipo di semiconduttore esistente: senza entrare troppo nello specifico, un semiconduttore è un materiale capace di far passare o meno elettricità in base alle caratteristiche del materiale da cui è composto.

Il LED è un semiconduttore creato da materiale poco conduttore (generalmente un composto di alluminio-gallium-arsenide), in seguito modificato (“dopato” nel gergo elettronico) per cambiare il bilanciamento interno tra le cariche positive e negative (da cui dipende la conduttività). La regione con cariche positive aggiunte è detta *P-region* mentre quella con cariche negative (costituite da elettroni) è detta *N-region*.

Quando nel diodo (o chip) non è applicato alcun voltaggio, gli elettroni di carica negativa trovano e riempiono i buchi (con carica positiva) nella zona di contatto, formando una giunzione detta anche *depletion zone*. In questa giunzione, tutti i buchi risultano riempiti e quindi formano una specie di barriera isolante in cui nessuna carica può circolare da una regione all’altra.

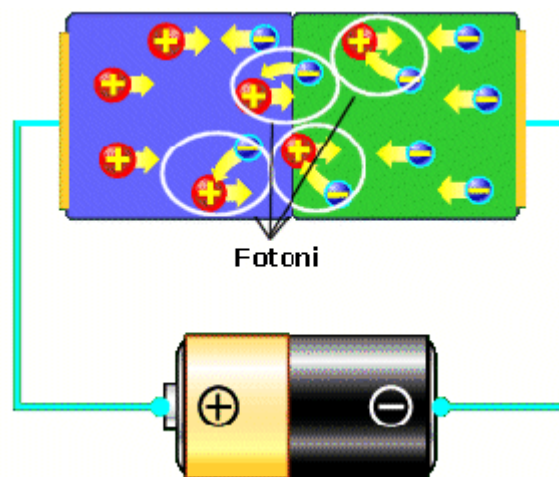


Per eliminare la giunzione, bisogna far sì che le cariche negative passino dalla regione N alla regione P e le cariche positive facciano l'inverso, connettendo ad esempio una batteria che, aumentando il potenziale elettrico, faccia muovere le cariche.



Per capire cosa siano le cariche positive e negative di cui ho parlato sopra e di come queste possano produrre luce, occorre fare una breve digressione sull'atomo: la maggioranza degli atomi è composta da un nucleo (di protoni e neutroni) attorno al quale si posizionano "nuvole" (orbitali più precisamente) di elettroni; su ogni orbitale, per il principio di esclusione di Pauli, si possono posizionare solo 2 elettroni. Generalmente un atomo ha un perfetto bilanciamento fra cariche positive e cariche negative.

Quando il materiale da cui è composto il semiconduttore viene drogato, uno degli elettroni degli orbitali più esterni viene a mancare, in maniera da creare una "lacuna" (e quindi anziché neutro ora diviene positivo). L'atomo "drogato" è più instabile (e quindi ha maggiore energia); quando un elettrone riempie la "lacuna" l'atomo ridiventa stabile (e quindi a minore energia): il surplus di energia viene liberato sotto forma di fotone (cioè un pacchetto di energia che rappresenta la singola unità di luce).



In pratica un LED trasforma l'energia elettrica in energia luminosa (e viceversa).

Per quanto possa essere difficile comprendere il funzionamento del LED dal punto di vista fisico, questa descrizione è fondamentale per capire i pregi e (soprattutto) i difetti di questa tecnologia: ad esempio il superamento forzato della "barriera" neutra costituita dalla giunzione comporta un

notevole surriscaldamento di questa zona (è una specie di “resistenza” all’interno del semiconduttore) e pertanto la “temperatura di giunzione” rappresenta un parametro fondamentale per la corretta gestione del LED.

I grandi produttori hanno dichiarato che nei prossimi anni investiranno gran parte dei loro capitali nello sviluppo delle apparecchiature a LED. Questa tecnologia rappresenta sicuramente il futuro dell’illuminazione in quanto garantisce numerosi vantaggi:

- diminuzione della quantità di “materia” utilizzata per la loro produzione; rispetto ai prodotti tradizionali comporta quindi una riduzione degli ingombri e dei pesi, determinando una agevolazione nell’approvvigionamento, stoccaggio e trasporto dei materiali e nella produzione industriale
- ridotto contenuto di sostanze tossiche o nocive; le parti componenti dei LED sono facilmente disaggregabili, smaltibili e riciclabili (allo stesso livello dei normali diodi che si utilizzano in elettronica)
- ridotta emissione di raggi UV ed IR
- lunga durata della vita media
- tecnologia in costante evoluzione

Allo stato attuale esistono già buoni apparecchi di illuminazione a LED per gli ambiti ciclo-pedonali, illuminazione d’accento ed illuminazione artistica e di parchi.

Per quanto riguarda invece l’illuminazione stradale occorre sottolineare che questo è un ambito estremamente tecnico e richiede apparecchi molto performanti: il LED è una luce essenzialmente “direzionale” e pertanto presenta generalmente un fascio concentrato di luce molto forte. Questa luce va quindi distribuita attraverso ottiche per garantire la giusta uniformità sulla sede stradale e ridurre l’abbagliamento che tali sorgenti potrebbero provocare: in questo modo si riduce notevolmente l’efficienza luminosa degli apparecchi a LED.

Ad oggi pertanto gli apparecchi a LED non riescono ad essere così performanti come i tradizionali apparecchi al sodio, come verrà indicato nei paragrafi seguenti. Questo non significa che i LED non saranno mai così performanti come le lampade tradizionali: la tecnologia a LED si sta sviluppando in maniera incredibile (basti pensare che neanche 5 anni fa a stento si arrivava ai 50 lm/W) e per questo motivo è molto probabile che nei prossimi 10 anni gli apparecchi stradali con questa tecnologia sorpassino come prestazioni gli apparecchi tradizionali.

Questo articolo va pertanto letto unicamente alla luce dello stato attuale della tecnologia a LED e non come negazione assoluta dell’applicazione di tale tecnologia all’illuminazione pubblica.

2. Caratteristiche dei LED

La lampada è una componente fondamentale di un apparecchio luminoso; per questo motivo occorre conoscere a fondo i parametri principali su cui basare le valutazioni delle lampade LED utilizzate.

Nell’illuminazione stradale generalmente oggi vengono utilizzati i cosiddetti “LED di potenza” (*Power LED* in inglese); la relazione seguente si basa quindi prevalentemente su questa tipologia di diodi LED (pur potendo essere estesa facilmente ad altre tipologie, come quelle multichip ad esempio).

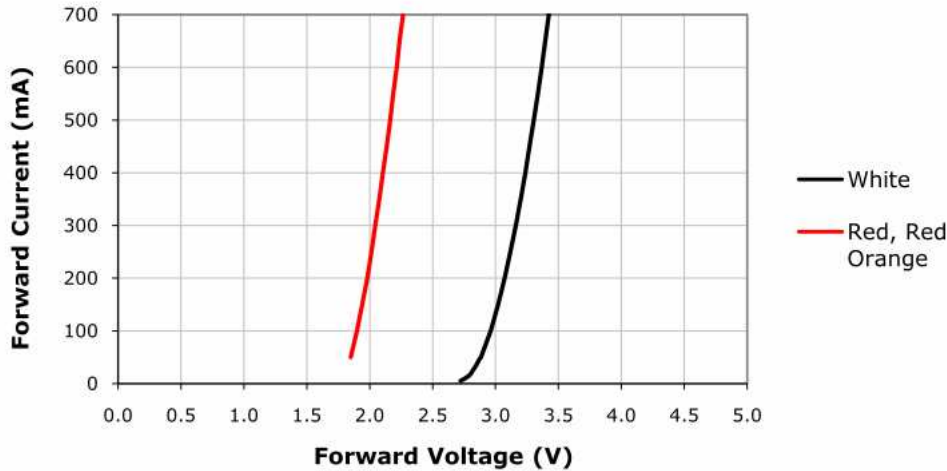
2.1 Corrente di pilotaggio

I LED vengono pilotati con una corrente costante, per mantenere uniformi i valori di luminosità e temperatura colore; la corrente di pilotaggio ha infatti una diretta correlazione con diversi parametri, come il flusso luminoso emesso e la tensione all’interno del diodo (a livello intuitivo questo lo si

può comprendere pensando che ad un aumento del potenziale elettrico corrisponde un aumento di particelle cariche spostate e quindi ad un aumento di fotoni emessi).

