

Affidabilità e prestazioni dei sistemi a LED per
l'illuminazione
Reliability and performance of LED systems for
general lighting service

Marco Serpelloni

14 settembre 2011

Relatore: Prof. Fiorentin Pietro

Indice

I	Intro	3
II	Prestazioni sistemi LED	5
1	Fattori caratterizzanti del LED	6
1.1	Alimentazione	6
1.2	Efficienza luminosa e resa cromatica	13
1.3	LED package	17
2	L'efficienza globale	19
2.1	Le durate	20
2.2	Regime termico e Life time	21
2.3	Decadimento del flusso luminoso	22
2.4	Prestazioni fotometriche/colorimetriche e binning nei moduli led a luce eterocromatica	24
2.5	Rendimenti luminosi	30
III	Analisi affidabilità con Modello Multistress	32
IV	Affidabilità Sistema a LED	38
3	Metodo Montecarlo applicato a SSL (Solid State Light)	38
V	Conclusioni	41

Parte I

Intro

Nel 1962 negli USA Nick Holonyak Jr, consulente dell'azienda General Electric, costruì il primo prototipo funzionante di diodo luminoso. Dagli studi di un suo allievo, M George Carford, nacquero i primi prototipi a luce ambra, arancio e rossa. Nel 1971, venne costruito nei laboratori RCA (Radio Corporation of America) il primo esemplare a luce blu, ma il flusso luminoso era ancora di modesta entità tanto da non consentirne l'impiego a scopi illuminotecnici.

Nel 1993 Shuji Nakamura scopre un trattamento del materiale semiconduttore che permette di generare luce blu e verde ad alto flusso. Utilizzando il nitruro di gallio (GaN) per un nuovo led più brillante degli altri, sperimenta e mette a punto, allo stesso tempo, la tecnologia dei fosfori incorporati nel rivestimento del die per la parziale conversione delle radiazioni blu in radiazioni gialle, ottenendo così una luce eterocromatica (luce bianca).

Nei primi anni del terzo millennio importanti fabbricanti di materiali semiconduttori e di componentistica optoelettronica si sono impegnati nella ricerca e produzione dei led su ampia scala. Nello stesso periodo le grandi case multinazionali di lampade ad incandescenza, alogene, fluorescenti e a scarica di vapori e gas, investono ingenti somme nel settore, avviando anch'esse la produzione su larga scala di diodi luminosi.

Lamp technology	Efficacy (*) [lm/W]	Life time [hours]	CRI	Available Dimming Level [%]	Dimming Influence	Startup time
Incand.	10-17	1k	100	100	Positive: lifetime extending	Instantly
Halogen	12-20	2k	100	100	Negative: lifetime shorten - halogen cycle doesn't work	Instantly
FL	20-60	10-20k	80	10	Neutral	1-5sek
MV	25-40	14-20k	80	50	Negative: Lifetime shorten; Color shifting	5-7min
MH	35-50	10-15k	60-90	50	Negative: Lifetime shorten; Color shifting	2-5min
HPS	55-65	24-32k	40	80	Positive: Lifetime extending	5-10min
LED	65-75	50-100k	70-90	100	Positive: Efficacy risen, Lifetime extending	Instantly

Figura 0.1: * - Typical expected performance in real-life applications. Based on mean lumens, and including ballast/driver, thermal equilibrium and typical fixture Coefficient of Utilization losses.

L'interesse per l'uso dei diodi ad emissione luminosa (LEDs) per display e applicazioni di illuminazione sta crescendo da un pò di anni molto velocemente. Una lunga durata di vita e un ridotto consumo di energia sono gli aspetti che hanno generato così tanto interesse nell'uso di questa tecnologia. Tradizionalmente il tempo di vita di una lampada o di una sorgente luminosa utilizzata in applicazioni illuminotecniche era determinato sottoponendo la sorgente a predefiniti cicli di on/off finché metà delle sorgenti luminose sotto analisi cessavano di produrre luce. A differenza di queste sorgenti il LED raramente cessa in modo "catastrofico" di emettere luce, invece la sua potenza di emissione decresce nel tempo. Anche se tecnicamente il LED continua a funzionare correttamente e produrre luce, ad un certo punto la quantità di flusso luminoso prodotta risulta insufficiente per l'applicazione nel quale viene utilizzato. Quindi il tempo di

vita del LED dovrebbe corrispondere al tempo in cui il dispositivo produce un sufficiente flusso luminoso.

Oggi, l'aspetto più importante nella produzione e utilizzo di LED per illuminazione è quello di creare apparecchi LED con le massime prestazioni illuminotecniche. Per far ciò si rende necessario un'analisi dei vari aspetti che ne influenzano le prestazioni illuminotecniche e la durata di vita dell'apparecchio. Lo scopo di questa tesina è quello di trattare tutti i fattori che maggiormente caratterizzano questa tecnologia e analizzare i modelli con i quali vengono stimati i tempi di vita di questi dispositivi.

Parte II

Prestazioni sistemi LED

Nelle sorgenti luminose le variabili fisiche che più di altre sono in grado di esercitare delle influenze sulle prestazioni del dispositivo sono certamente la tensione elettrica di alimentazione e la temperatura ambiente, da intendere come il livello termico presente nel microspazio che circonda l'oggetto che emette luce.

Bisogna tuttavia distinguere tra le tradizionali sorgenti a filamento incandescente e quelle a scarica (fluorescenti, a vapori di alogenuri metallici, a vapori di sodio). Il primo tipo mostra influenze marcate per quanto riguarda la tensione, scarsa invece quando cambia la temperatura. Le sorgenti a scarica invece sono meno stabili rispetto alla temperatura. Nel caso del fluorescente, per esempio, si riscontra una riduzione del flusso luminoso in relazione alla variazione della temperatura ambiente rispetto ad un piccolo intervallo di valori considerati ideali per ottenere le prestazioni dichiarate dal fabbricante.

Il LED, a differenza delle sorgenti citate, è sicuramente più influenzato dalle condizioni di alimentazione e da altri parametri fisici. Sotto questo aspetto il LED richiede ai progettisti maggiore attenzione nell'individuare le condizioni effettive in cui si troverà a rendere il proprio servizio e nell'imporre e mantenere quelle più adatte.

Tale dipendenza del LED dal contesto implica l'impiego di una serie di altri componenti che costituiscono un'aggregato coerente a cui si può dare una definizione di *sistema* LED.

Si introduce il termine sistema perché sia le componenti che le loro interrelazioni possono variare nell'ambito di una logica che è finalizzata a trarre dalle sorgenti le prestazioni attese. In altre parole, il LED deve il suo corretto funzionamento ai rapporti reciproci che si instaurano tra specifiche componenti del sistema. Ciò che veramente conta sono le prestazioni che il diodo luminoso è in grado di esprimere, e pertanto, ogni componente svolge un ruolo determinante nell'ambito del sistema.

In modo schematico, il sistema LED è composto da:

- la *sorgente* LED, per l'emissione del flusso luminoso;
- il *circuito stampato* per il supporto e l'ancoraggio meccanico, per la distribuzione dell'energia elettrica fornita dall'alimentatore, per il primo contributo alla dissipazione termica;
- uno o più *alimentatori* per la fornitura di energia elettrica;
- uno o più *dissipatori termici* per lo smaltimento del calore prodotto dal LED;
- *dispositivi ottici*, o semplicemente le ottiche (primarie all'interno del packaging e secondarie all'esterno), per la formazione del solido fotometrico.

Alcune componenti ripropongono in modo nuovo gli schemi delle sorgenti convenzionali, come l'alimentatore e le ottiche, altre sono invece tipiche del mondo optoelettronico (circuiti stampati, dissipatore termico) ma in ogni caso ognuna di esse influenza in modo più o meno evidente le prestazioni e la durata di vita del LED.

1 Fattori caratterizzanti del LED

1.1 Alimentazione

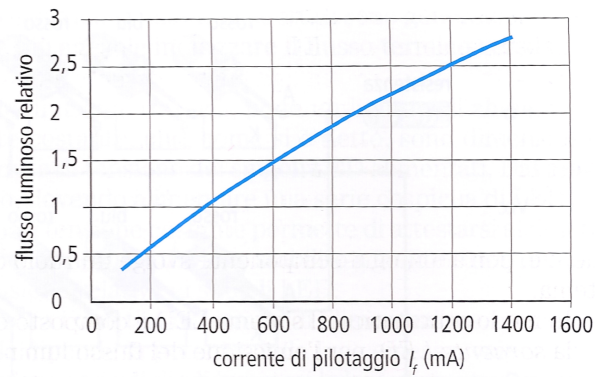


Figura 1.1:

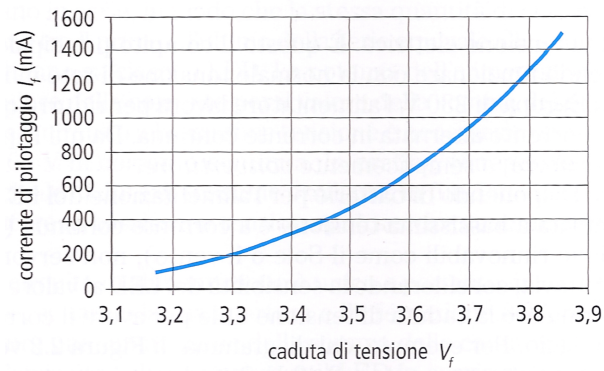


Figura 1.2:

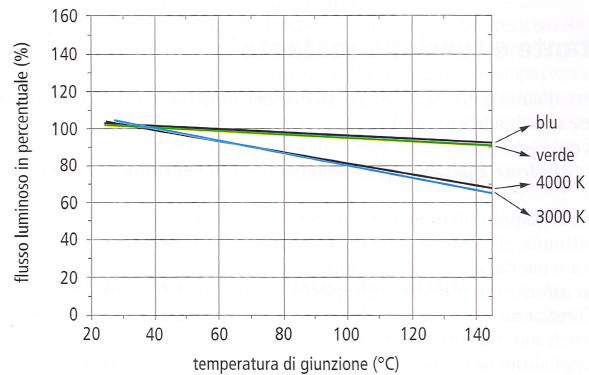


Figura 1.3:

Ogni LED è progettato per generare un flusso luminoso a un determinato valore della corrente continua (chiamata corrente di pilotaggio I_f) e della temperatura presente nella giunzione p-n (temperatura di giunzione T_j).

Generalmente i produttori fissano un valore in gradi (di solito 25°C o 40°C) per T_j e un valore in mA per I_f , rispetto ai quali il LED produce un certo flusso luminoso come in figura (1.1).

A valori della corrente di pilotaggio corrisponde una differenza di potenziale V_f ai capi del chip figura (1.2). Il flusso reso è proporzionale alla corrente I_f per cui, aumentando i mA, si ottengono più lumen, mantenendo costante la temperatura di giunzione figura (1.1). Il rapporto tra corrente e tensione non è lineare. E' sufficiente un debole incremento della tensione per provocare un forte aumento della corrente. Alti valori della corrente di pilotaggio decurtando la durata del LED; d'altra parte deboli correnti comportano una riduzione dei flussi emessi. E' importante mantenere la corrente ad un valore quanto piu' costante. Il valore della tensione di pilotaggio e' legato anche alla temperatura di giunzione T_j per cui mantenendo la tensione costante, si ha un'incremento della corrente di pilotaggio causata proprio dalla variazione di T_j . E' utile spiegare l'interrelazione tra queste variabili con l'analisi di un caso tipico. A 25°C di T_j , leggendo il diagramma di figura (1.4) - (punto A), si ha una caduta di tensione di 3,2V per una corrente di 350mA. Con il LED attivo la T_j tende a salire. Al valore di 80°C si verifica un decremento di 0,18V circa figura (1.4). Si passa pertanto da 3,2V a 3,02 V. Ma l'incremento di temperatura modifica la curva del primo diagramma. Ora a 350 mA corrispondono 3,02V (curva tratteggiata in figura (1.4)).

Se il LED viene alimentato a tensione costante il generatore provvederà a fornire 2,3V e, seguendo la curva tratteggiata del diagramma di figura 4 (punto B), si avrà un aumento della corrente, da 350mA a 470mA. Tale variazione comporterà un aumento del flusso luminoso e una variazione delle sue coordinate cromatiche oltre che a una riduzione dell'efficienza e della durata media di vita. Se l'alimentazione fosse a corrente costante, l'incremento della temperatura de-

terminerebbe solo una modesta caduta di tensione e quindi una minore potenza assorbita con conseguente riduzione del flusso luminoso.