Per i LED di potenza le correnti possono variare da 100 mA a 1500 mA, con un valore tipico di 350 mA. Per valutare la potenza di funzionamento del singolo diodo occorre quindi moltiplicare la corrente per la tensione applicata, secondo la legge di Ohm: $P = V * I$.

La tensione applicata varia in base alla corrente secondo un grafico come quello seguente:



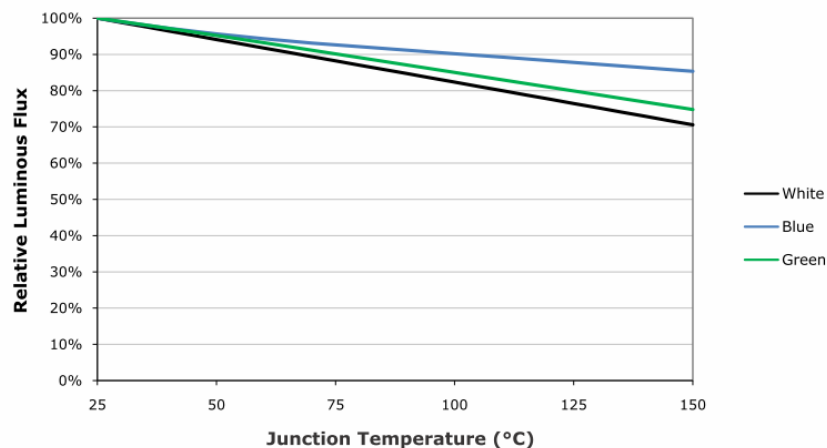
In questo caso si può vedere ad esempio come ad una corrente di 350 mA corrisponda un voltaggio di 3,2 V per un LED bianco e quindi una potenza assorbita di 1,12 W; per una corrente di 700 mA corrisponde un voltaggio di 3,4 V e quindi una potenza assorbita di 2,38 W. In realtà non è quindi vero quello che generalmente si vede stampato nelle caratteristiche delle sorgenti a LED e cioè che ogni singolo diodo assorba 1 W.

2.2 Flusso luminoso

Abbiamo visto che aumentare la corrente di pilotaggio significa aumentare il flusso luminoso emesso da un diodo LED: per questo motivo i produttori indicano il flusso luminoso emesso relativo ad una corrente di riferimento (generalmente pari a 350 mA); inoltre questo flusso è relativo ad una temperatura di giunzione di laboratorio pari a 25°C.

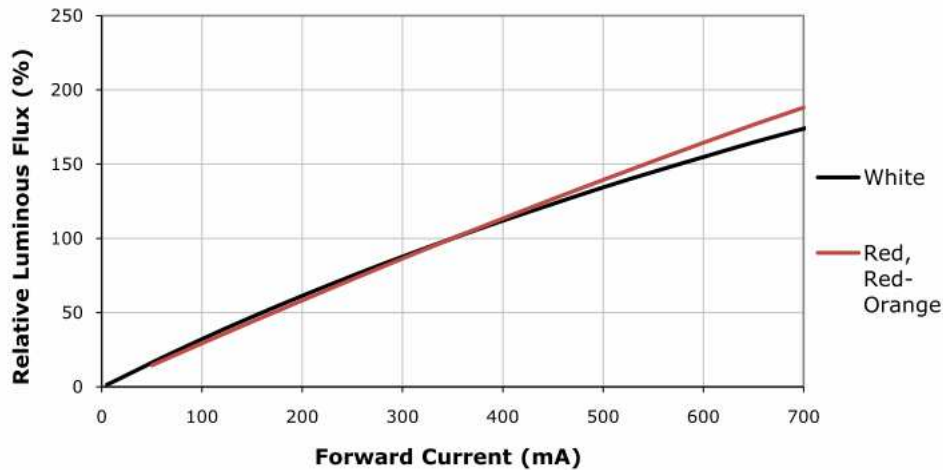
La variazione di temperatura di giunzione (descritta nel paragrafo successivo) e di corrente di pilotaggio comporta una notevole differenza nel flusso emesso.

Ad esempio, per lo stesso diodo LED visto sopra, abbiamo questo rapporto fra flusso emesso e temperatura di giunzione:



Il produttore indica per 350 mA e $T_j=25^\circ\text{C}$ un flusso luminoso pari a 114 lm.
Per temperature di giunzione che si aggirano attorno ai 70°C , vediamo che già il flusso si riduce del 10% circa e quindi si ottiene un flusso di circa 102 lm.

Il rapporto fra corrente di pilotaggio e flusso emesso è invece il seguente:



In questo caso si vede come a 350 mA il flusso rimanga invariato (e quindi, per una temperatura di giunzione $T_j=70^\circ\text{C}$, un flusso di 102 lm); a 700 mA invece abbiamo un aumento del 170% circa (e quindi, sempre per una temperatura di giunzione $T_j=70^\circ\text{C}$, un flusso di 173 lm).

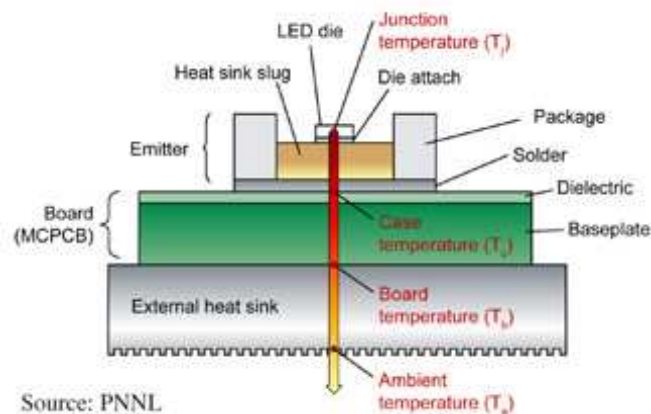
A questo punto siamo quindi in grado di valutare l'efficienza luminosa nei due casi:

- per $I=350\text{mA}$, $T_j=70^\circ\text{C}$, abbiamo $\eta=91\text{ lm/W}$
- per $I=700\text{mA}$, $T_j=70^\circ\text{C}$, abbiamo $\eta=73\text{ lm/W}$

Per questo motivo è generalmente controindicato aumentare la corrente di pilotaggio al fine di aumentare il flusso luminoso (poiché alla perdita di efficienza si somma anche una diminuzione dell'aspettativa di vita del diodo LED, come vedremo in seguito).

2.3 Temperatura di giunzione

La temperatura di giunzione (indicata come T_j) risulta essere un parametro fondamentale per determinare il buon funzionamento di un LED.



Con questo termine viene indicata la temperatura della giunzione che costituisce il nucleo del LED; la temperatura massima è determinata dal produttore del dispositivo in modo da porre un limite invalicabile per una vita operativa ragionevole del componente.

Questa temperatura è strettamente collegata al flusso luminoso emesso e alla durata: maggiore è la temperatura, maggiore la riduzione del flusso luminoso e minore la durata della sorgente LED.

Un diodo LED deve pertanto poter resistere alle alte temperature e i dispositivi di dissipazione a corredo devono essere dimensionati con cura.

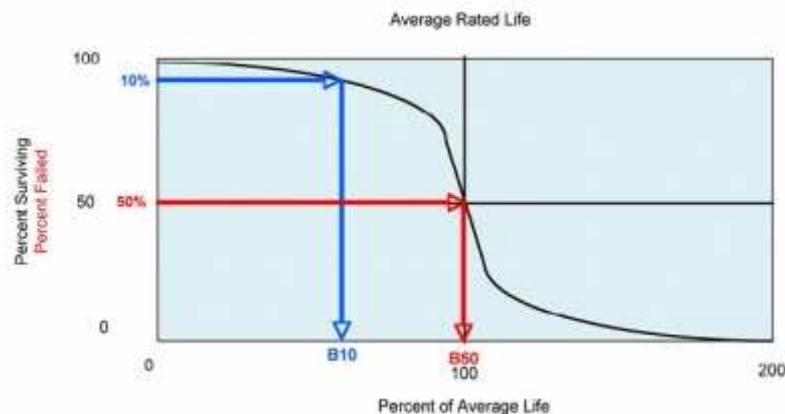
Ad oggi non è possibile misurarla direttamente e le indicazioni dei vari produttori si riferiscono quindi a formule sperimentali che cercano per quanto possibile di riprodurre il comportamento della giunzione; senza entrare troppo nello specifico è facile capire che una misura non diretta può portare facilmente ad errori sperimentali, che si accumulano fino a rendere molto incerto il risultato finale. I dati inoltre si riferiscono a misure fatte in laboratorio, in condizioni al contorno stabili, che non tengono conto delle reali oscillazioni nei valori di temperatura e corrente presenti in un impianto reale.

Un dato di massima per definire la temperatura di giunzione può essere fornito dalla temperatura della piastra su cui il LED è saldato, poiché appare ovvio che la temperatura di giunzione sarà comunque superiore ad essa. Nelle installazioni su strada, in base a queste evidenze sperimentali, si registrano temperature di giunzione costantemente sopra i valori indicati dai produttori.

In definitiva risulta fondamentale l'apparato dissipativo posto a corredo dell'apparecchio di illuminazione: l'indicazione generale è quella di non considerare i dati forniti dal produttore come definitivi e di verificare con attenzione il metodo utilizzato nelle saldature dei diodi e la superficie e il materiale dei dispositivi di dissipazione.

2.4 Vita utile del LED

Per le sorgenti tradizionali storicamente si intende come “vita utile” il lasso di tempo intercorso dall'accensione al momento in cui una certa percentuale di lampade smette di funzionare.



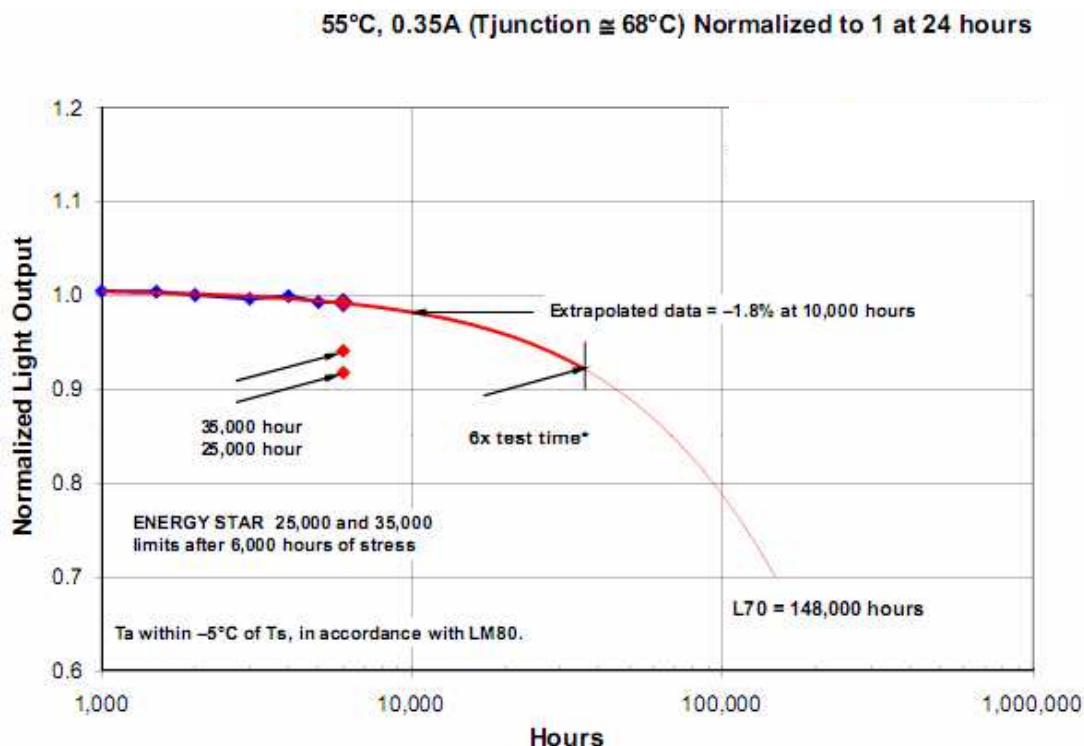
Il parametro di riferimento è generalmente definito da una mortalità del 10% delle sorgenti luminose (indicata dalla sigla B10); una mortalità del 50% definisce invece la cosiddetta “vita media” (indicata dalla sigla B50). Per interpolare questi dati si utilizza la variabile casuale di Weibull (vedi il grafico soprastante), che definisce una curva di sopravvivenza delle sorgenti e che viene normalmente utilizzata in ambito industriale per tutte le applicazioni elettroniche.

Le sorgenti luminose a LED invece non tendono a spegnersi improvvisamente esaurita la loro vita utile: i diodi LED nel tempo diminuiscono gradualmente il loro flusso luminoso iniziale fino ad esaurirsi completamente in un periodo molto lungo (a meno di rotture improvvise ovviamente).

Per questo motivo occorre provvedere con termini di confronto che sono del tutto diversi da quelli utilizzati oggi.

Il parametro più utilizzato nella definizione di vita utile è stato definito da un gruppo industriale produttore di Power LED, la “Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies” (ASSIST), la quale ha determinato che il mantenimento del 70% del flusso iniziale corrisponde al limite inferiore al di sotto del quale l’occhio umano percepisce una riduzione della luce emessa (e quindi si può supporre che una riduzione del flusso iniziale del 30% sia accettabile per la maggioranza delle applicazioni): per questo motivo viene definita come vita utile di un LED il tempo trascorso prima che venga raggiunto questo limite (indicato generalmente come L70 che sta per “lumen maintenance 70”).