Con l'alimentazione a corrente costante i cambiamenti della T_j determinano modeste variazioni della caduta di tensione con piccole alterazioni della potenza assorbita. Alimentando invece a tensione costante le variazioni della corrente sono elevate come quelle del flusso luminoso.

L'alimentazione più affidabile, dunque, è quella a corrente costante con gli alimentatori a tensione costante è necessario che i driver siano dotati di sistemi di rilevamento delle variazioni termiche per regolare opportunamente tensioni e correnti onde evitare i problemi segnalati.

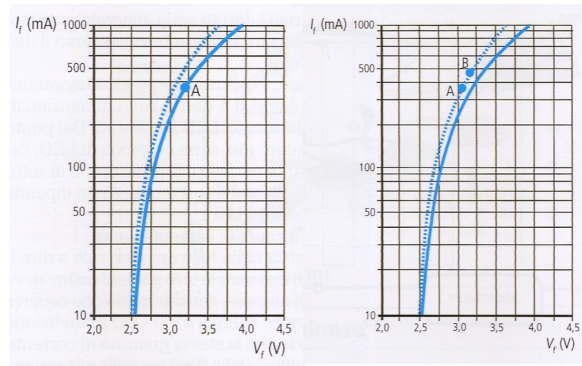


Figura 1.4:

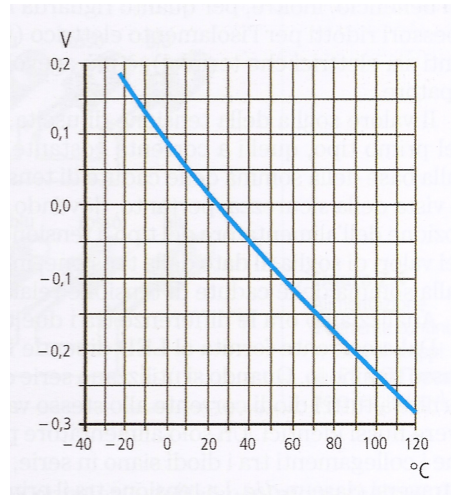


Figura 1.5:

La tabella seguente, figura (1.6), tratta da “Investigation of Power Supply Methods for Intelligent LED Luminary” Ref[15], dimostra ancora una volta come il controllo in corrente sia da preferire rispetto alle altre tipologie di regolazione.

LED WORKING TEMPERATURES [°C] AT DIFFERENT POWER SUPPLIES

<div style="display: inline-block; transform: rotate(-45deg);">Illumination [Lx]</div> <div style="display: inline-block; transform: rotate(-45deg);">Type</div>	202	610	958
Grouping	96	96	103
PWM	36	51	79
Current control	42	63	79

CONSUMED POWER [W] AT DIFFERENT POWER SUPPLIES

<div style="display: inline-block; transform: rotate(-45deg);">[Lx]</div> <div style="display: inline-block; transform: rotate(-45deg);">Type</div>	202	403	610	768	958	1166	1362
Grouping	10.0	19.2	28.6	37.5	46.3	56.0	65.0
PWM	14.1	22.9	29.9	35.9	44.4	53.4	62.6
Current control	5.1	11.5	18.8	25.8	35.0	47.0	63.0

Figura 1.6:

Tipologie di schemi circuitali

Come precedentemente già detto, per ragioni di efficienza i LED non possono essere connessi in serie ad una resistenza ma necessitano di un modulo di alimentazione in swiched mode con controllo di corrente. Differenti convertitori standard DC-DC sono riportati nelle figure (1.6), (1.7), (1.8), (1.9) rispettivamente BOOST, BUCK, BUCK-BOOST e CONVERTITORE ISOLATO.

Nella ricerca e sviluppo di alimentatori a LED si è osservato però che alimentando ad impulsi di corrente il LED mantiene la sua efficienza. Questo però permette di semplificare la progettazione dei convertitori e diminuisce il numero di componenti con un conseguente diminuzione della probabilità di guasto e quindi un allungamento del tempo di vita dell'alimentatore. I *Resonant operating LED drivers* sembrano essere particolarmente adatti per questo compito. Infatti questo tipo di convertitori non necessita del condensatore elettrolitico di filtro all'uscita che incide particolarmente sul tempo di vita del dispositivo stesso. Inoltre i driver risonanti hanno perdite di swiching minori e permettono anche di mantenere una corrente media costante senza l'utilizzo di un sensore di corrente o di un circuito di controllo feed-back, vedi Ref [11].

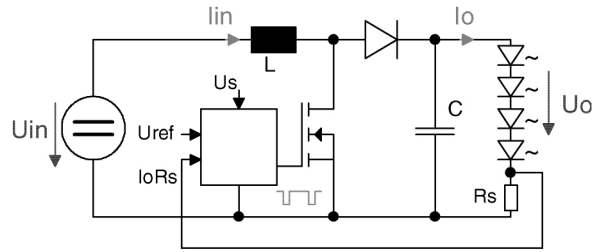


Figura 1.7:

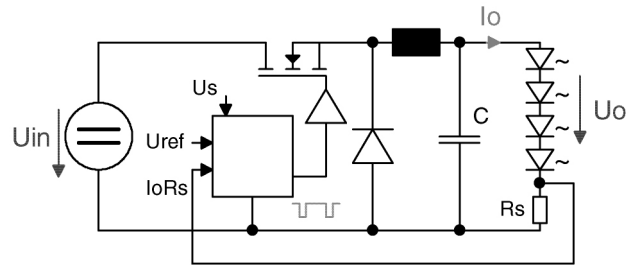


Figura 1.8:

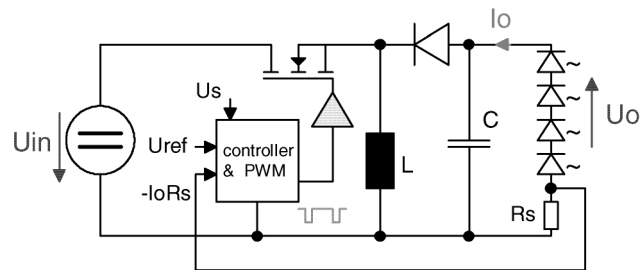


Figura 1.9:

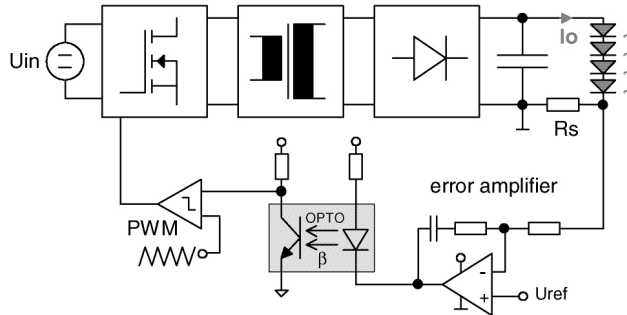


Figura 1.10:

Differenti forme d'onda della corrente

E' importante anche osservare la forte dipendenza tra l'efficienza luminosa e correnti di alimentazione con differenti forme d'onda. Per questo motivo e per maggiore chiarezza riportiamo i dati di uno studio, Ref [13], dove vengono misurati due differenti power led per la caratterizzazione sia dal punto di vista elettrico sia da quello che riguarda l'emissione luminosa con differenti forme d'onda di I_f . Vedi figure (1.11), (1.12), (1.13), (1.14), (1.15), (1.16).

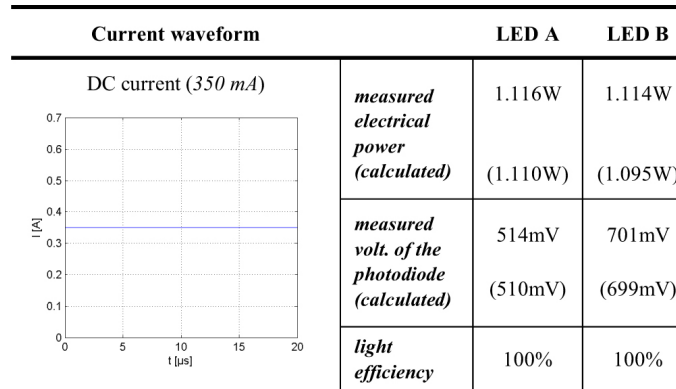


Figura 1.11:

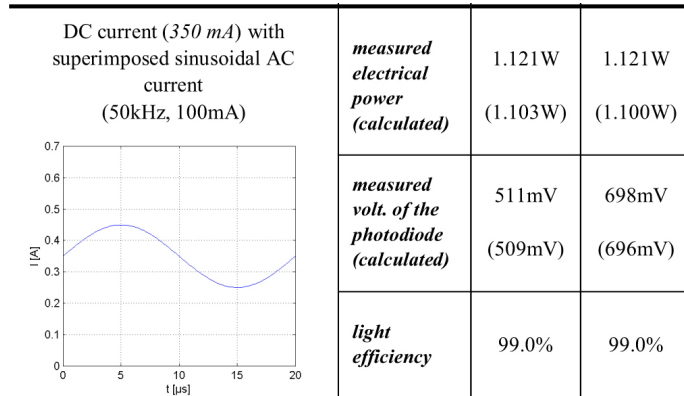


Figura 1.12:

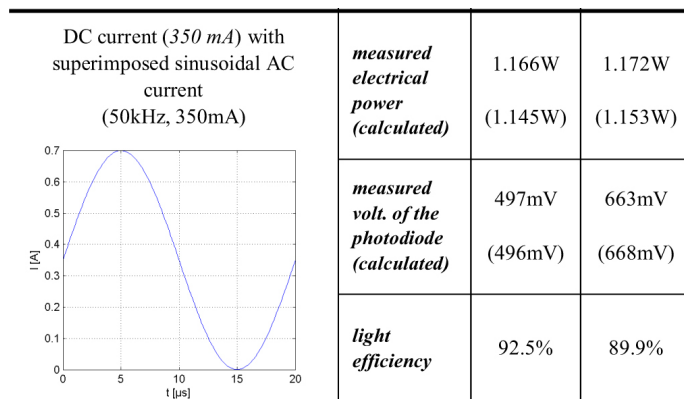


Figura 1.13:

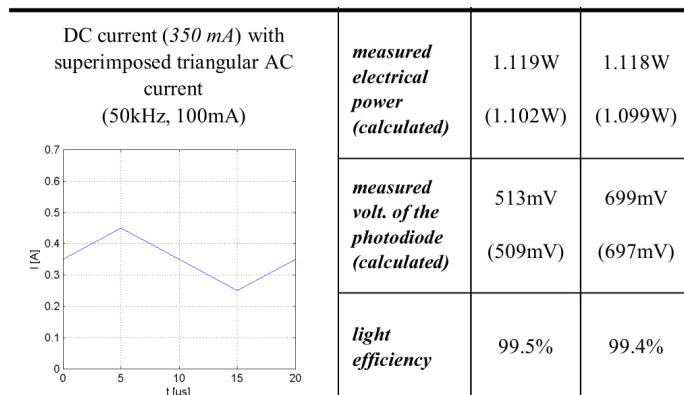


Figura 1.14:

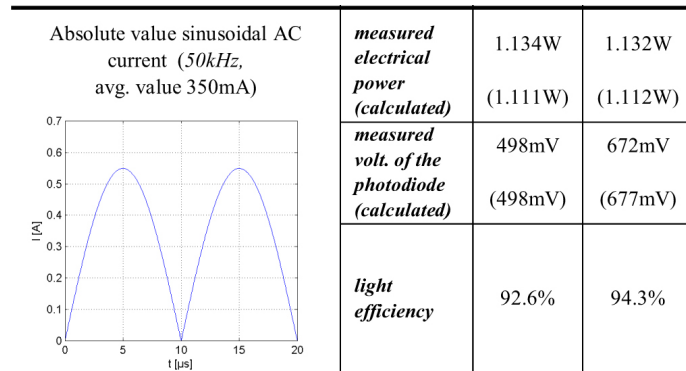


Figura 1.15:

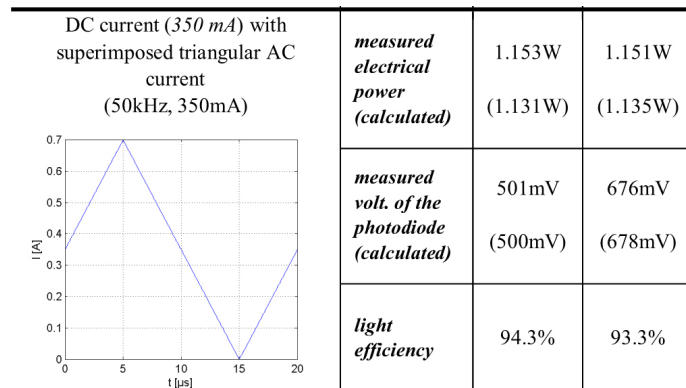


Figura 1.16:

PLM

Da evidenziare una nuova tecnica di controllo applicata ai convertitori per alimentatori LED. Secondo alcuni studi Ref [13] il PLM o (pulse-level-modulation) Controllo a Modulazione di Livello degli impulsi applicato ai convenzionali stadi di potenza in switched-mode permetterebbe una maggiore robustezza ed un incremento dell'efficienza del sistema.