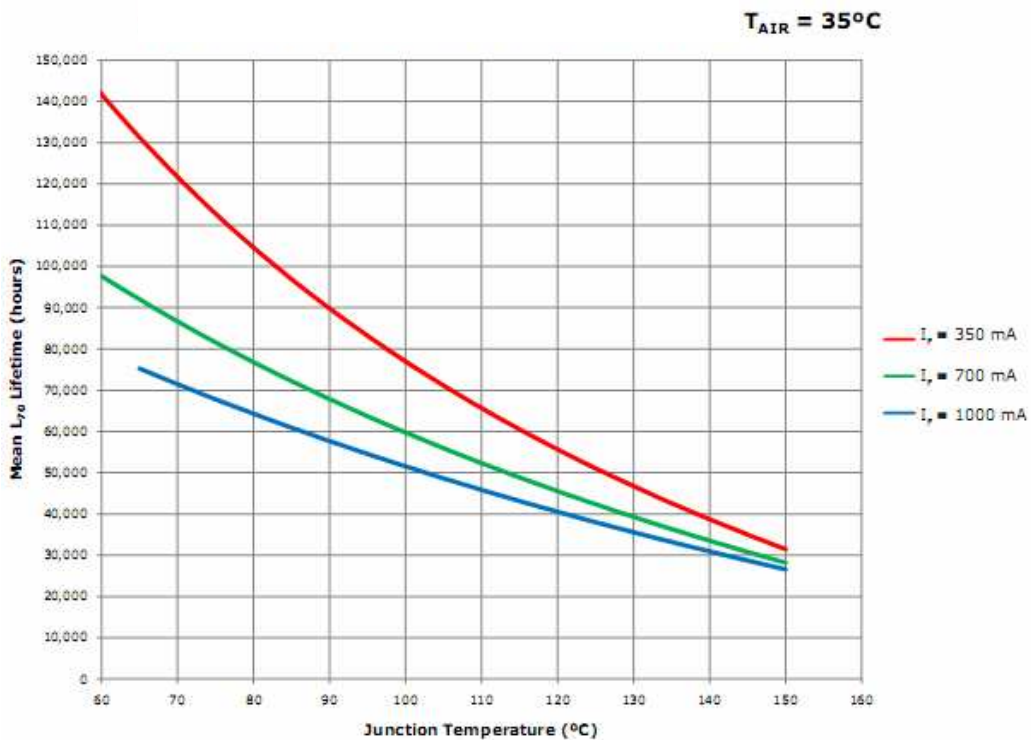
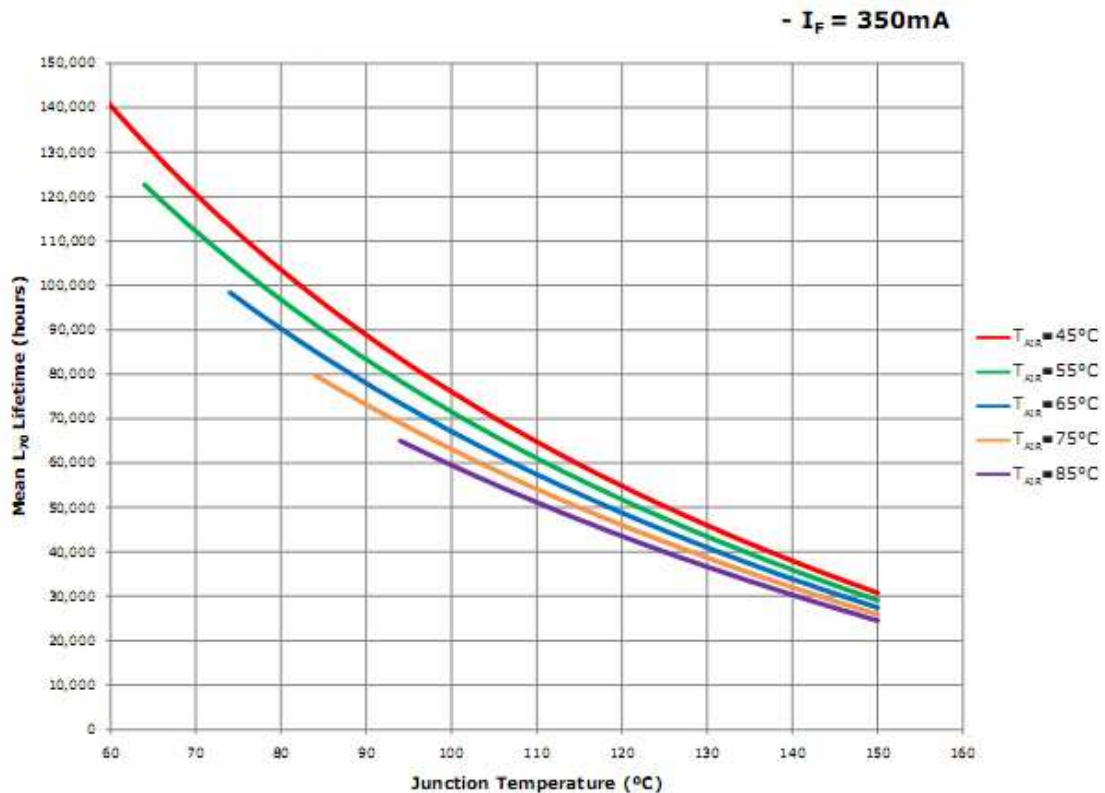
Per definire il mantenimento del flusso luminoso nel tempo esistono diverse metodologie; ad oggi la più usata risulta quella definita dallo standard IES LM-80 “Measuring lumen maintenance of LED light sources”. Il metodo si basa sulla misurazione del flusso luminoso di una sorgente LED pilotata a seconda delle correnti definite dal produttore a tre diverse temperature (55°C, 85°C ed una terza a scelta) e per un periodo di tempo non inferiore a 6000 ore (con misurazioni almeno ogni 1000 ore). Questo test non dà specifiche riguardo all’eventuale previsione di decadimento e quindi di vita utile attesa al di fuori delle ore di prove effettuate: tutto quello che si può fare è fornire quindi un’interpolazione sui dati raccolti, come indicato nel grafico seguente:



In questo caso il produttore ha definito come tempo massimo di interpolazione un tempo pari a 6 volte il tempo realmente impiegato nel test, poiché è risaputo che l’incertezza sperimentale in questo genere di interpolazioni aumenta esponenzialmente con l’aumentare del tempo previsto: questo grafico pertanto è solo un’indicazione di massima, poiché in realtà l’incertezza è estremamente elevata a 150000 h. Se pensiamo ad una media di 4200 ore di funzionamento all’anno significa fare una stima su 35 anni di vita basandosi sul funzionamento di circa 1 anno e mezzo.

Basandosi su queste evidenze sperimentali si può osservare come estremamente importanti ai fini di una buona durata del diodo LED non siano solo la temperatura di giunzione e la corrente di pilotaggio, ma anche la temperatura dell’ambiente circostante e la capacità dissipativa della piastra su cui sono saldati i LED.

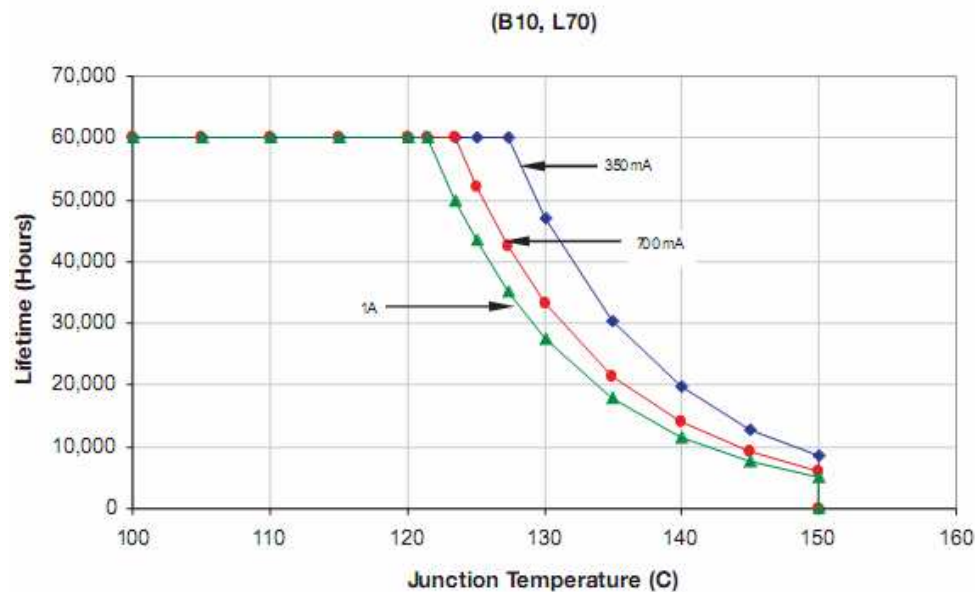
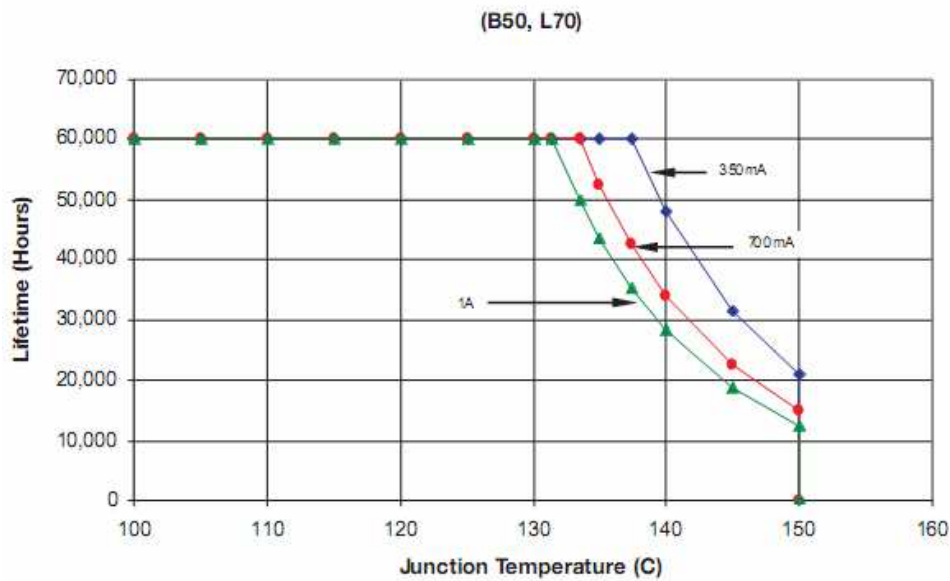
Dai seguenti grafici si può osservare come l'aumento della temperatura di giunzione, della temperatura dell'ambiente circostante o l'aumento della corrente di pilotaggio porti ad una drastica riduzione della vita utile (ovviamente tutti i risultati presentati sono solo estrapolazioni dei dati sperimentali).



Come già detto in precedenza, a livello sperimentale risulta abbastanza complicato definire una durata attesa di oltre 100000 h sulla base di sole 6000 h di funzionamento; inoltre mancano del tutto informazioni relative alla percentuale di sorgenti a LED il cui flusso risulta al di sotto dei risultati attesi, perché se è vero che quasi nessun diodo LED nelle prove sperimentali si spegne improvvisamente, è altrettanto vero che molti di questi presenteranno un flusso luminoso al di sotto delle curve di interpolazione presentate nei grafici sovrastanti.

Per questo motivo appare meritevole l'indicazione di alcuni produttori anche della percentuale di lampade che si attestano su valori di flusso luminoso al di sotto del delta dei valori attesi per la curva considerata (in questo modo tale percentuale di fallimento sostituisce la percentuale di mortalità delle vecchie lampade).

Dai grafici sottostanti si può osservare come passare da una percentuale di fallimento del 50% ad una del 10% comporti una restrizione notevole nei valori di aspettativa di vita utile.



I grafici presentati sono sicuramente più completi, in quanto definiscono due diverse versioni in base alla percentuale di fallimento attesa.

Inoltre è degno di nota il fatto che le curve sono state “tagliate” a 60000 ore di effettivo utilizzo poiché a detta dello stesso produttore, anche in presenza di dati statistici significativi, è opportuno limitare la durata di vita attesa a valori comunque certi (poiché sembra logico prevedere una durata minore e poi eventualmente sbagliarsi che prevederne una maggiore e poi accorgersi che il funzionamento non è quello atteso).

Questa lunga digressione sulla durata della vita ed il mantenimento del flusso risulta fondamentale per definire un corretto coefficiente di manutenzione di un apparecchio di illuminazione a LED.

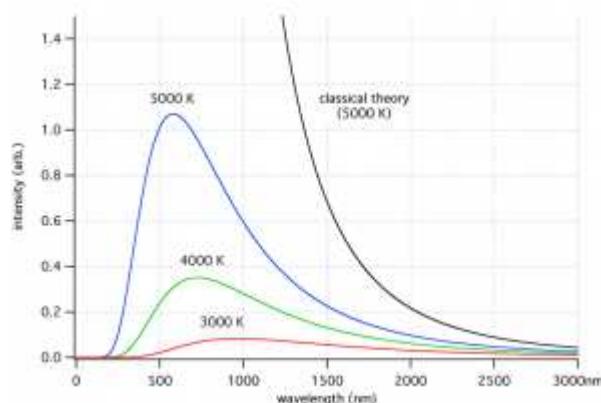
Definito infatti il coefficiente di manutenzione come $U = LLMF \times LSF \times LMF$, abbiamo che il coefficiente LLMF (Lamp Lumen Maintenance Factor) rappresenta il mantenimento del flusso luminoso a fine vita della sorgente luminosa (pari pertanto a 0,70 nel caso di L70), mentre LSF (Lamp Survival Factor) rappresenta la percentuale di sorgenti sopravvissute a fine vita (pari pertanto a 0,90 nel caso di B10; in questo caso la sorgente non si spegne ed ha solo un flusso inferiore a quello stabilito, ma agli effetti del calcolo appare prudente non tenerne conto o comunque pensare alla resa delle sorgenti difettose come pari a metà di quella sana. In questo caso allora per B10 si avrebbe $LSF=0,95$). Il parametro LMF (Luminaire Maintenance Factor) dipende invece dallo sporco accumulatosi sull'apparecchio, dalle condizioni atmosferiche e dall'intervallo di manutenzione; per un'installazione stradale tipica può aggirarsi attorno allo 0,90 – 0,95 con intervalli di manutenzione di 2 – 3 anni.

In base a questi dati risulta che il coefficiente di manutenzione è ben lungi dallo 0,80 utilizzato normalmente nei calcoli illuminotecnici per le applicazioni stradali.

2.5 Temperatura di colore

La temperatura di colore, la cui unità di misura è il grado Kelvin (K), ha come riferimento l'emissione del corpo nero o la curva di Plank; ricordiamo che in fisica un corpo nero è un oggetto che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente (e quindi non ne riflette) ed il cui spettro dipende unicamente dalla sua temperatura.

Lo spettro luminoso emesso da un corpo nero presenta un picco di emissione determinato, in base alla legge di Wien, esclusivamente dalla sua temperatura.



Una sorgente reale, pur essendo abbastanza differente da un corpo nero, conserva questa proprietà e quindi in generale ad una temperatura bassa corrisponde ad un colore giallo-arancio, mentre un'alta temperatura corrisponde ad un colore azzurro.

Una sorgente a LED nasce come sorgente quasi monocromatica, il cui colore dipende dal materiale utilizzato nella sua fabbricazione; per le applicazioni stradali vengono utilizzati semiconduttori InGaN, che hanno spettro luminoso tendente al blu e che ad oggi determinano il massimo flusso luminoso possibile per un diodo LED.

Per ovviare a questo inconveniente e produrre emissioni su tutto lo spettro del visibile si ricorre alla cosiddetta “conversione della luminescenza”; questo metodo consiste nell’applicazione di uno strato di fosfori al diodo in modo da convertire parte della radiazione nelle porzioni di spettro rosso e verde mancante. La resa cromatica in questo caso viene penalizzata per la quasi assenza nello spettro emesso della componente rossa, come indicato nel paragrafo seguente.

Un metodo che produce risultati più soddisfacenti, ma che penalizza purtroppo le prestazioni del LED, è quello di applicare una combinazione di fosfori tricromatici, in modo da convertire tutta la radiazione nella banda del visibile.

In ogni modo la temperatura di colore del bianco prodotto dipende dalla quantità di fosforo usata nel rivestimento: la luce “bianca fredda” (o “cold white”) viene prodotta diminuendo la quantità di fosfori, la luce “bianca calda” (“warm white”) viene prodotta aumentandola.



E’ facile intuire che la massima efficienza luminosa si ottiene applicando la minima quantità di fosfori possibile; in questo caso lo spettro emesso, definito “cold white” per la dominante blu (dai 6500°K circa in su), non appare molto indicato per l’illuminazione esterna per diversi motivi:

- luce emessa fredda e con dominante bluastra
- maggiore senso di abbagliamento
- appiattimento dei contorni
- possibile interferenza con la produzione di melatonina

Per ottenere sorgenti luminose con temperature di colore minori, denominate “natural white” (dai 4000°K circa ai 6000°K circa) o “warm white” (4000°K circa o meno), che determinano una migliore qualità della luce, occorre aumentare la quantità di fosfori applicati: questo fa calare drasticamente le prestazioni delle sorgenti LED e pertanto temperature di luce più calde hanno rese luminose fino al 40% inferiori.