1.2 Efficienza luminosa e resa cromatica

L'efficienza luminosa si definisce come il rapporto tra il flusso prodotto e la potenza elettrica assorbita da una sorgente luminosa. L'efficienza luminosa però è un parametro quantitativo ricavato mettendo a confronto due grandezze *non omogenee*, confrontando due tipi diversi di fenomeni: l'elettricità (fenomeno fisico) e la luce (fenomeno percettivo). Proprio nella luce risiede il punto problematico del concetto di efficienza. Procedendo misurazioni di ordine fisico

si userebbe la stessa grandezza, la potenza, e la relativa unita di misura W. Questa è però la valutazione energetica che si compie in ambito fisico confrontando potenze in entrata e in uscita.

Parlando di luce indichiamo però un fenomeno dovuto alla percezione visiva e quindi bisogna considerare il fattore umano. L'energia che procura la visione è l'energia "trasformata" dal sistema occhio-cervello. La particolarità di ciò sta nel fatto che la trasformazione è selettiva a differenza della normale logica quantitativa per cui, se due radiazioni di differente lunghezza hanno lo stesso contenuto energetico, sono considerate identiche dallo strumento della misura radiometrica. In altre parole lo stimolo procurato da certe radiazioni è superiore rispetto ad altre.

Proprio sulla quantificazione degli stimoli si basa la teoria codificata a livello internazionale della *sensibilità dell'occhio medio internazionale*, da cui *coefficiente di sensibilità relativa*. Si ipotizza, in sostanza, un modello di apparato visivo, comune a tutti gli esseri umani, che reagisce agli stimoli procurati da radiazioni di differente lunghezza d'onda secondo una regola rappresentata da una curva in un apposito diagramma, il diagramma del coefficiente di sensibilità relativa riportato di seguito figura (1.17). La teoria prevede un valore massimo del coefficiente corrispondente alla radiazione di lunghezza d'onda pari a 555nm, percepita come luce di colore giallo/verde. Come si può notare dal diagramma tutte le altre radiazioni hanno coefficienti inferiori.

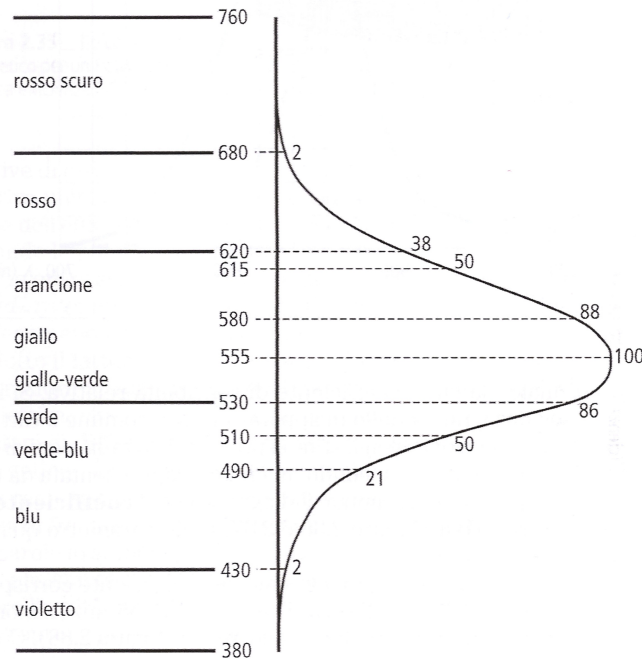


Figura 1.17:

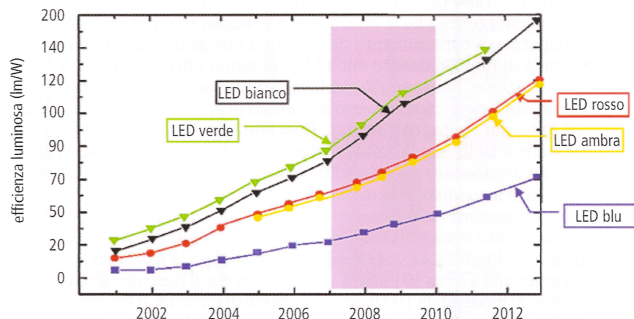


Figura 1.18:

In prima analisi la creazione di un LED con lunghezza d'onda vicina a 555nm risulterebbe avere la maggiore efficienza luminosa. Il limite di tale scelta appare evidente: non si tiene conto, considerando la prestazione visiva, nè del colore e nè del contesto. L'ipotetico LED centrato a lunghezza d'onda di 555nm non sarebbe in grado di riprodurre nessun colore al di fuori del giallo/verde. Due LED con lo stesso flusso ma con l'energia ripartita in modo diverso possono, in un determinato contesto, dare più o meno risalto a colori complementari, inducendo così nel soggetto una sensazione di maggiore o minore luminosità tra colori adiacenti.

Uno dei problemi più gravi che sorge, utilizzando la tecnologia a LED, riguarda l'inconciliabilità tra l'*efficienza luminosa* e l'*indice di resa cromatica*. E' evidente che l'incremento dell'indice di resa cromatica si ottiene distribuendo la potenza delle radiazioni su tutto lo spettro, mentre l'incremento del flusso luminoso, lasciando invariato il dato della potenza assorbita, si raggiunge concentrando il più possibile la potenza nelle radiazioni prossime al valore di 555nm, cioè quelle radiazioni che il sistema occhio-cervello percepisce come colori più luminosi.

Visto ciò, si rende necessaria una valutazione con attenzione dell'ambito di progettazione in cui si sta lavorando. Dove non ha rilevanza la resa dei colori, nè in generale la resa estetica, si possono utilizzare LED che "prediligono l'efficienza" in termini di efficienza luminosa, viceversa, la resa cromatica assume importanza nella scelta del componente stesso.

Come possiamo notare dalla figura (1.18), limitandoci all'efficienza di lampada, il LED ha subito negli ultimi anni incrementi molto significativi.

E' importante evidenziare il fatto che anche nella valutazione dell'efficienza i LED si differenziano dalle lampade tradizionali, dove l'aumento della potenza assorbita influenza positivamente il dato dell'efficienza. In una lampada ad incandescenza di 60W l'efficienza ammonta a circa 10lm/W (circa 600lm di flusso luminoso). Passando al modello da 100W si ha un flusso di circa 1350lm con l'efficienza che sale a 13,5lm/W. Nei LED l'efficienza tende a diminuire con l'incremento della potenza assorbita. Per avere più flusso occorre più corrente di pilotaggio e, aumentando la caduta di tensione ai capi del led, sale anche la

potenza assorbita ma secondo un rapporto che penalizza l'efficienza. In altre parole la potenza aumenta con un tasso superiore a quello del flusso Figura (1.19). Ne deriva il decremento dell'efficienza luminosa. E' quindi evidente che la prestazione dell'efficienza dipende inversamente dalla corrente di pilotaggio come riportato in Figura (1.20). L'effetto Joule legato al transito di cariche elettriche nel semiconduttore, causa dell'aumento di temperatura di giunzione, penalizza l'emissione del LED. Intervenendo sull'alimentazione, variando la corrente di pilotaggio, si stabilisce l'entità del flusso e della relativa efficienza.

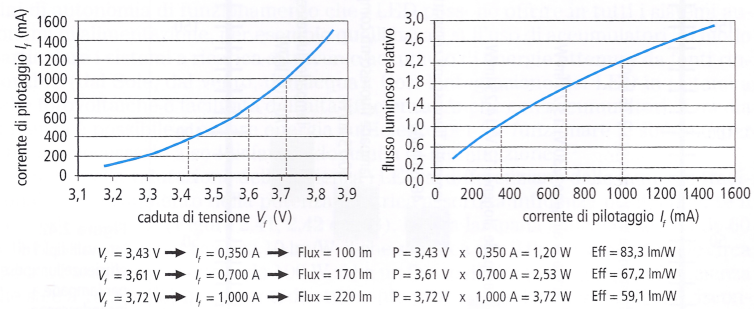


Figura 1.19:

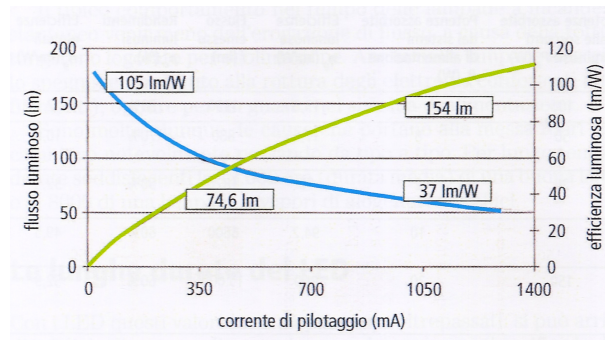


Figura 1.20:

1.3 LED package

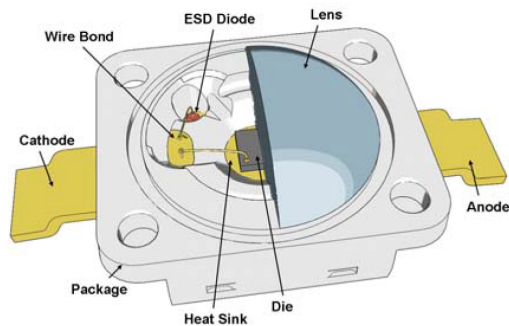


Figura 1.21:

Secondo alcuni studi sull'efficienza e stabilità dei LED, tra cui "Life of LED-Based White Light Sources" Ref[2], differenti LED commerciali sotto identiche condizioni operative presentano grandi differenze in termini di tempo di vita rispetto a differenti packages vedi Figura (1.22). Inoltre secondo lo studio di Xiaobing Luo Ref[10], differenti packaging ma soprattutto differenti materiali con i quali vengono realizzati causano non solo decrementi del flusso luminoso emesso ma anche una diminuzione del tempo di vita a causa di un aumento delle probabilità di un guasto nel componente stesso. Quindi nell'ottica di migliorare le prestazioni dei moduli LED, si rende necessaria anche una ricerca approfondita sui processi di costruzione e sulla struttura dei packages.

TABLE II
TESTING CONDITIONS FOR THE HIGH-FLUX LED ARRAYS IN EXPERIMENT 2

High-Power White LED	Ambient Temperature (°C)	Drive Current (mA)	T-point Temperature (°C)
A	35	350	52
B	35	350	38
C	35	350	40
D	35	350	38
E	35	350	44
F	35	350	59

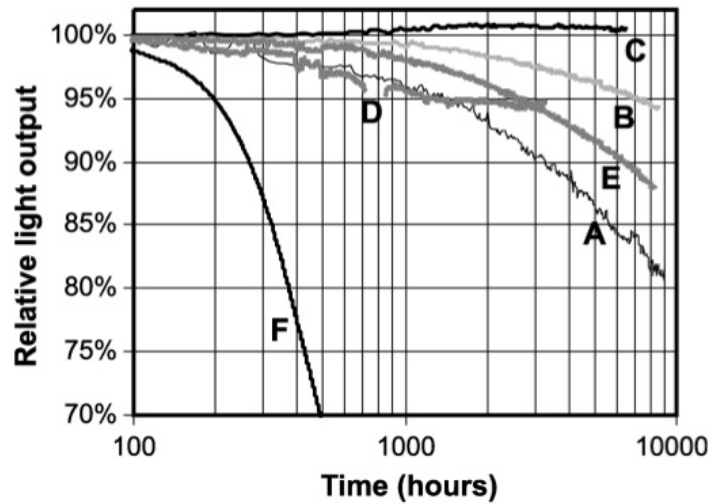


Figura 1.22:

Rete elettrica equivalente

Sebbene la rete elettrica equivalente della trasmissione del calore vari a seconda del tipo di package utilizzato e della disposizione del LED all'interno del sistema di illuminazione e' importante osservare che con l'incremento della corrente (input power) le resistenze termiche parziali diminuiscono mentre aumentano le capacita' termiche parziali che costituiscono la rete elettrica equivalente, vedi "Thermal Analysis of High Power LEDs at Different Drive-In Current" Ref[14].