2.6 Costanza del colore

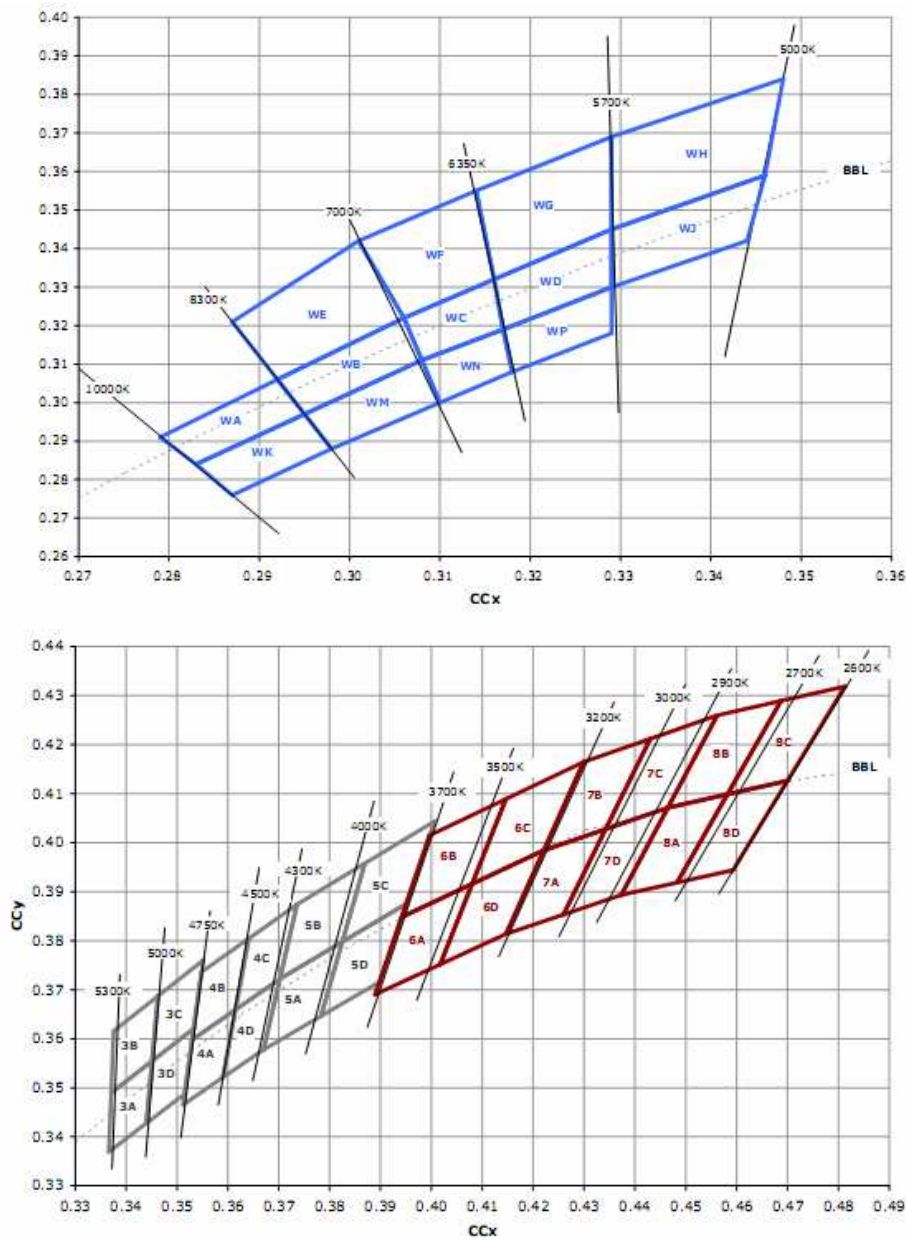
Il procedimento di fabbricazione dei LED e di applicazione dei fosfori è un procedimento delicato e passibile di errori: per questo motivo si è scelto di suddividere le zone di appartenenza cromatica dei vari lotti prodotti in diversi settori (chiamati bin) definiti sul diagramma di cromaticità CIE 1931, sulla base di ellissi di MacAdam più o meno ampie (l’ANSI propone ad esempio un diametro di 4-step). In questo modo anziché cambiare il procedimento di produzione per ogni diversa tipologia di LED è possibile definire a posteriori l’area di omogeneità di colore.

Ovviamente il costo richiesto per diodi LED aumenta tanto più stringente si fa l’area di escursione dei bin.

Per stabilire la temperatura di colore della sorgente a LED si fa riferimento alla temperatura di colore correlata (CCT), costituita dai segmenti isotemperatura che incrociano la curva del luogo plankiano.

Ai fini dell’illuminazione stradale appare importante garantire una certa omogeneità nel colore delle sorgenti a LED, in quanto appare evidente che la forte escursione lungo la scala cromatica potrebbe generare un affaticamento nel compito visivo.

Le tabelle seguenti indicano una possibile suddivisione in bin per LED “cold white” (primo grafico) e “neutral white” e “warm white” (secondo grafico).



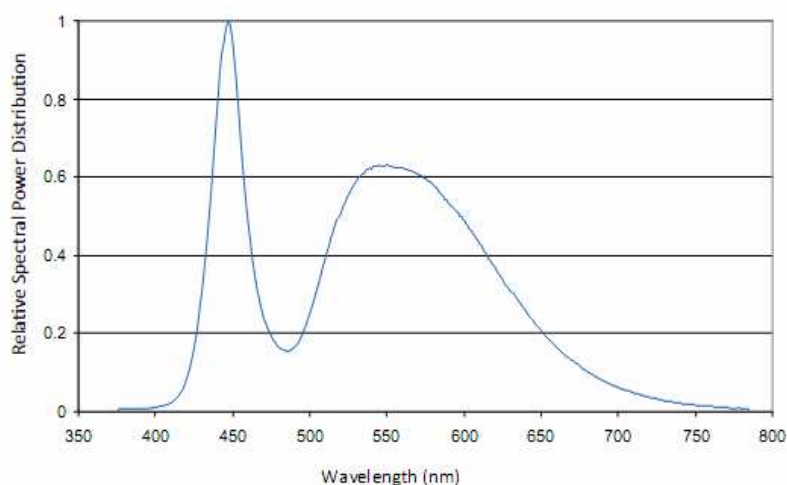
2.7 Indice di Resa cromatica

L'Indice di Resa Cromatica Ra (chiamato in inglese CRI, Color Rendering Index), è una valutazione qualitativa sull'aspetto cromatico degli oggetti illuminati e non va confusa con la temperatura di colore: due sorgenti con temperatura di colore identica possono avere un Ra diverso, come indicato dalla tabella seguente.

Questo parametro indica in che modo una sorgente è in grado di mantenere inalterato il colore di un oggetto da essa illuminato: varia in una scala da 0 a 100, dove 0 rappresenta il minimo e 100 indica il massimo di Resa Cromatica.

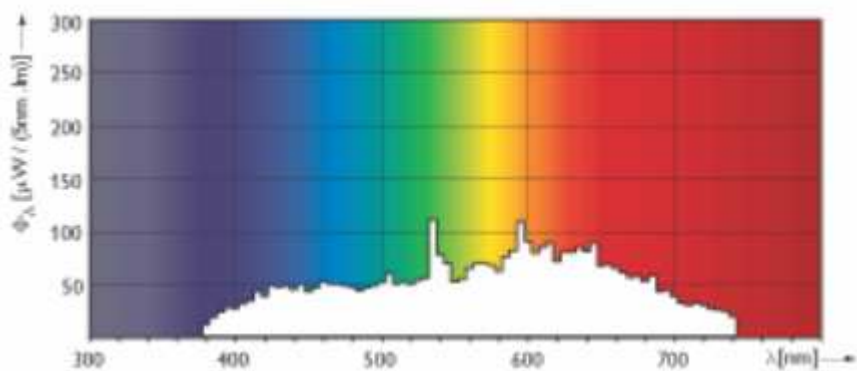
Il metodo, definito dallo standard CIE 13.3-1995, si basa sul calcolo delle differenze che una serie di campioni di colore presenta al variare dell'illuminazione della sorgente di riferimento rispetto a quella in esame: proprio per l'arbitrarietà sulla scelta dei colori presi in considerazione, questo

indice rappresenta un valore abbastanza soggettivo. Può accadere infatti che sorgenti con lo stesso Ra emettano bande di colore molto diverse fra loro, oppure è possibile avere una sorgente con un elevato Ra che non abbia alcuna emissione dello spettro in diverse lunghezze d'onda (come appunto avviene per le sorgenti LED).



La migliore emissione possibile per l'occhio umano dovrebbe corrispondere ad una emissione continua lungo tutto lo spettro, senza picchi o avvallamenti.

Come si può notare dal grafico soprastante, che definisce l'emissione di una tipica sorgente a LED, lo spettro non è continuo, perché presenta un gap enorme sull'emissione del rosso; una lampada a ioduri metallici ad esempio ha uno spettro più continuo e quindi una valenza cromatica sicuramente maggiore, come si può vedere dal grafico sottostante.



Questa intuizione sperimentale viene ribadita dal rapporto CIE 177:2007, nel quale la commissione internazionale per l'illuminazione ha stabilito che il CRI non può essere applicato alle moderne sorgenti bianche a LED. Si può leggere infatti che il parametro di resa cromatica “generalmente non può venire applicato per definire un indice di classificazione di resa cromatica di una serie di sorgenti luminose in cui siano inserite sorgenti bianche a LED” e che “l'applicazione dell'indice di resa cromatica correntemente definito dalla CIE (secondo lo standard del 1995) è notevolmente limitata se riferita alle sorgenti bianche a LED. Infatti è possibile ad esempio che sorgenti storicamente ritenute con CRI elevato possano venire visualmente classificate al di sotto di sorgenti bianche a LED che in realtà avrebbero CRI minore”.

Alla luce di queste evidenze sperimentali risulta necessario riconsiderare l'indice di resa cromatica come parametro di valutazione per le sorgenti LED; in particolar modo si consiglia di seguire le seguenti raccomandazioni:

1. il CRI può essere un parametro da tenere in considerazione se la restituzione fedele dei colori è fondamentale per il compito visivo considerato;
2. il CRI generalmente andrebbe valutato solo tra sorgenti con la medesima temperatura colore;
3. differenze sotto ai 5 punti di valutazione non sono significative per la distinzione di due diverse sorgenti luminose (ad esempio due sorgenti rispettivamente con CRI 80 o CRI 84 sono essenzialmente identiche);
4. occorre valutare sempre la resa degli apparecchi a LED dal vivo e di persona.

3. Valutazioni sull'Indice di Resa Cromatica e la norma UNI 11248

In base alla nuova normativa il progettista illuminotecnico assume un'importanza fondamentale nella corretta valutazione ed individuazione delle soluzioni più opportune per ogni ambito progettuale.

La norma UNI 11248 individua le prestazioni illuminotecniche degli impianti di illuminazione e, per far questo, delinea una categoria illuminotecnica di riferimento per ogni tipologia di strade.

In base all'analisi dei rischi ed ai parametri di influenza considerati dal progettista illuminotecnico, viene quindi definita una categoria illuminotecnica di progetto, grazie alla quale verrà effettuato il progetto di massima per ogni zona di studio presa in considerazione.

Infine, in base al flusso di traffico effettivo presente nelle varie ore della giornata, è possibile definire più categorie illuminotecniche di esercizio su cui effettuare eventuali sconti di categoria.

Poiché le sorgenti a LED generalmente non presentano un'efficienza paragonabile alle sorgenti a scarica, diversi produttori cercano di colmare il divario basandosi sul prospetto 3 della norma UNI 11248, il quale afferma che sorgenti con $Ra > 60$ possono usufruire di uno sconto di categoria nell'analisi dei rischi.

Questi valori però, come cita la norma stessa "sono forniti a titolo informativo", cioè non hanno valore normativo e possono pertanto essere modificati o ampliati in base alle necessità riscontrate dal progettista illuminotecnico. Ogni progetto illuminotecnico rappresenta un caso a sé e quindi risulta impossibile definire "a priori" la possibilità o meno di uno sconto di categoria.

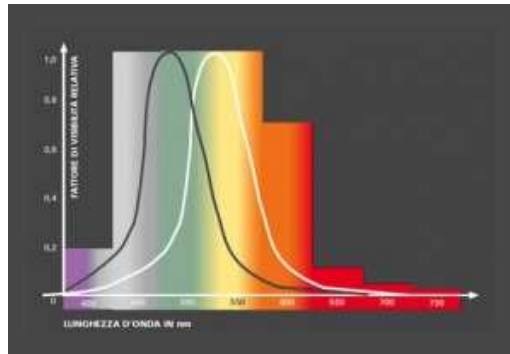
Occorre capire che non è il coefficiente di resa cromatica a definire una migliore visione notturna, ma la luce bianca (che, in via convenzionale, viene ricondotta ad un $Ra > 60$); abbiamo già visto le problematiche insite nella valutazione dell'Indice di Resa Cromatica per una sorgente bianca a LED ed inoltre il "buco" presente attorno ai 500 nm potrebbe non garantire una capacità scotopica paragonabile ad esempio a quella delle sorgente a ioduri metallici (come indicato in seguito).

Negli ultimi anni infatti diverse università ed agenzie di ricerca hanno dimostrato che sorgenti a luce bianca possono comportare un miglioramento delle prestazioni in ambito notturno, ma solo per la visione periferica.

Riguardo a questo ultimo punto appare doveroso un ulteriore approfondimento: è noto che il CIE ha definito due curve di ponderazione, riportate nel disegno sottostante, che misurano l'efficienza visuale a varie lunghezze d'onda nel caso di luminosità diurna (curva bianca – visione fotopica) e notturna (curva nera – visione scotopica).

Dal grafico si può notare come la visione fotopica abbia un picco corrispondente alle lunghezze d'onda di una luce giallo-verde, mentre quella scotopica di una luce azzurra: lo spostamento del

massimo di sensibilità, dovuto all'utilizzo prima dei coni e poi dei bastoncini è denominato effetto Purkinije.



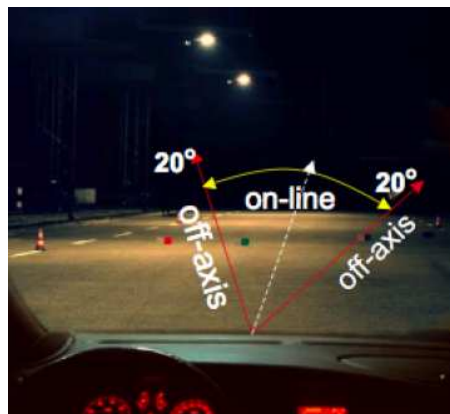
I bastoncini, che funzionano in condizioni di bassa visibilità, vedono meglio il blu di quello che fanno i coni, i quali possono vedere luce profondamente rossa, luce che per i bastoncini appare nera. Lo possiamo sperimentare di persona prendendo due pezzi di carta colorata rossa e blu: in condizioni di buona luminosità, risulta più luminoso il pezzo rosso, passando all'oscurità l'effetto si inverte.

A livello internazionale, è stata scelta la curva fotopica per “mediare” i valori del flusso luminoso uscente dalle singole sorgenti.

Questo però porta a due problemi: il primo è dovuto al fatto che l'illuminazione stradale si colloca in un ambito che non è né fotopico né scotopico e che viene appunto chiamato mesopico (definito generalmente dall'intervallo di luminanza compreso fra 0,001 e 3 cd/mq); il secondo, strettamente legato al primo, è quello che in tale ambito la valenza della curva di ponderazione fotopica non è del tutto esatta e vale solo per angoli di visione estremamente piccoli.

Negli ultimi anni sono stati condotti diversi studi sull'illuminazione mesopica, fra cui vorrei citare “Mesopic lightning conditions and pedestrian visibility”, in *INGINERIA ILUMINATULUI*, 11-2003, “Mesopic visual efficiency IV: a model with relevance to nighttime driving and other applications”, in *LIGHTNING RESOURCE TECHNOLOGY*, 03-2007 ed il lavoro svolto dal CIE nel documento denominato CIE TC1-58.

Grazie a questi studi è emerso che la sensibilità spettrale dell'occhio non cambia quando i livelli di illuminazione raggiungono l'area mesoscopica per angoli visuali ristretti e quindi la curva fotopica $V(\lambda)$ rimane una misura valida per la visione foveale a basse luminanze. Invece, in situazioni in cui le informazioni vengono catturate anche da una visione periferica (angolo visivo di 15° - 20°), i bastoncini assumono un ruolo dominante: in questi casi una lampada con forte componente blu dello spettro luminoso apporterebbe miglioramenti alla visione periferica e quindi all'identificazione di oggetti fuori dal campo foveale, soprattutto col diminuire della luminosità.