2 L'efficienza globale

La valutazione dell'efficienza luminosa precedentemente trattata non è che un primo aspetto dell'efficienza globale o di sistema. I LED infatti funzionano grazie ai dispositivi di alimentazione elettrica e ai dispositivi ottici. Gli alimentatori / convertitori, oggi in uso, hanno un consumo che si aggira intorno al 20% della potenza complessiva richiesta dal sistema a LED inoltre bisogna includere ogni altro dispositivo di gestione, di controllo o di regolazione. I rendimenti luminosi delle ottiche, ossia il rapporto tra il flusso luminoso in uscita dall'ottica e quello in entrata, generato dal LED, si attestano intorno al 80-85%.

L'efficienza globale del sistema η_g è data da:

$$\eta_g = \frac{\eta P_a \rho_o}{P_a + P_c}$$

dove:

- η efficienza luminosa del LED ($\eta = \Phi/P_a$)
- Φ flusso luminoso prodotto dal LED (lm)
- ρ_o rendimento luminoso dell'ottica
- P_a potenza elettrica assorbita dal LED
- P_c potenza elettrica assorbita dal sistema di alimentazione, gestione, controllo e regolazione

Qui di seguito riportiamo una tabella con i dati energetici per diversi tipi di lampade, sistemi di alimentazione e sistemi ottici a differente rendimento luminoso. Eseguendo alcune valutazioni comparative dell'efficienza globale ci si rende conto del vantaggio energetico sfruttando sia l'efficienza dei LED, sia il rendimento luminoso delle ottiche secondarie.

Tipi di sorgenti luminose	Potenze assorbite dalle sorgenti luminose P_a (W)	Potenze assorbite dai sistemi di alimentazione P_c (W)	Efficienze luminose η_g (lm/W)	Flusso emesso f (lm)	Rendimenti luminosi ρ_o (%)	Efficienze globali η_g (lm/W)
A incandescenza	100	–	13,5	1350	90%	12,1
A ciclo di alogeni (bassissima tensione)	50	8	17,6	880	70%	10,6
Fluorescente compatta	26	2	70	1820	50%	32,5
A vapori di alogenuri metallici	70	10	94,2	6600	60%	49,5
A vapori di sodio ad alta pressione	150	20	100	15.000	60%	52,9
Modulo con 10 Power LED	30	6	90	2700	85%	63,7

2.1 Le durate

Dato che il LED non e' fabbricato con materiali fragili (es filamenti resi incandescenti, vetro, gas.....) esso ha una buonissima resistenza meccanica e ciò significa una lunga durata di vita (life time). Robustezza e durata sono appunto le caratteristiche peculiari dei diodi luminosi che hanno contribuito alla coniazione del termine sorgenti luminose allo stato solido.

Per lungo tempo sono state considerate soddisfacenti le 12.000 ore (durata media) di una buona lampada fluorescente e le 8.000 di una lampada a vapori di alogenuri metallici. Oggi con i LED questi valori sono ampiamente oltrepassati: in base a dati statistici e di laboratorio si può arrivare a varie decine di migliaia di ore e, nella maggior parte dei casi, non si verifica la disattivazione istantanea (come nel caso di lampade ad incandescenza) ma un lento e graduale ridursi del flusso reso.

Inoltre mentre per le lampade non allo stato solido i brevi cicli di on-off riducono marcatamente la durata media di vita, i LED non risentono di questo effetto negativo dei cicli e le durate arrivano a 50.000 - 60.000 ore. Diventa quindi realistico aspettarsi che un guasto si verifichi prima nel sistema di alimentazione, e solo successivamente nelle fonti luminose, anche se oggi non mancano alimentatori di alta qualità che garantiscono durate equiparabili. Nella Figura (2.1) troviamo a confronto vari tipi di lampade.

	LED ww	LED dw	LED varychrome	QT	HIT
Potenza della lampada P (W)	1.7-42	1.7-42	2.6-28	20-100	20-400
Flusso luminoso (lm)	25-2610	35-3240	30-870	320-2200	1700-35000
Efficienza luminosa max. (lm/W)	62	77	31	22	88
Tonalità cromatica	ww	dw	diverse	ww	ww, nw
Temperatura colore T (K)	3200	5500	1700-10000	3000	3000-4200
Grado di classificazione della resa cromatica	1b	2	1b	1a	1b
Indice di resa cromatica R _a	85	70	85	100	80-89
Durata utile t (h)	50000	50000	50000	3000-5000	9000-12000
Comportamento alla dimmerazione	+	+	+	+	-
Brillantezza	+	+	+	+	+
Comportamento all'avviamento	+	+	+	+	-

Figura 2.1:

2.2 Regime termico e Life time

Anche per la durata di vita il parametro determinante è la temperatura di giunzione. Come si può notare dai grafici in Figura (2.2) e in Figura (2.3), ad alte temperature corrispondono brevi durate inoltre pur mantenendo allo stesso valore la temperatura di giunzione, si registra un decremento del lifetime a prova del fatto che con un aumento della corrente di pilotaggio si ha maggior logoramento del semiconduttore. Come detto precedentemente l'incremento della corrente permette di generare più flusso ma penalizza l'insieme delle prestazioni del diodo luminoso. La Figura (2.2) riporta il DataSheet di 4 power Led prodotti da OSRAM considerati il top sul mercato nel periodo 2010/2011. Il grafico in Figura (2.3) preso da uno studio sul tempo di vita di una sorgente a LED bianca condotto nel 2005 Ref[2] e' utile, se confrontato con il grafico in Figura (2.2), per dare un'idea dell'evoluzione di questa tecnologia negli anni.

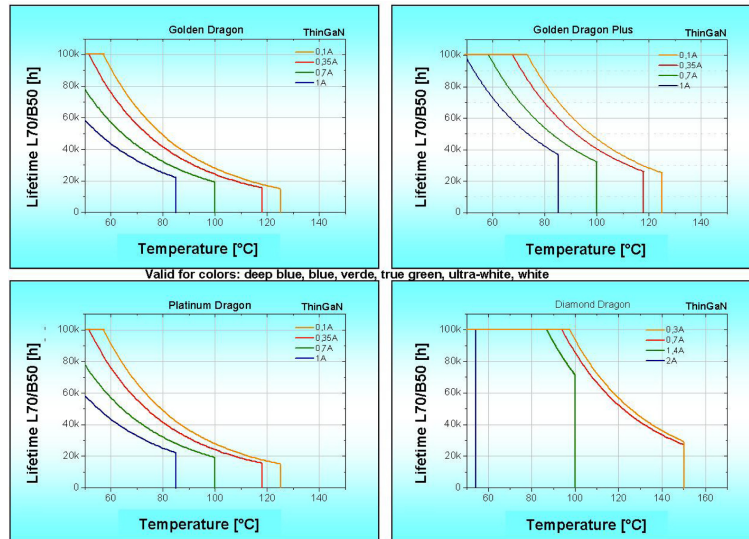


Figura 2.2:

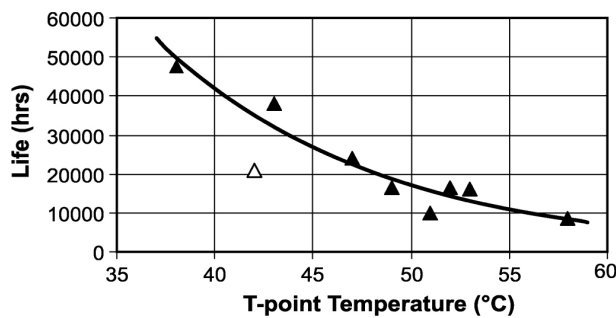


Figura 2.3:

2.3 Decadimento del flusso luminoso

Non avrebbe senso progettare e realizzare un LED con una lunga durata di vita se ad essa corrispondesse una forte riduzione della quantità di luce erogata se cioè si verificasse un consistente decadimento del flusso luminoso emesso. Non si può infatti pensare di realizzare un Progetto Illuminotecnico con delle sorgenti luminose che hanno un flusso emesso variabile di circa il 20%-30% nel tempo. Infatti, se così fosse, ciò comporterebbe un sovradimensionamento del sistema non accettabile.

Come possiamo notare dal grafico in Figura (2.4) (Ref[2]) oltre un certo limite il ridursi della quantità di flusso emessa determina condizioni di illuminazione degli ambienti non più accettabili. Insieme al tempo in ore, cioè alla durata di vita, bisogna pertanto considerare la quantità di lumen ancora a disposizione. I fabbricanti di LED infatti forniscono le relazioni tra le ore di funzionamento e i lumen a disposizione. Nei diagrammi in Figura (2.5), Figura (2.6) e Figura (2.7) sono rappresentate le caratteristiche di tre Power led rispettivamente OSRAM Golden Dragon, OSRAM Golden Dragon PLUS e OSRAM Diamond Dragon ai quali vengono applicate differenti correnti di pilotaggio mantenendo costanti le temperature di giunzione T_s . Le curve dei diagrammi mostrano la variazione della durata media di vita in funzione del decadimento del flusso. Ogni curva è riferita a un valore corrente. Risulta quindi evidente che anche sotto l'aspetto del decadimento del flusso la corrente di pilotaggio esercita una notevole influenza.

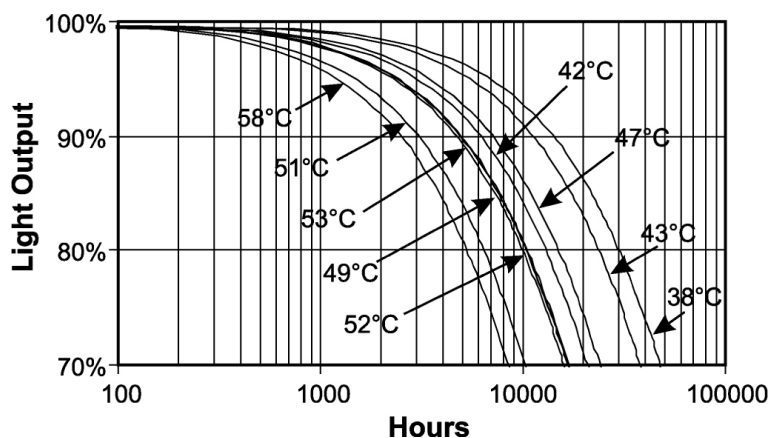


Figura 2.4:

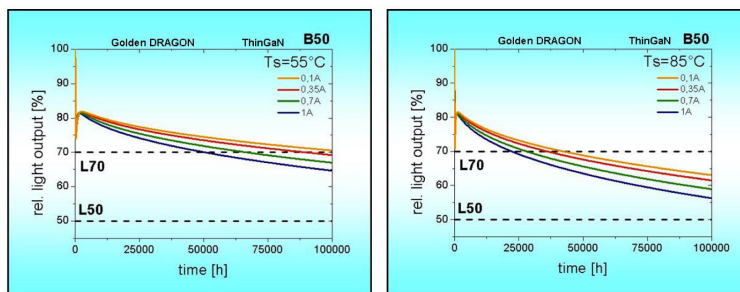


Figura 2.5:

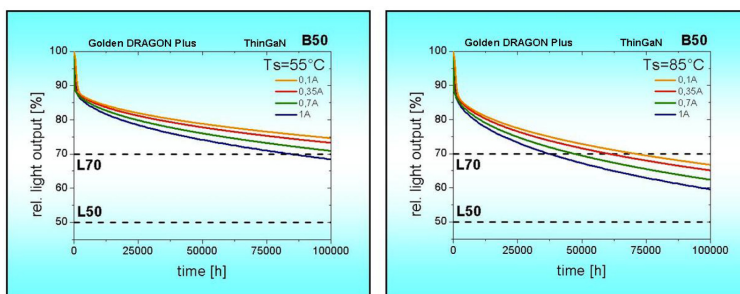


Figura 2.6:

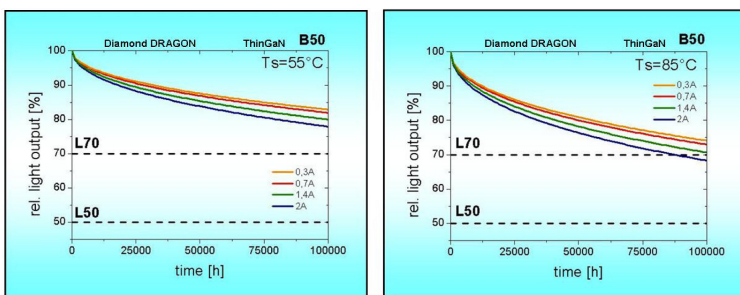


Figura 2.7:

In fase di progettazione si può affrontare il problema / compromesso : tempo di vita / decadimento del flusso in due modi:

1. Considerare come tempo di vita del LED il numero di ore di esercizio fino a quando il flusso decade del 5%-10%.
2. Progettare un impianto illuminotecnico sovradimensionato dove i circuiti di alimentazione dei LED forniscano inizialmente basse correnti, ciò comporta un basso livello di flusso che deve comunque rientrare nelle specifiche di progetto. Dopo un certo periodo, quando il flusso emesso dal LED inizia a calare, il circuito inizierà ad aumentare la corrente di alimentazione

per cercare di compensare l'andamento in Figura (2.4). Questo approccio, utilizzato anche con i comuni tipi di lampade, ha come unico scopo l'aumento del tempo di esercizio dell'impianto durante il quale devono rimanere rispettate le specifiche di progetto. Si lascia al progettista un'analisi più approfondita del caso per vedere se vale la pena un sovradimensionare l'impianto con un'aumento del tempo di esercizio a scapito di aumento del fattore economico per la realizzazione di esso.

2.4 Prestazioni fotometriche/colorimetriche e binning nei moduli led a luce eterocromatica

Nel caso delle lampade a filamento incandescente, la distribuzione delle potenze nello spettro delle radiazioni emesse mostra un tipico andamento non bilanciato né regolare e continuo. Con i LED le curve di emissione cambiano completamente la loro forma. Permane la continuità tipica delle lampade allo stato solido ma la potenza si raccoglie in un piccolo intervallo di frequenze o lunghezze d'onda. La forma a campana comprende un valore di picco e, tra i valori minimi, lo scarto di lunghezza d'onda oscilla tra i 70 e i 100nm. In Figura (2.8) sono riportati i diagrammi energetici di LED a differenti emissioni spettrali e in Figura (2.9) le coordinate cromatiche per differenti composti chimici utilizzati per la fabbricazione dei led a corto spettro.

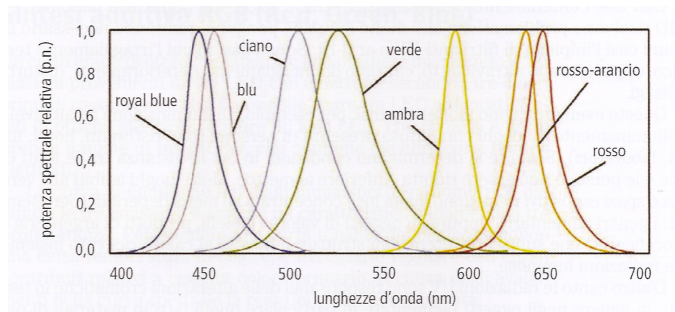


Figura 2.8:

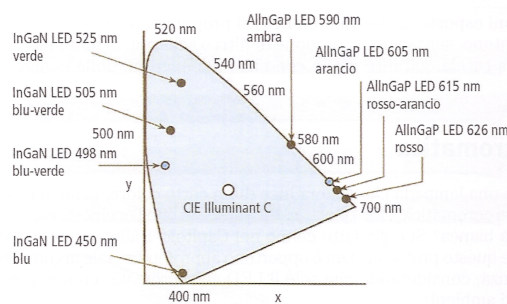
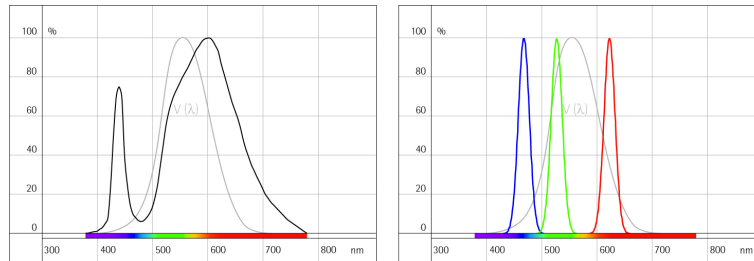


Figura 2.9:

Se dunque il LED è una lampada che genera una luce di un certo colore, come è possibile ottenere luce eterocromatica, cioè quel “mix” di radiazioni che l’occhio percepisce come luce di tonalità bianca?

Vi sono varie tecnologie tra cui:

- Sintesi additiva RGB (Red, Green, Blue) : si ottiene miscelando le radiazioni provenienti da tre LED che emettono secondo i tre colori primari rosso, verde, blu.
- Sintesi additiva di radiazioni blu e gialle: si utilizza un LED con emissione nella regione del blu e intorno al die si realizza un rivestimento semitrasparente in cui sono depositati cristalli fluorescenti (composti chimici a base di fosfori) che assorbono una parte della radiazione blu e la trasformano in radiazioni con frequenze più basse appartenenti alla regione spettrale del giallo
- Sintesi additiva di radiazioni di diverse frequenze: si utilizza la tecnologia applicata nelle lampade fluorescenti su un LED che emette nella regione spettrale degli ultravioletti



La distribuzione spettrale relativa del LED bianco caldo con conversione di luminescenza coincide sostanzialmente con la sensibilità relativa dei coni dell’occhio umano. Ne risultano una buona efficienza luminosa ed una buona resa cromatica.



I LED in RGB sono adatti alla miscelazione di luci colorate e molto sature. La luce bianca generata dai LED in RGB non ha comunque una resa cromatica soddisfacente, quindi queste lampade sono meno adatte ai compiti di illuminazione nei quali i colori costituiscono un fattore critico.



Figura 2.10:

Luce colorata
 Le tonalità saturate della luce dei LED colorati consentono una molteplicità di miscele cromatiche all'interno del triangolo formato dai punti colore rosso, verde e blu. I moduli LED con gli ulteriori LED bianchi, detti moduli RGBW, migliorano la resa cromatica della luce nelle tonalità che si collocano sulla curva di Planck.

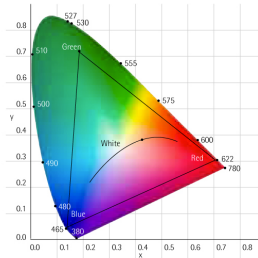


Figura 2.11:

Per la produzione industriale dei moduli LED si impiegano macchinari altamente automatizzati e robotizzati ciò però non rende possibile avere prestazioni ugualmente identiche. Ogni esemplare presenterà delle variazioni intorno a valori medi. Questo margine di aleatorietà è presente in tutti i tipi di lampade ma nel caso dei LED assume particolare rilevanza dato che non si può accettare di avere un modulo led, con all'interno “tante sorgenti cellulari”, con differenti prestazioni elettriche, fotometriche e coordinate colorimetriche. Queste ultime definiscono la tonalità della luce emessa attraverso il valore della temperatura di colore, nel diagramma cromatico CIE. I produttori hanno quindi adottato un sistema di classificazione o binning per intervalli di tolleranza; così per la caduta di tensione si indicano due limiti, che determinano un bin, ossia una classe data da un intervallo di Volt e in modo analogo viene definito un intervallo di tolleranza per i flussi luminosi. Conseguentemente per le coordinate cromatiche il bin è definito da un'area a quattro vertici di cui sono specificate le coordinate cromatiche.

Nella Figura (2.12) notiamo le aree di binning per la classificazione cromatica dei LED secondo la scala delle temperature correlate di colore. Nell'immagine a destra sono indicate le ellissi di McAdam che definiscono le coppie di coordinate cromatiche relative ai colori che l'occhio umano non è in grado di percepire come differenti.

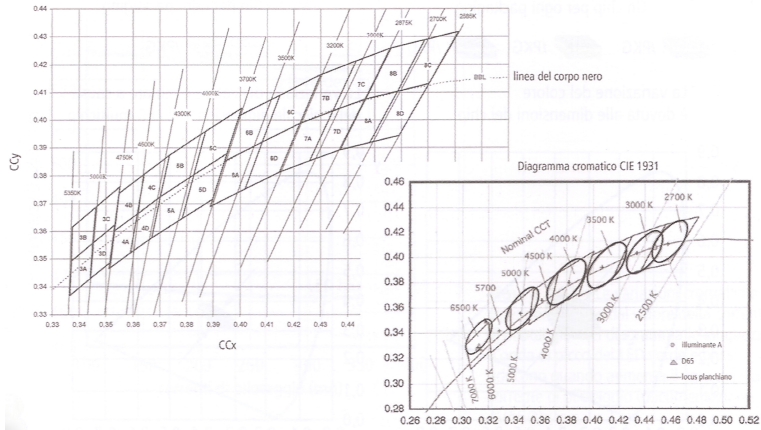


Figura 2.12:

Osservazioni:

- Alcuni produttori, adottano la tecnologia del LED multichip con un'accurata selezione dei singoli chip, ottenendo la riduzione delle aree di binning come in Figura (2.13).

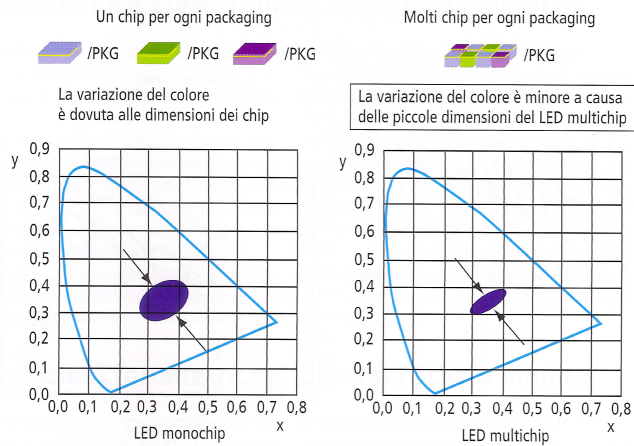


Figura 2.13:

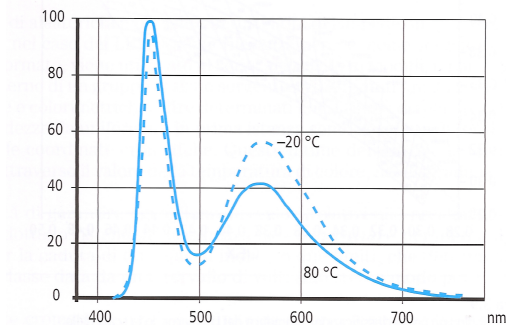


Figura 2.14:

- In Figura (2.14) viene mostrato come lo spettro di emissione di un LED dipende dalla temperatura di giunzione. La linea continua rappresenta lo spettro di emissione del led con temperatura di giunzione a 80°C. Nello stesso LED a -20°C (linea tratteggiata) si registra un incremento della potenza relativa intorno a 560nm.

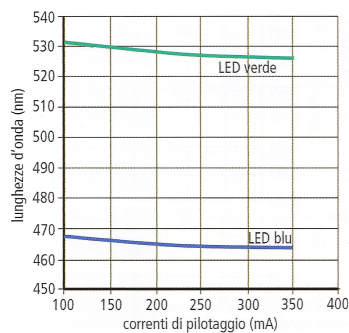


Figura 2.15:

- In Figura (2.15) si nota come le variazioni cromatiche dipendano anche dal valore della corrente di pilotaggio. Nel diagramma le lunghezze d'onda di picco dei LED verde e blu si riducono quando aumenta il valore della corrente di pilotaggio.

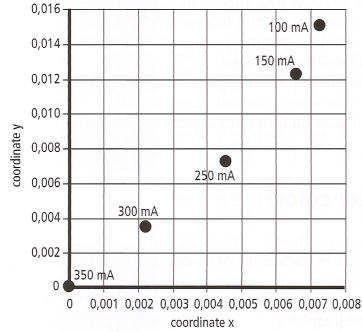


Figura 2.16:

- In Figura (2.16) è possibile notare le variazioni delle coordinate cromatiche x e y in funzione della corrente di pilotaggio di un LED a luce eterocromatica.