I modelli di curve mesopiche proposti da questi studi e da successive modificazioni indicano un aumento relativo della luminosità percepita con sorgenti a forte componente blu dello spettro (con alto indice S/P e cioè rapporto fra ponderazione scotopica e ponderazione fotopica) per la visione periferica, così come indicato dalla tabella sottostante:

	Background luminances	0.03	0.1	0.3	1	3
	S/P	Mesopic luminance (cd/m ²)				
LPS	0.25	0.0075	0.064	0.234	0.874	2.81
HPS	0.55	0.0202	0.080	0.262	0.927	2.89
MH	2.25	0.0498	0.144	0.39	1.18	3.28
MH/HPS		2.47	1.80	1.49	1.27	1.13
MH/LPS	Ratios	6.64	2.25	1.67	1.35	1.17
HPS/LPS		2.69	1.25	1.12	1.06	1.03

Questa tabella ci dice ad esempio che, per una lampada a sodio alta pressione (HPS), anziché 1 cd/mq, in condizioni mesopiche vengono percepite 0,927 cd/mq; per una lampada a luce bianca, come quelle agli alogenuri (MH) anziché 1cd/mq si percepiscono 1,18 cd/mq. Ancora più evidente è una tabella in cui, in base ai vari rapporti S/P (per una lampada ad alogenuri ed un LED indicativamente si considera S/P=2,35) vengono indicate le divergenze percentuali fra la luminanza percepita secondo il “vecchio” modello fotopico ed il nuovo “mesopico”:

S/P	Photopic luminance/cd m ⁻²						
	0.01	0.03	0.1	0.3	1	3	10
0.25	-75%	-75%	-36%	-22%	-13%	-6%	-1%
0.45	-55%	-42%	-25%	-16%	-9%	-5%	-1%
0.65	-35%	-24%	-15%	-10%	-6%	-3%	0%
0.85	-15%	-10%	-6%	-4%	-2%	-1%	0%
1.15	14%	9%	6%	4%	2%	1%	0%
1.35	30%	20%	14%	9%	5%	3%	0%
1.55	45%	31%	21%	14%	8%	4%	1%
1.75	59%	41%	28%	19%	11%	6%	1%
1.95	73%	51%	35%	23%	14%	7%	1%
2.15	86%	61%	41%	28%	17%	9%	1%
2.35	98%	70%	47%	32%	19%	10%	1%
2.55	111%	79%	54%	37%	22%	11%	2%
2.75	122%	87%	60%	41%	24%	13%	2%

Questo schema ci dice due cose:

1. Una sorgente a luce bianca diviene fondamentale allorché ci siano precise esigenze di visione periferica (visibilità dei pedoni sul marciapiede e degli ostacoli laterali)
2. Lo sconto di categoria proposto dalla UNI 11248 può venire proposto solo per basse luminanze (inferiori alle 0,75 cd/mq e quindi solo per strade inferiori alla categoria ME4): infatti, come si legge dal grafico, nel caso di una luminanza di 1 cd/mq di riferimento (cioè seguendo l'attuale ponderazione fotopica) abbiamo per una lampada al sodio 0,927 cd/mq (riduzione del 7%) che non giustifica l'aumento di una categoria, così come proposto dalla UNI 11248 e, ancora più importante, per una lampada a luce bianca 1,18 cd/mq (aumento

del 18%) che ancora non giustifica lo sconto di categoria. Solo per una luminanza di 0,3 cd/mq abbiamo per una luce bianca 0,39 cd/mq (aumento del 30%) e quindi una giustificazione dello sconto di categoria.

Sarebbe pertanto auspicabile che la UNI 11248 venisse modificata in modo tale da prendere in considerazione questi parametri, piuttosto che fornire generiche informazioni riguardo alle possibili declassificazioni (visto che nella corrispondente norma prEN UNI 13201:1 non vi è traccia dei parametri indicati nella tabella della UNI 11248).

Mi rendo conto che il tema è molto spinoso e pertanto risulta difficile esaurirlo in queste poche righe (cui spero di sopperire presto con un articolo dedicato): quanto detto vale unicamente come spunto di riflessione per tutti coloro che pretendono l'immediata declassificazione delle strade in qualsiasi condizione e per qualsiasi categoria illuminotecnica.

Riferimenti:

Normativa sistemi LED per l'illuminazione:

- CEI EN 62031:2009 – *Moduli LED per illuminazione generale – Specifiche di sicurezza*
- CEI EN 61347-2:2007 – *Unità di alimentazione di lampada – Parte 2-13: Prescrizioni particolari per unità di alimentazione elettroniche alimentate in corrente continua o in corrente alternata per moduli LED*
- UNI EN 13032-1:2005 – *Luce e illuminazione – Misurazione e presentazione dei dati fotometrici di lampade e apparecchi di illuminazione*
- CIE 127:2007 – *Measurement of LEDs*
- Draft IEC 62504 – *Terms and definitions for LEDs and LED modules in general lighting*
- Draft IEC 62560 – *Self-ballasted LED-lamps for general lighting services >50 V - Safety specifications*
- Draft IEC 62612 – *Self-ballasted LED-lamps for general lighting services >50 V – Performance requirements*
- Draft IEC 61341 – *Method of measurement of centre beam intensity and beam angle(s) of reflector lamps – including LED*
- IES LM – 79-08 – *Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products*
- CIE TC2-46 – *CIE/ISO standards on LED intensity measurements*
- CIE TC2-50 – *Measurements of the optical properties of LED clusters and arrays*
- CIE TC2-58 – *Measurements of LED radiance and illuminance*
- CIE TC2-63 – *Optical measurements of high-power LEDs*
- CIE TC2-66 – *Terminology of LEDs and LED assemblies*

Tecnologia a LED per l'illuminazione:

- G. Forcolini, *Illuminazione LED*, HOEPLI : Milano
- AFE, *LED ou lampes en éclairage public. De quoi s'agit-il?*, in « Point de vue de l'AFE » numero 11 – 5 ottobre 2009
- S. Onaygil, Ö. Güler and E. Erkin, *LED TECHNOLOGIES IN ROAD LIGHTING*, CIE convention in Budapest of 27-29 May 2009
- L. Di Fraia (a cura di), *Illuminazione a LED oggi: chimera o realtà?*, convegno del 13 marzo 2009 all' Università di Napoli Federico II
- CSS Street Lighting Project, *SL1/2007 – Review of the class and quality of street lighting*

Illuminazione in campo mesopico:

- CIE, *Mesopic photometry: history, special problems and practical solutions*, CIE Central Bureau CIE 81
- Bullough, John D. and Mark S. Rea, *Visual Performance Under Mesopic Conditions*, TRB, National Research Council, 2004, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board
- M. Eloholma, M. Viikari et al., *Mesopic models – from brightness matching to visual performance in night-time driving: a review*, Lighting Res. Technol. 37,2 (2005)
- Y. He MS, A. Bierman MS and M. Rea PhD, *A system of mesopic photometry*, Lighting Res. Technol. 30,4 (1998)
- Eloholma M, Halonen L, *New model for mesopic photometry and its application to road lighting*, LEUKOS 2(4):263-93
- M. Eloholma, J. Ketomäki, P. Orreveläinen et al., *Visual performance in night-time driving conditions*, Ophthal Physiol 25:1-10
- A. Freiding, M. Eloholma, J. Ketomäki, et al., *Mesopic visual efficiency I: Detection threshold measurements*, Lighting Res Technol. 39
- H. Walkey, P. Orreveläinen, J. Barbur, et al., *Mesopic visual efficiency II: Reaction time experiments*, Lighting Res Technol. 39
- G. Várady, A. Freiding, M. Eloholma, et al., *Mesopic visual efficiency III: Discrimination threshold measurements*, Lighting Res Technol. 39
- T Goodman, A Forbes, H Walkey, et al., *Mesopic visual efficiency IV: A model with relevance to nighttime driving and other applications*, Lighting Res Technol. 39
- CIE TC1-58 – *Visual performance in the mesopic range*
- CIE TC2-65 – *Photometric measurements in the mesopic range*

Sicurezza dei sistemi LED:

- G. C. Brainard , J. P. Hanifin, et al., *Action spectrum for melatoninregulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor*, Journal of Neuroscience, 21(16).
- G. Glickman, R. Levin, G. C. Brainard, *Ocular Input for Human Melatonin Regulation: Relevance to Breast Cancer*, Neuroendocrinology Letters, 23 (suppl 2)
- E. Haus, M. Smolensky, *Biological clocks and shift work: circadian dysregulation and potential long-term effects*, Cancer Causes Control 17
- K. Navara, J. Nelson, *The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecologicalconsequences*, J. Pineal Res. 43
- CIE TC6-55 – *Photo-biological safety of LEDs*