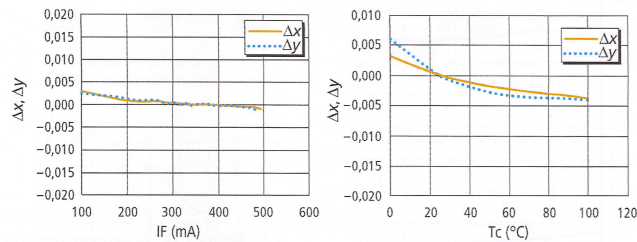


Figura 2.17:

- Il diagramma a destra in Figura (2.17) mostra le variazioni delle coordinate cromatiche nel diagramma CIE al variare della corrente di pilotaggio rispetto al valore standard di 350mA. Mentre il diagramma di sinistra mostra le variazioni in funzione della temperatura.

Possiamo quindi dire che le coordinate x e y del diagramma CIE subiscono variazioni in funzione della corrente di pilotaggio e della temperatura assunta dal LED. Nei LED di alta qualità tali variazioni sono comunque di modesta entità.

Indice di resa dei colori Appare chiaro che i LED offrono la possibilità di moltiplicare potenzialmente all'infinito le variazioni delle composizioni cromatiche. Nello specifico, dove si opera con le regolazioni separate (tecniche RGB, AWB e AR) è possibile avere cambiamenti anche minimi, comunque di differenti ampiezze. Per un multiLED RGB, AWB o AR, non esiste quindi un dato fisso di temperatura di colore, nè un indice di resa cromatica.

2.5 Rendimenti luminosi

A differenza delle lampade comuni i LED presentano una caratteristica ottico-fotometrica caratterizzata da un'emissione "orientata" di luce, ossia interamente compresa nell'emisfero superiore. Ne consegue che nessuna radiazione segue direzioni rivolte verso l'emisfero inferiore. Nel caso sia necessario orientare il flusso luminoso verso una più precisa direzione, cioè modificare il solido fotometrico, si ha la necessità di utilizzare componenti ottiche. Se c'è molta differenza tra le forme dei due solidi fotometrici significa che le componenti ottiche hanno svolto molto lavoro. In sostanza occorre replicare le riflessioni e le rifrazioni al fine di deviare efficacemente le radiazioni. Ma per ogni modifica dei loro percorsi si ha un'assorbimento e quindi il rendimento luminoso delle ottiche si riduce proporzionalmente.

$$\eta = \frac{\Phi_a}{\Phi_s}$$

Come si può osservare dalla Figura (2.18) il flusso reso Φ_a dal sistema LED equipaggiato con un'ottica è minore del flusso emesso dalla sorgente Φ_s .

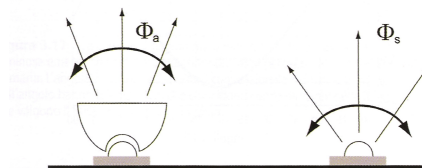


Figura 2.18:

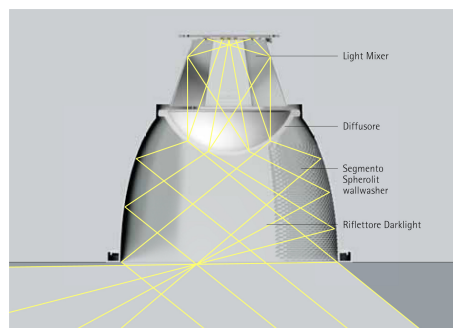
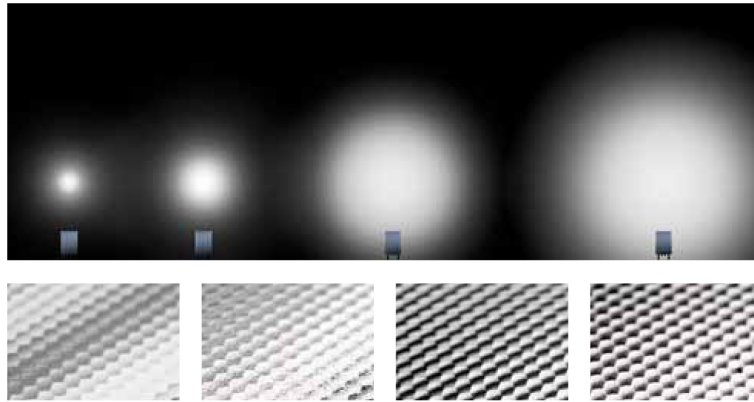


Figura 2.19:

Caratteristiche di distribuzione con lenti Spherolit



Narrow spot
Per accentuare piccoli oggetti con illuminamenti elevati o per superare grandi distanze tra l'apparecchio e l'oggetto illuminato. Angolo di distribuzione <math>< 10^\circ</math>.

Spot
Caratteristica standard per l'illuminazione d'accento di oggetti di ogni tipo, in particolare per modellare le forme tridimensionali. Angolo di distribuzione $10^\circ - 20^\circ$.

Flood
Per l'efficiente illuminazione d'accento di oggetti grandi o per portare in primo piano una parte di un ambiente. Angolo di distribuzione $25^\circ - 35^\circ$.

Wide flood
Per una flessibile illuminazione diffusa di superfici e parti di un ambiente, in particolare per la presentazione delle merci. Angolo di distribuzione $> 45^\circ$.

Figura 2.20:

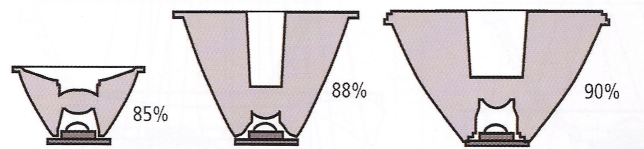


Figura 2.21:

In Figura (2.21) è possibile osservare tre ottiche a riflessione interna con i valori in percentuale dei rendimenti luminosi. Al crescere delle dimensioni aumenta il rendimento.

Parte III

Analisi affidabilità con Modello Multistress

Se da un lato il progettista di sistemi di illuminazione a LED deve basarsi sui dati presenti nei Data Sheet forniti dai costruttori dei componenti optoelettronici è anche vero che deve essere in grado di confrontare in modo adeguato i vari modelli di LED prodotti dalle varie aziende. Tempo di vita e quantità di flusso sono caratteristiche fornite dai produttori e ricavate da prove di laboratorio diverse. Questo non permette quindi un corretto confronto tra i modelli presenti sul mercato. Sembra utile presentare un'articolo REF [1] che spiega una possibile e più corretta procedura per un'analisi di questo tipo.

In alcuni casi, infatti, l'affidabilità di un dispositivo non può essere correttamente prevista considerando singolarmente i suoi fattori di stress. In questo caso si rende necessario per l'analisi l'uso di un modello multistress, come ad esempio l'uso di due stress contemporaneamente, ciò permette nella maggior parte dei casi di arrivare ad un buon risultato nell'analisi.

Sulla base di questa considerazione è possibile ricavare un modello di vita per i LED combinando lo stress termico e lo stress da corrente (forward current). L'analisi delle prestazioni del LED sotto l'effetto combinato di driving (forward) current e temperatura ha come scopo quello di ricavare un modello di vita che rappresenti al meglio le reali condizioni operative del componente. Sebbene, sotto reali condizioni di funzionamento, si presentino altri fattori che potrebbero contribuire all'invecchiamento del LED, molti di questi fattori provocano solo un moderato o basso effetto nella durata di vita perciò verranno considerati come fattori di invecchiamento. Ad ogni modo se in futuro dovessero sorgere altri fattori che provocano un significativo effetto sulle prestazioni dei LED questi dovranno essere considerati come ulteriori fattori di stress da analizzare.

Nel modello di vita a stress combinati in esame è possibile rappresentare il tempo di guasto o di vita di un LED come segue:

$$t_F = F(S_1, S_2) \quad (2.1)$$

Dato che il modello di vita è un caso speciale del così detto modello di invecchiamento che descrive il modo in cui il componente si degrada in funzione del tempo come una sequenze di stress possiamo scrivere:

$$A_L = f(p_L) = \int_0^{t_F} r(S_1, S_2) d\tau \quad (2.2)$$

Dove: p_L è il valore limite di una certa proprietà p in relazione alla rottura e $r(S_1, S_2)$ è il tasso di invecchiamento.

E' importante notare che il tasso di invecchiamento $r(S_1, S_2)$ non è in generale una semplice somma di valori $r(S_1)$ e $r(S_2)$ che si riferiscono a singole

condizioni di stress. E' stato sperimentalmente dimostrato che stress multipli causano un potenziamento dell'effetto più o meno evidente. In molte situazioni possiamo infatti approssimare $r(S_1, S_2)$ al prodotto tra $r(S_1)$ e $r(S_2)$.

Il modello di vita a stress multipli combinati [2.1] deve soddisfare due condizioni ovvero deve essere riconducibile a $t_{F,S_1} = F(S_1)$ quando $S_2 = 0$ e a $t_{F,S_2} = F(S_2)$ quando $S_1 = 0$. Inoltre i modelli a singoli stress devono fornire gli stessi tempi di vita quando non sono applicati stress.

Molti modelli di vita a stress combinati sono sostanzialmente una descrizione analitica e scientifica di un fenomeno, questo significa che fanno affidamento a un singolo modello di stress con parametri empiricamente determinati. A questo scopo vengono utilizzate tecniche regressive sui risultati di esperimenti tempo-rottura a N differenti livelli di stress. Tali livelli sono comunemente determinati sopra i normali livelli di stress di servizio secondo la tecnica ALT (Accelerated Life Test). I dati ottenuti dai test ALT vengono poi usati per ricavare una relazione analitica/statistica tra stress e tempo di vita. La procedura appena descritta è semplice quando analizziamo singoli stress ma richiede molta più attenzione nel caso di due stress combinati come nel nostro caso. Considerando i riferimenti ai due stress S_1 e S_2 , l'esperimento consiste essenzialmente in 3 steps:

1. ALT con $S_1 \neq 0$ e $S_2 = 0$
2. ALT con $S_1 = 0$ e $S_2 \neq 0$
3. ALT con $S_1 \neq 0$ e $S_2 \neq 0$

I risultati del primo e secondo step permettono la scelta dei valori del terzo step. Considerando il grafico in Figura (2.22) osserviamo che i simboli "X" segnano i dati ottenuti dal primo step e i simboli "O" i dati ottenuti dal secondo step e le righe tratteggiate sono attestate per congiunzione dei punti sugli assi che presentano tempi simili di rottura/vita. Ma allora le coppie di valori S_1 e S_2 per lo stress test combinato possono essere scelti preliminarmente tra quelli che giacciono lungo le linee tratteggiate. Certamente non ci si aspetta che i valori del tempo di vita seguano le linee ma questo è un modo semplice per delimitare entrambi i range dei livelli di stress e assicurare una buona copertura del campo dei valori.

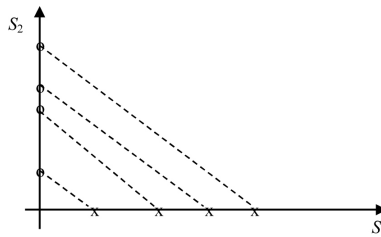


Figura 2.22:

Nell'articolo "Experimental Analysis of LEDs' Reliability Under Combined Stress Condition" Ref[1] viene descritto uno studio sull'affidabilità dei LED sotto

effetti combinati di corrente e temperatura con lo scopo di ricavare un modello di vita che rappresenti al meglio le reali condizioni operative del componente. Il modello di vita seguente e' stato ricavato in modo da seguire abbastanza bene l'andamento dei dati ricavati sperimentalmente e fornire una ragionevole predizione sulla durata di vita del LED in esame sotto condizioni nominali di corrente:

$$MTTF = A \cdot I_F^{-n} \quad (2.3)$$

Dove:

I_F è la corrente nominale del led (in mA);

$A = 3.548 \cdot 10^{16}$

$n = 8.148$

In Figura (2.23) è mostrata la relazione tra tempo di vita e guasto stimata tramite il modello rappresentato dall'equazione (2.3) .

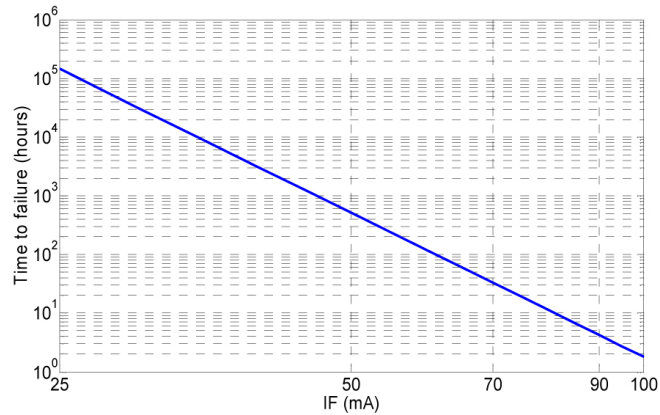


Figura 2.23:

Test Set Il test set sviluppato per questo studio deve rispettare dei vincoli, in altre parole deve essere possibile: i) applicare stress termici programmati ii) applicare stress di corrente programmati iii) applicare contemporaneamente stress termici e di corrente iv) misurare i parametri considerati rappresentativi per la degradazione del dispositivo in esame. Nel nostro caso il punto iv) riguarda la quantità di luce emessa: il dispositivo più “giovane” è quello che produce maggior flusso luminoso. Come convenzione nell’esperimento si considera come momento temporale di rottura/guasto quando il LED scende sotto il 70% del valore del flusso emesso rispetto al valore iniziale.

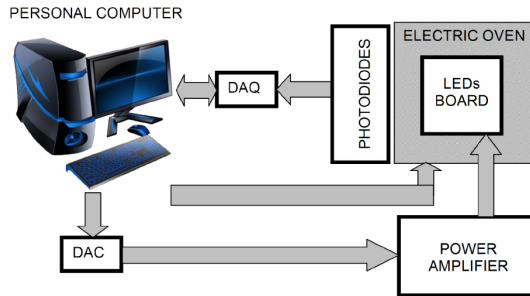
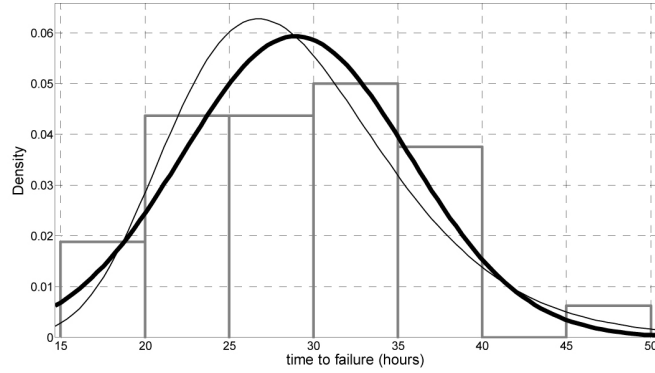


Figura 2.24:

Il test set per l'esperimento è quello in Figura (2.24). Un algoritmo nel PC assicura la corretta esecuzione dell'esperimento che può essere riassunto nei seguenti passi:

1. Il LED viene alimentato con una corrente di 20mA più bassa rispetto a quella nominale per 5 minuti;
 2. Viene acquisito il voltaggio del rivelatore di intensità luminosa;
 3. il LED viene alimentato con una corrente e/o una temperatura molto superiore rispetto a quella nominale per 75 minuti;
 4. Il LED e/o il forno elettrico, incaricato di regolare la temperatura dell'ambiente, vengono spenti e la porta del forno viene aperta per 30 minuti durante il quale il LED raggiunge la temperatura dell'ambiente circostante. Quindi ogni misura delle proprietà diagnostiche può essere eseguita quando la temperatura del LED ha raggiunto quella della stanza.
- I passi da 1 a 4 vengono ripetuti fino a quando l'intensità luminosa misurata nel passo 2 scende sotto il 70% del valore iniziale.
 - Gli intervalli di tempo nei passi 1 e 4 consentono di stabilizzare le condizioni degli stati termici.
 - Durante il passo 1 il LED si trova quasi in condizioni nominali ed in questo stato viene mantenuto per un tempo molto piccolo in confronto alle aspettative di vita del LED sotto le medesime condizioni di funzionamento. Per questo motivo è ragionevole assumere che il passo 1 non dia nessun contributo. Quindi solo l'intervallo nel passo 3 viene considerato per il calcolo del tempo di rottura.



Experimental distribution of time to failure for $T = 150^{\circ}\text{C}$ and $I_F = 20$ mA and fitting with normal (bold line) and lognormal (thin line) pdf

$T(^{\circ}\text{C})$	$MTTF$ (hours)	s_{TF} (hours)
120	219	35.6
130	94	18.1
150	54.6	8.2

Figura 2.25:

Risultati Esperimento

A - STRESS DI CORRENTE Il primo stadio è quello di ottenere informazioni riguardo il comportamento del LED utilizzando il modello di vita per stress di corrente rappresentato dall'equazione (2.3).

B - STRESS TERMICO Per questo scopo viene eseguita una serie di misure come precedentemente illustrato, considerando le seguenti temperature massime operative del led: 120°C , 130°C , 150°C .

Nella tabella di Figura (2.25) vengono illustrati, per ogni temperatura T , il tempo medio di rottura $MTTF$ (Mean Time To Failure) e la relativa deviazione standard s_{TF} .

E' possibile constatare che la relativa funzione di densità di probabilità associata al tempo di rottura t_f puo' essere ricondotta alla funzione di distribuzione normale, vedi grafico Figura (2.25) di una prova eseguita a $T = 150^{\circ}\text{C}$.

Viene usata comunemente come base per il modello di vita di un componente sotto stress termico l'equazione di Arrhenius vedi Equazione (2.4)

$$MTTF = A \cdot e^{B/T} \quad (2.4)$$

Dove:

T è la temperature in Kelvin

A e B sono parametri facilmente determinabili applicando tecniche di regressione non lineare sui dati.

In Figura (2.26) vengono paragonati i dati sperimentali con quelli stimati dal modello di vita dell'Equazione (2.4).

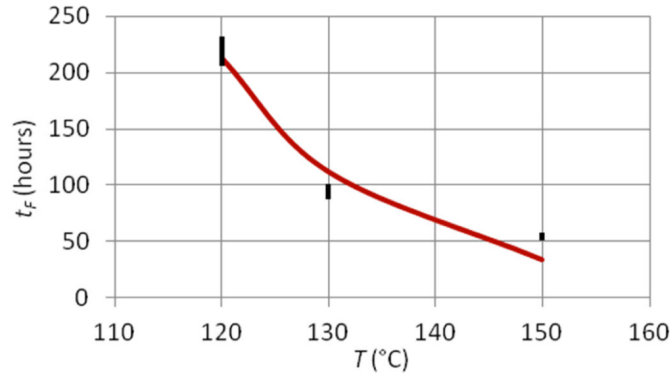


Figura 2.26:

C - STRESS COMBINATI In Figura (2.27) è possibile osservare i risultati di un multi-stress test combinato con $T = 150^{\circ}\text{C}$ e $I_F = 20\text{mA}$.

Secondo questo studio la sinergia tra stress termico e corrente sembra abbastanza evidente. L'aspettativa di vita di un LED in condizioni di funzionamento nominale ($I_F \leq 25\text{mA}$ a temperatura ambiente) è di circa 10^5 ore, ma essa scende drasticamente a 30 ore se il LED è sottoposto a una temperatura di 130°C in aggiunta ad una corrente di 20mA .

Quindi, secondo questo studio, usare modelli di vita a singoli stress potrebbe non essere sufficiente per la previsione dell'affidabilità del dispositivo sotto reali condizioni operative.

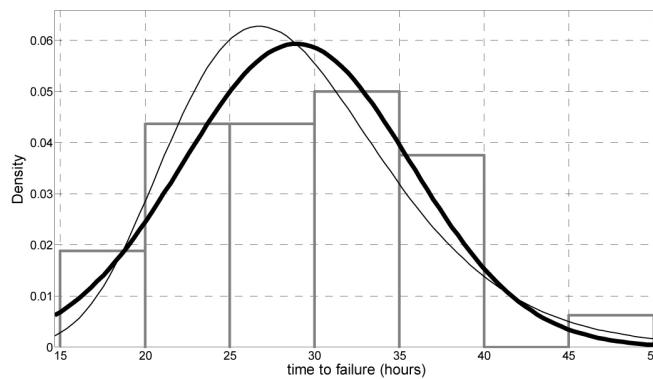


Figura 2.27:

Parte IV

Affidabilità Sistema a LED

Tutti i componenti o sotto-sistemi integrati in un sistema a LED devono garantire le stesse prestazioni per il pieno utilizzo del o dei componenti optoelettronici installati in esso. In altre parole non ha senso progettare un LED con una durata di 30.000 ore se poi l'alimentatore smette di funzionare correttamente a 15.000 ore oppure qualche altro componente del sistema si guasta prima. La figura (2.28) fornisce una panoramica di alcune delle piu' note modalità di guasto nei sistemi LED.

Level		Identified Failure Modes
0: Bare Die		<ul style="list-style-type: none"> -LED catastrophic failure -Lumen depreciation (several causes) <ul style="list-style-type: none"> -Degradation of active region / ohmic contact -Electro-migration causing dislocations -Diffusion of metal atoms to the active region -Current crowding (uneven current distribution) -Doping related failures
1: Packaged LED		<ul style="list-style-type: none"> -Yellowing of packaging materials (degradation/aging) -Electrostatic discharge (ESD) -Interconnect failure (solder or die-attach) -Cracks (f.e. vertical die crack) -Delamination (at any interface) -Wire bond failure
2: LED's on substrate		<ul style="list-style-type: none"> -Cracks (f.e. in the ceramic) -Solder fatigue -PCB metallization problem -Short (f.e. due to solder bridging)
3: LED module		<ul style="list-style-type: none"> -Casing cracks -Driver failures -Optic degradation (browning, cracks, reflection change) -ESD failures
4: Luminaire		<ul style="list-style-type: none"> -Fractures (f.e. due to vibrations) -Moisture related failures (f.e. popcorning) -Corrosion due to water ingress -Deposition of outgassing material on the optics
5: Lighting system		<ul style="list-style-type: none"> -Software failures -Electrical compatibility issues -Installation & commissioning issues

Figura 2.28:

3 Metodo Montecarlo applicato a SSL (Solid State Light)

- **METODO MONTECARLO:** Spesso ci si trova di fronte a situazioni in cui si ha bisogno di conoscere la probabilità di un certo evento, ma le variabili che lo condizionano sono troppe e non è possibile svolgere calcoli analitici. In tali situazioni si fa ricorso a metodi di campionamento simulato, cioè si simula la situazione nella quale si vuole calcolare la probabilità di un certo evento. La simulazione stocastica si attua riproducendo il meccanismo preso in esame, sostituendo alla valutazione analitica l'osservazione empirica del fenomeno e traendo da questa le informazioni non rilevabili per via analitica. Ad esempio, la frequenza osservata di un certo evento costituisce una valutazione della probabilità di quell'evento (a patto che il campionamento sia stato simulato per un consistente numero di volte). Questa simulazione prende il nome di metodo Montecarlo. Il Me-

todo Montecarlo è usato per trarre stime attraverso simulazioni. Si basa su un algoritmo che genera una serie di numeri incorrelati, che seguono la distribuzione di probabilità che si suppone abbia il fenomeno da indagare.

Una delle sfide principali per un approccio generico sull'affidabilità dei sistemi di illuminazione allo stato solido è la loro grande varietà di prodotti e applicazioni. Diversi prodotti hanno architetture diverse e quindi differenti meccanismi di guasto. Inoltre le applicazioni e i modi di utilizzo sono molto diversi e, al fine di prevedere il livello di affidabilità del sistema, informazioni come modalità di guasto dei sub-componenti, condizioni di esercizio devono essere prese in considerazione. Per esempio, la necessità e le possibili cause di guasti presenti in un sistema per l'illuminazione sono diverse per una applicazione di illuminazione pubblica o un'applicazione automotive.

Un generico approccio al problema può essere quello di utilizzare il Metodo Montecarlo con mostrato in Figura (3.1)

L'approccio è il seguente:

1. Definire le condizioni di applicazione.
2. Definire la funzione richiesta per esempio flusso luminoso emesso o colore richiesto.
3. Decomporre il sistema attraverso:
 - (a) individuazione delle modalità di guasto dei componenti critici;
 - (b) derivazione delle condizioni dei componenti dalla condizione del sistema;
4. Definire il criterio di affidabilità per ogni sotto-sistema.
5. Raccogliere i dati sui fallimenti dei componenti in modo da determinare le condizioni di prova.
6. (Accelerated) test di durata di ogni sub-componente.
7. Combinazione dei guasti dei componenti in errori di sistema tramite il metodo Monte-Carlo.
8. Prevedere la distribuzione del guasto.
9. Utilizzando queste tecniche di ottimizzazione, ricavare regole di progettazione.

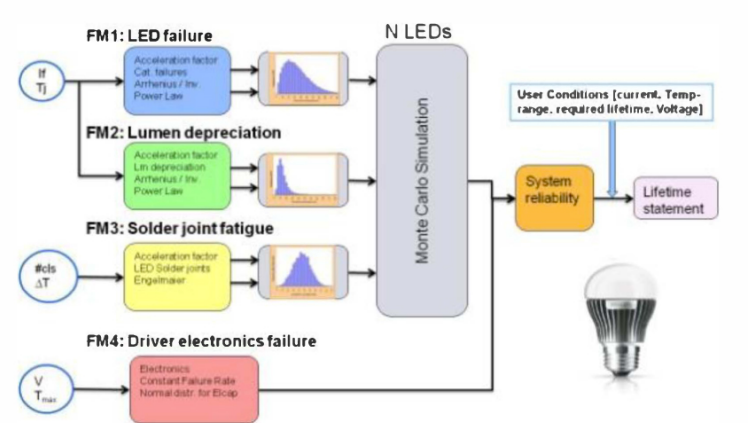


Figura 3.1:

Un tipico risultato di questo approccio applicato a un sistema di illuminazione allo stato solido è mostrato in Figura (3.2) dove viene relazionato il tempo di funzionamento con la percentuale di dispositivi ancora funzionanti.

La Figura (3.2) dimostra come i LED emettitori contino solo per il 30% nel fallimento, mentre l'interconnessione di saldatura e i driver per il 44% e il 26% rispettivamente dopo il fallimento 20.000 ore di funzionamento.

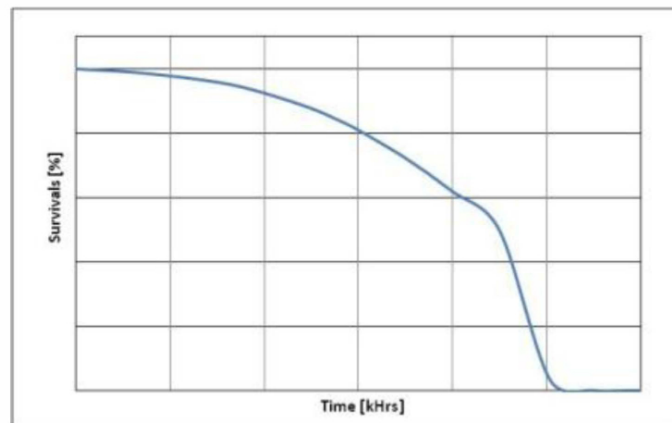


Figura 3.2:

Parte V

Conclusioni

Analizzando articoli scientifici, nei quali dopo una serie di misure sperimentali si è cercato di stimare il tempo di vita di un LED, appare evidente che il decadimento esponenziale del flusso luminoso, in funzione del tempo, permette di stimare il time-life attraverso un'extrapolazione dei dati fissando una percentuale massima di decadimento del flusso; inoltre i led commercializzati da differenti produttori danno significanti differenze in termini di prestazioni.

Si rende quindi necessario in campo illuminotecnico o la stima attraverso ALT di ogni modello di componente LED impiegato (cosa impossibile e costosa) o la definizione di set di prove sperimentali standard, eseguito da tutti i produttori che verrà allegato al datasheet del componente. Quest'ultimo permetterebbe all'utilizzatore finale, del componente optoelettronico, un facile confronto tra i modelli presenti sul mercato potendo usufruire di un corretto mezzo di confronto. Inoltre data la varietà di modelli presenti, l'utilizzatore potrà decidere, in base alle specifiche di progetto (potenza luminosa, dura di vita dell'impianto, tempi di manutenzione, indice di resa cromatica), quale componente risulterà essere il più appropriato.

In ogni caso nell'utilizzo dei componenti LED si ricercherà sempre un compromesso tra durate di vita e flusso emesso.

E' utile evidenziare che con la tecnologia a LED, al contrario delle comuni lampade, i LED presentano un ulteriore potenziale di sviluppo in termini di aumento dell'efficienza luminosa. Nel calcolo del flusso luminoso o degli illuminamenti si deve infatti prendere come criterio sempre l'efficienza luminosa attuale dei LED, e non la potenza in Watt del modulo LED, non ha quindi più senso parlare di potenza installata in termini di Watt ma di flusso installato.

Inoltre cambia anche il modo di concepire la progettazione e il tempo di vita di un impianto illuminotecnico. Nella visione odierna si tende a separare l'apparecchio dalla sorgente luminosa: la sorgente ha determinate caratteristiche, un certo tempo di vita e può essere sostituita mentre l'apparecchio modifica le caratteristiche illuminotecniche della sorgente, ha un suo tempo di vita ma incide poco nelle prestazioni della sorgente. Con i LED grazie a durate di vita equiparabili a quelle dell'impianto si parla solo di durata di vita riferita al "Sistema a LED" con determinate caratteristiche come trattato precedentemente.

Bisogna anche riconoscere che, allo stato attuale dell'evoluzione tecnologica, alcune sorgenti tradizionali mantengono la loro validità e l'avvento dei LED non può essere considerato a tutti gli effetti una reale alternativa. Considerando l'odierno scenario dell'offerta di prodotti industriali, la presenza delle lampade basate sulla tecnologia del sodio è nettamente prevalente. Sono prodotti che hanno efficienze tali, sia pure nella fascia alta delle potenze elettriche, da mantenere posizioni dominanti. Tuttavia le tendenze in atto preannunciano, nell'arco dei prossimi anni, un allineamento dei migliori LED ai massimi valori di efficienza dei modelli a vapori di sodio. Un inizio di cambiamento lo possia-

mo già notare dal fatto che: mentre negli scorsi anni all'apparecchio di successo normalmente equipaggiato con lampade alogene, fluorescenti o a vapori si affiancava la versione fornita di un sistema a LED (un'operazione di adattamento) oggi si iniziano a vedere modelli presenti sul mercato appositamente studiati per applicazioni a LED, sta quindi come precedentemente detto cambiando la visione di apparecchio + sorgente in Sistema a LED.

Inoltre è opportuno segnalare che una valutazione più attenta, fondata su criteri di giudizio non solo quantitativi ma anche qualitativi da porre alla base di un serio lavoro di progettazione, porta a conclusioni differenti. Per esempio, come prima cosa l'alta efficienza delle tradizionali lampade a scarica per esterni non corrisponde una altrettanto elevata resa dei colori e la gamma delle temperature di colore risulta assai limitata. Inoltre la durata media di vita colloca i diodi luminosi in una posizione di vantaggio. La caratteristica della lunga durata si dimostra determinante negli impianti che devono rendere il loro servizio, in modo costante ed efficace, per molte ore durante il giorno e la notte come nelle gallerie stradali.

Ringraziamenti

Ringrazio il prof. Pietro Fioretin per la disponibilità nei miei confronti.

Un ringraziamento particolare ai miei Genitori, Diego e Maddalena, che mi hanno sempre sostenuto e assistito anche nei momenti di sconforto, (le parole “Matematica A” dicono già tutto) e ai miei fratelli , Andrea e Leonardo, per avermi supportato o sopportato a seconda del giorno...

Non in ordine di importanza ringrazio i miei colleghi di università che mi hanno sostenuto (e che ho sostenuto!) : Piero Vallese, Alberto Favero, Luigi Costa, Marco Piovesan, Stefano Negro, Matteo Santolin e Alessandra Storti.

Devo assolutamente citare alcune persone particolarmente importanti: Mary, Talita, Katia, Mariam, Alessandra e Giuseppina.

Rimando i ringraziamenti agli amici dopo la laurea, tutto dipende da cosa avverrà' dopo la cerimonia di proclamazione....

Un ringraziamento dovuto ai “Blue Moon” che mi hanno permesso di autofinanziarmi gli studi; alla “Pizzeria da Giacomo” e a tutti quei poveri ragazzi a cui, così gioiosamente, ho fatto ripetizioni.

Alla fine del carroccio dei ringraziamenti metto: Bambini pestilenti dell'A-CR, Palestra di Montecchio istruttori/ci, Vecchi ballerini impazziti, Trenitalia e relativi pazzi nei treni, Aula studio ESU, Biblioteca di psicologia, Zii, Zie, Cugini, Cugine e parenti tutti.

Riferimenti bibliografici

- [1] Andrea Albertini, Maria Gabriella Masi, Giovanni Mazzanti, Lorenzo Peretto, Roberto Tinarelli - Experimental Analysis of LEDs' Reliability Under Combined Stress Condition - Department of Electrical Engineering University of Bologna - IEEE 2011
- [2] Nadarajah Narendran and Yimin Gu, Life of LED-Based White Light Sources - IEE/OSA JOURNAL OF DISPLAY TECHNOLOGY, VOL.1, NO. 1, SEPTEMBER 2005
- [3] Shih-Change Shei, Jinn-kong Sheu, and Chien-Fun Shen - Improve Reliability and ESD Characteristics of Flip-Chip GaN-Based LEDs With Internal Inverse-Parallel Protection Diodes - IEEE Electron Device Letter, VOL. 28, NO. 5, May 2007
- [4] Lu Guoguang, Huang Yun - The relationship between LED Package and Reliability - China Electronic Product Reliability and Environmental Testing Research Institute
- [5] Eduardo Nogueira, Juan Mateos - Accelerated Life Testing Leds On Temperature and Current - Proceedings of the 8th Spanish Conference on Electronic Device, CDE'2011
- [6] W.D. van Driel, C.A. Yuan, S. Koh, G.Q. Zhang - LED System Reliability - 12th Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics and Experiments in Microelectronics and Microsystem, EuroSimE 2011
- [7] Dr. John Peck - Solid state LED light technology for hazardous environments, quality of light and reliability - Dialight , Farmingdale, NJ, USA
- [8] Andrea Albertini, Maria Gabriella Masi, Giovanni Mazzanti, Lorenzo Peretto, Roberto Tinarelli - A Test Set for LEDs Life Model Estimation - Department of Electrical Engineering University of Bologna - IEEE2010
- [9] Gianni Forcolini - Illuminazione LED - Hoelpi
- [10] Xiabobing Luo, Bulong Wu, Sheng Liu - Effects of Moist Environments on LED Module Reliability - IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, VOL.10, NO. 2, June 2010
- [11] Heinzvan derBroeck, Georg Sauerlander, Matthias Wendt - Power driver topologies and control schemes for LEDs - Philips Research Europe Laboratories, Weissshausstrasse 2, 52066 Aachen, Germany

- [12] M. Schmid, D. Kuebrich, M. Weiland, T. Duerbaum - Evaluation on the Efficiency of Power LEDs Driven with Currents Typical to Switch Mode Power Supplies - Chair of Electromagnetic Fields Friedrich- Alexander -University Erlangen- Nuremberg Erlangen, Germany Chair of Electromagnetic Fields
- [13] Yuan Fang - A Power Converter with Pulse-Level-Modulation* Control for Driving High Brightness LEDs - 'Department of Electronic and Information Engineering, Hong Kong Polytechnic University
- [14] Wei-Ching Liew, Chao-Yui Ong -Thermal Analysis of High Power LEDs at Different Drive-In Current - Mutharasu Devarajan School of Physics, University Science of Malaysia, 11800 Penang, Malaysia
- [15] Alexander Suzdalenko - Investigation of Power Supply Methods for Intelligent LED Luminary - Ilya Galkin† * RTU Institute of Industrial Electronics and Electrical Engineering, Riga, Latvia - 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2010
- [16] Comparison of LED Package Reliability under Thermal Cycling and Thermal Shock Conditions by Experimental Testing and Finite Element Simulation - Wuhan National Lab for Optoelectronics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, P. R. China, 430074
- [17] Data Sheet - Golden DRAGON Plus - High power LED with silicone dome, excellent thermal management, max. current of 1 A, long lifetime, Lead (Pb) free – RoHS compliant - OSRAM Opto Semiconductors
- [18] Catalogo ERCO -LED Lighting-